

Emílio Eiji Kavamura

**Estudo do comportamento termo-estrutural bidimensional de
barragens de concreto utilizando o Método dos Elementos
Finitos**

Curitiba / PR

2005

Emílio Eiji Kavamura

**Estudo do comportamento termo-estrutural bidimensional de
barragens de concreto utilizando o Método dos Elementos
Finitos**

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

Orientadora: Prof.^a DSc. Mildred Ballin Hecke

Co-orientadores: Prof. D.Eng. Roberto D. Machado
Prof. DSc. Luiz A. de Lacerda

Curitiba / PR

2005

TERMO DE APROVAÇÃO

Emílio Eiji Kavamura

“Estudo do comportamento termo-estrutural bidimensional de barragens de concreto utilizando o Método dos Elementos Finitos”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Métodos Numéricos em Engenharia - Área de Concentração em Mecânica Computacional, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora:

Prof^a. Mildred Ballin Hecke, DSc.
Centro de Estudos de Engenharia Civil - CESEC/UFPR

Co-orientador:

Prof. Roberto Dalledone Machado, D.Eng.
Centro de Estudos de Engenharia Civil - CESEC/UFPR

Co-orientador:

Prof. Luiz Alkimin de Lacerda, DSc.
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC

Prof. Daniel Domingues Loriggio, Dr.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFSC

Curitiba, 21 de setembro de 2005.

Dedicatória

"I would spread the cloths under your feet: But I, being poor, have only my dreams; I have spread my dreams under your feet; Tread softly because you tread on my dreams". (W.B. Yeats, He wishes for the Cloths of Heaven)

Dedico

àquela que um dia aceitou andar calmamente sobre meus sonhos,

velando minhas noites e

me inspirando a novas conquistas...

Josie

Agradecimentos

Gostaria de colocar o nome de todos aqueles que participaram, apoiaram, criticaram e contribuíram para a realização e finalização deste trabalho.

Primeiramente, a COPEL por ter ofertado a possibilidade e fornecido as condições de realizar este trabalho, em particular, na figura de minha amiga Denise Araújo Vieira Krüger.

Ao CESEC-UFPR por me aceitar e confiar na minha capacidade de desenvolver uma dissertação. O apoio, as condições e as responsabilidades inerentes ao mestrado e fora dele foram alguns dos fatores que me motivaram a continuar e a terminar este trabalho.

Aos meus orientadores: Professora Mildred, que apesar de todo o acúmulo de atividades e dos momentos difíceis, pôde sempre apoiar e direcionar o trabalho. Ao Professor Dalledone pela paciência, compreensão e participação nas diversas atividades desenvolvidas. Ao Professor Alkimin pela motivação, pelo comprometimento e dedicação ao meu trabalho. Gostaria de mostrar minha mais profunda gratidão e apreço por esta longa jornada.

A você, Neil F. de Carvalho, grande companheiro, pela paciência mais que oriental para aturar as manias informáticas deste nipônico. Por todo apoio, suporte, companheirismo e cumplicidade neste trabalho eu lhe devo muito e jamais saberei como retribuí-lo da mesma forma.

A vocês, meus caríssimos amigos da UTP, que me incentivaram, apoiaram e me ajudaram a superar mais esta fase: José S. Coutinho Filho, Aloysio N. Salgado, Simone R. Morrone e Marcos B. Proença, Osvaldo Herek, Flávio A. Pozzi, Francisco C. Sardo, Marcos A. Canalli, e Uraci de C. Bomfim, meu eterno obrigado.

A vocês meus amigos, passageiros desta jornada, Rogério Carrazedo, Fernando P. Lázaro, Luciana M. Teixeira, Thais C. Abreu, Amanda Jarek, Carmem L. G. da Gamma, Tania M. Preto, Millian S. Abe, Maristela Bandil, Luciano Xiscatti, entre outros, meu obrigado pela amizade.

A meus pais pelo apoio e dedicação a minha formação, por me abrirem os olhos e me fazerem ver o mundo de outra forma. A Joremia e Cláudio, meus sogros, por incentivarem e compreenderem a minha dedicação a este trabalho. A meus irmãos Mário e Márcia por sempre estarem presentes. Aos demais familiares que sempre encheram minha casa de felicidade...

Por último e não menos importante, a você, Joseane que tem me acompanhado todos os dias, tem aguentado todo o meu humor e tem compartilhado cada uma destas linhas...

Epígrafe

Dois importantes fatos, nesta vida, saltam aos olhos;

Primeiro, que cada um de nós sofre inevitavelmente derrotas temporárias, de formas diferentes, nas ocasiões mais diversas.

Segundo, que cada adversidade traz consigo a semente de um benefício equivalente.

Ainda não encontrei homem algum bem-sucedido na vida que não houvesse antes sofrido derrotas temporárias. Toda vez que um homem supera os reveses, torna-se mental e espiritualmente mais forte...

É assim que aprendemos o que devemos à grande lição da adversidade.

(Andrew Carnegie a Napoleon Hill)

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
Resumo	xviii
Abstract	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO DO TRABALHO	4
1.1.1 Grandeza Monitorada	5
1.2 UHE SALTO CAXIAS	5
1.3 MOTIVAÇÃO E DESAFIOS	11
1.4 REVISÃO DA LITERATURA	12
1.4.1 Construção com CCR	12
1.4.2 Problema Térmico em Barragens.....	15
1.4.3 A Influência de Fatores Climáticos	15
1.4.4 A Influência de Fatores Construtivos	18
1.4.5 Problema Estrutural	20
1.4.6 Técnicas Já Empregadas	21
1.5 TRABALHOS PRODUZIDOS	21
1.6 OBJETIVO.....	21
1.7 DESENVOLVIMENTO	22

2	Modelagem	23
2.1	Características do material	23
2.2	Simplificações na modelagem	26
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA - TÉRMICA	29
2.3.1	Condução, Convecção e Irradiação de Calor	29
2.3.2	Condução Entre Dois Materiais	32
2.3.3	Análises Transientes	33
2.3.4	Formulação Variacional Térmica	34
2.4	Modelagem Matemática - Estrutural	37
2.5	Métodos Aproximados	46
2.5.1	Diferenças Finitas	46
2.6	Método dos Elementos Finitos	48
2.7	Aplicação dos Métodos Aproximados	52
2.8	Equilíbrio dos Elementos - Térmico	55
2.8.1	Modelo discretizado	55
2.8.2	Determinação das Equações Matriciais	57
2.9	Equilíbrio dos Elementos - Estrutural	59
2.9.1	Derivação das Equações Matriciais	62
3	Modelagem com Ansys	66
3.1	Etapas para a análise	67
3.1.1	Inicialização e construção do modelo	68
3.1.2	Análise do modelo	78
3.1.3	Pós-processamento	80
4	Análise Térmica Comparativa	83
4.1	Modelo de 3 camadas	83
4.2	Modelo Serra da Mesa	85

4.3	Modelo da Seção Parcial da Barragem da UHE Salto Caxias.....	89
5	Análises e Resultados da Metodologia por Camadas.....	93
5.1	Modelo da Seção Parcial do bloco B-08 de Salto Caxias.....	93
5.2	Comparação das Metodologias através dos Resultados Térmicos.....	94
5.3	Resultados Térmicos da Análise Paramétrica.....	99
5.3.1	Efeito da altura das camadas.....	100
5.3.2	Efeito do intervalo entre lançamentos 30 cm.....	102
5.4	Resultados Termomecânicos da Análise Paramétrica.....	104
5.4.1	Efeito da altura das camadas.....	105
5.4.2	Efeito do intervalo entre lançamentos 30cm.....	109
6	Conclusões.....	112
	Referências.....	115
	Apêndice A – Fluxograma comentado.....	119
A.1	Inicialização.....	119
A.2	Construção do modelo.....	120
A.3	Análise.....	121
A.4	Resultados.....	123
	Apêndice B – <i>Birth Death</i>.....	124
B.1	Utilizando os recursos do <i>Birth and Death</i>	125
B.2	Visualizando os resultados.....	126
B.2.1	<i>Birth-Death</i>	126
	Anexo A – Crise do setor elétrico em 2001.....	127
A.1	Setor Elétrico.....	127
A.2	Recursos Hidrelétricos.....	129
	Anexo B – Dados levantados no projeto.....	131

B.1 Barragens citadas.....	131
B.2 Equipamento utilizado para as análises	132
B.3 Método de Resolução - <i>Solvers</i>	133
B.4 Fluxo de Calor por Radiação	134
Anexo C – Influência do tamanho dos passos de tempo (<i>timesteps</i>).....	135

Lista de Figuras

Figura 1	Localização da UHE de Salto Caxias	5
Figura 2	Vertedouro da UHE Salto Caxias - vistas parciais da barragem.	6
Figura 3	Fases construtivas da seção do BLOCO B08 da barragem.	6
Figura 4	Galgamento da estrutura.	7
Figura 5	Estrutura da barragem com CCR.	9
Figura 6	Sensores instalados.	10
Figura 7	Maquinário utilizado em CCR	13
Figura 8	Cronograma de deposição das camadas de concreto - barragem da UHE Salto Caxias	14
Figura 9	Cargas térmicas.	16
Figura 10	Calor gerado na hidratação do cimento.	16
Figura 11	Carregamento estrutural em barragens	20
Figura 12	Equipamentos utilizados em CCR - Upper Still Water	28
Figura 13	Condições de contorno.	30
Figura 14	Condições de contorno para condução.	32
Figura 15	Convenção de sinais para as tensões.	38
Figura 16	Métodos de análise	39
Figura 17	Cálculo de derivada com diferenças finitas	47
Figura 18	Processo de solução pelo MEF	49
Figura 19	Discretização do domínio	51
Figura 20	Geometria do elemento PLANE77	51

Figura 21	Fluxograma simplificado de análise.	67
Figura 22	Fluxograma simplificado do programa elaborado neste trabalho.	69
Figura 23	Ativação dos elementos correspondentes às camadas.	70
Figura 24	Variação do Módulo de Elasticidade do concreto durante a análise. ...	71
Figura 25	Alteração do módulo de elasticidade das 4 primeiras camadas	72
Figura 26	Alguns modelos geométricos possíveis.	74
Figura 27	Outras geometrias e técnicas construtivas possíveis (1)	74
Figura 28	Método escalonado (2)	75
Figura 29	Pequenas barragens método rampado (3)	75
Figura 30	Camadas definidas pelas áreas A1 a A60	76
Figura 31	Áreas definidas pelas linhas	76
Figura 32	Detalhe da geração dos <i>Keypoints</i>	77
Figura 33	Elementos obtidos na geração da malha mapeada.	78
Figura 34	Pontos monitorados em Salto Caxias	82
Figura 35	Modelo de validação	84
Figura 36	Resultados do modelo de validação	85
Figura 37	Evolução das temperaturas na viga de Serra da Mesa em bloco-único .	87
Figura 38	Evolução das temperaturas na viga de Serra da Mesa - em camadas ..	88
Figura 39	Temperatura ambiente monitorada.	90
Figura 40	Temperaturas de lançamento do concreto e do ar entorno	91
Figura 41	Detalhe da localização dos sensores instalados	91
Figura 42	Comparação com as temperaturas monitoradas	92
Figura 43	Esquema da geometria analisada e localização dos pontos em estudo ..	95

Figura 44	Distribuição de temperaturas: caso 01 - Bloco único	97
Figura 45	Distribuição de temperaturas: caso 02 - Deposição em camadas com parâmetros variantes e 30cm de altura de camada	98
Figura 46	Distribuição de temperaturas: casos 03 e 06	101
Figura 47	Distribuição de temperaturas: casos 03 e 07	102
Figura 48	Distribuição de temperaturas: casos 03 e 04	103
Figura 49	Distribuição de temperaturas: casos 03 e 05	104
Figura 50	Resistência do concreto	105
Figura 51	Distribuição de tensões S_1 : casos 03, 06 e 07	106
Figura 52	Distribuição de tensões S_1 : casos 03, 06 e 07	107
Figura 53	Distribuição de tensões S_z : casos 03, 06 e 07	108
Figura 54	Distribuição tensões S_1 : casos 03, 04 e 05	109
Figura 55	Distribuição tensões S_z : casos 03, 04 e 05	111
Figura 56	Elementos obtidos na geração da malha mapeada.	119
Figura 57	Inicialização	120
Figura 58	Geração da geometria	121
Figura 59	Análise térmica do modelo	122
Figura 60	Análise estrutural do modelo	123
Figura 61	Resultados das análises	123
Figura 62	Influência do número de <i>substeps</i> na temperatura máxima	136

Lista de Tabelas

Tabela 1	UHE Salto Caxias - Alguns dados técnicos	7
Tabela 2	Grandezas monitoradas nos pontos selecionados	81
Tabela 3	Propriedades termo-mecânica do concreto compactado com rolo.	94
Tabela 4	Elevação adiabática da temperatura e calor gerado.	94
Tabela 5	Grandezas monitoradas nos pontos selecionados	100
Tabela 6	Casos comparados na análise termo-estrural	100
Tabela 7	Alguns dos elementos estruturais que admitem Birth and Death	124
Tabela 8	Projetos de barraganes	131
Tabela 9	Descrição do equipamento	132
Tabela 10	Seleção do Método de Resolução - <i>Solver</i>	133

Lista de Siglas

CCR	Concreto Compactado com Rolo
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
UFPR	Universidade Federal do Paraná
ADINA	<i>Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis</i>
HC	Hidróxido de Cálcio
SEM	<i>Scanning electron microscope</i>
ESEM	<i>Environmental scanning electron microscope</i>
APDL	<i>ANSYS Parametric Development Language</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
PTV	Princípio dos Trabalhos Virtuais
AMG	Algébrico Malha Multipla <i>Algebraic Multgrid</i>
DDS	Domínios Distribuídos <i>Distributed Domain Solver</i>
PCG	Gradiente Pré condicionado Conjugado
JCG	Gradiente Conjugado de Jacobi
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
DOF	Graus de Liberdade (<i>Degrees of Freedom</i>)

Lista de Símbolos

B	corpo para análise
Ω	região do espaço ocupado pelo corpo B
Γ	superfície que limita a região Ω do corpo B
$\Theta(\mathbf{x})$	campo de temperaturas
\aleph	fluxo de calor no contorno Γ
$\{\}$	conjunto vazio
$\Theta^*(\mathbf{x}, t)$	temperatura prescrita $[K]$
\aleph_1	o fluxo de calor não prescrito em Γ_1 $[\frac{J}{m^2 s}]$
\aleph_2	fluxo de calor prescrito em Γ_2 $[\frac{J}{m^2 s}]$
\mathbf{n}	versor gradiente de temperatura
q	fluxo de calor em Ω $[\frac{J}{m^2 s}]$
\mathbf{d}	condutividade térmica do material $[\frac{J}{m s K}]$
\mathbf{D}	tensor de condutividade térmica do material $[\frac{J}{m s K}]$
\aleph_c	fluxo de calor convectivo $[\frac{J}{m^2 s}]$
\aleph_r	fluxo de calor radioativo $[\frac{J}{m^2 s}]$
h_f	coeficiente de transferência de calor no contorno $[\frac{J}{m^2 K}]$
Θ_∞	temperatura ambiente em torno de Γ_1 $[K]$
$\aleph_r^{emitido}$	fluxo de calor por emissão radioativa $[\frac{J}{m^2 s}]$
ϵ	emissividade radioativa
h_{SB}	constante de Stefan-Boltzman $[\frac{J}{m^2 K^4}]$
\aleph_r^{negro}	calor absorvido por um corpo negro $[\frac{J}{m^2 s}]$
β	coeficiente de absorção radioativa
Θ^j	temperatura do material j $[K]$
d^j	condutibilidade do material j $[\frac{J}{m s K}]$

Ω_1	subdomínio com material 1
Ω_2	subdomínio com material 2
Q_b	taxa de geração de calor por unidade de volume em Ω [J/s]
α	difusividade térmica do material de Ω [m^2/s]
ρ	massa específica [$\frac{kg}{m^3}$]
c	calor específico do material [$\frac{J}{kg K}$]
t	variável tempo [s]
$\Theta^o(\mathbf{x}, t)$	temperaturas iniciais [K]
w_i	funções de ponderação
N_i	funções de discretização ou de tentativa
C^1	classe de funções contínuas com sua primeira derivada contínua
C^{-1}	classe de funções descontínuas
C^o	classe de funções contínuas
$\{0, \mathbf{x}\}$	Sistema de Coordenadas Cartesianas
ρ_0	densidade inicial de massa ($t = 0$)
$\rho(t)$	densidade instantânea de massa no momento t
$\varepsilon^{(1)}$	deformações de origem térmica
$\varepsilon^{(2)}$	deformações de origem estrutural
δ_{ij}	Delta de Kronecker
ε^{el}	deformação elástica
ε^{pl}	deformação plástica
ε^{cr}	deformação lenta - <i>creeping</i>
ε^{sw}	deformação inchamento - <i>swelling</i>
G	módulo de cisalhamento
S_{ij}	componentes do tensor de tensões
ν	coeficiente de Poisson
I_1	primeiro invariante do tensor de tensões

e	primeiro invariante do tensor de deformações
W_{el}	potencial elástico
x_j	direções dos sistema de coordenadas ortogonais cartesiano
E_Y	módulo de Young
u_i	vetor de deslocamentos
\bar{u}_i	solução para a Equação Generalizada de Navier homogênea
\bar{u}_i	solução particular para a Equação Generalizada de Navier
${}^t\Theta_e^i$	temperatura no instante t , no nó i e no elemento e
N_i^e	funções de forma do nó i e no elemento e
A^T	indica a matriz transposta de A
$\{v\}$	vetor transporte de massa por calor [m/s]
$\{L\}$	operador diferencial de vetor
\mathbf{n}_e	o versor normal apontando para fora do elemento
Ω_e	volume do elemento
$\delta\Theta$	temperatura virtual permissível [K]
$\{S\}$	vetor de tensões
$[D]$	matriz elasticidade
$\{\varepsilon^{el}\}$	vetor de deformação total
$\{\varepsilon^{th}\}$	vetor de deformação total
Θ_{ref}	temperatura de referência do material [K]
$[D]^{-1}$	matriz de flexibilidade
E_i	módulo de Young na direção i
ν_{12}	coeficiente de Poisson
ν_{21}	coeficiente de Poisson
G_{12}	módulo de cisalhamento no plano 12
$[B]$	é a matriz de relação entre deslocamento e deformação
$\{w_n\}$	movimento normal à superfície

$area_f$	área da resistência distribuída
k	elasticidade por unidade de área [N/m^2]
$\{w\}$	vetor deslocamento
$\{F^a\}$	vetor força resultante
$\{N\}$	matriz de funções de forma do elemento
$\{P\}$	pressão sobre a superfície do elemento
$area_p$	área na superfície do elemento sobre a qual atua a pressão
$\{F_e^n\}$	vetor de forças aplicadas nos nós dos elementos
$[K_e]$	matriz de rigidez do elemento
$[K_e^f]$	matriz de rigidez da base do elemento
$\{u\}$	vetor deslocamento nodal
$\{F_e^{th}\}$	vetor de carregamento térmico do elemento
$[M_e]$	matriz de massa do elemento
$\{\ddot{u}\}$	vetor aceleração
$\{F_e^{pr}\}$	vetor pressão aplicada ao elemento
$\{F_e^{nd}\}$	forças nodais aplicadas no elemento
Kp	<i>Keypoint</i>
ε_i^e	emissividade eficaz da superfície i
F_{ij}	Fatores da vista da radiação entre as superfícies i e j
A_i	área da superfície i
N_r^i	perda de energia por radiação na superfície i

Resumo

Este trabalho desenvolve uma metodologia de análise termo-estrutural bidimensional de estruturas executadas em camadas através de uma técnica de modelagem em um programa de elementos finitos, ANSYS ®, denominada *Birth & Death*. A metodologia é aplicada em estruturas simplificadas, já modeladas e em outras que foram monitoradas, como a seção transversal do Bloco B-08 da usina hidrelétrica de Salto Caxias. Os resultados das análises térmicas dessa metodologia são apresentados e confrontados com os resultados de outros trabalhos, validando a técnica desenvolvida. Para a análise termo-estrutural, são avaliados os efeitos dos carregamentos obtidos da análise térmica e do peso próprio da estrutura. Outros fatores (temperatura do concreto lançado, do ar envolto, da altura das camadas, do intervalo entre lançamento de camadas, do peso próprio) foram parametrizados para se avaliar seus efeitos tanto nos resultados da análise térmica como na da termo-estrutural para alguns pontos previamente selecionados.

Palavras-chave: Análise Termo-estrutural; Concreto Compactado com Rolo; Método dos Elementos Finitos.

Abstract

This work develops a methodology of bidimensional thermal-mechanical analysis of structures executed in layers through a modeling technique in a finite elements program, ANSYS ®, called *Birth & Death*. The methodology is applied in simplified structures, structures already analyzed and instrumented ones as the partial section of the B-08 Block in Salto Caxias Dam. The results of the thermal analyses of this comparison are presented and collated with the results of other works, validating the developed technique. Thermal and gravitational loads are evaluated to the thermal-structural analysis. Some variables (like concrete temperature, air temperature, layer thickness, time step of casting layers) are parametrized to validate its effects, in the thermal analysis and the thermal-structural analysis. The results of the therm-structural analysis are listed and a little set of parametric analysis for some points is appreciated.

Key-words: Thermo-structural Analysis ; Rolled Compacted Concrete; Finite Element Method.

1 INTRODUÇÃO

Em vista da política energética do país no início desta década segundo Ministério de Minas e Energia (2003a) houve a necessidade de se construir novas barragens. Para isso, seria interessante empregar técnicas construtivas que possam acelerar o processo de instalação de usinas.

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; os blocos são concretados em camadas espessas com altura na ordem de 2.50m, lançados a intervalos de tempo relativamente grandes, de 7 a 15 dias, e adensadas por vibradores de imersão (KRÜGER, 2001). Esse processo apesar de ser o método mais empregado para a construção das Usinas Hidrelétricas (UHEs) instaladas no País necessita de alternativas para reduzir seus custos e prazos.

Para se construir barragens de concreto de forma rápida e econômica, em relação às aquelas construídas pelos métodos convencionais, mantendo-se os requisitos de projeto como integridade estrutural, estanqueidade e durabilidade, surge a técnica do concreto compactado com rolo (CCR). Nesta técnica, o lançamento do concreto é feito em camadas finas e extensas ao longo da seção longitudinal da barragem. Em geral, a espessura da camada de concreto varia entre 30 e 50 centímetros (HANSEN; REINHARDT, 2000).

Em barragens construídas com CCR a velocidade de construção é acelerada por técnicas construtivas e de cura adequadas. Basicamente, o processo é semelhante ao adotado nas barragens de terra, com equipamentos de pavimentação e materiais comuns que constituem o concreto LACERDA et al. (2003).

Um dos fatores observados na construção convencional é que as grandes massas de concreto possuem grandes gradientes de temperatura devido às condições de contorno e à geração de calor de hidratação do cimento. Os gradientes de temperatura geram deformações que não devem ser desprezadas numa análise estrutural. A partir desta constatação, acredita-se que o campo de temperaturas em estruturas com CCR tem a

mesma propensão das estruturas convencionais no que tange as causas das patologias estruturais.

O controle de qualidade inerente à estruturas de CCR é assunto de maior interesse, uma vez que a durabilidade e a funcionalidade da estrutura são fortemente afetadas por danos indesejáveis, como a formação de fissuras em concretos recém-aplicados associadas primeiramente com efeitos térmicos e de contração ocorridos nas primeiras idades.¹

Uma das grandes dificuldades enfrentadas ao se analisar estruturas executadas com CCR é a definição de um modelo estrutural para se determinarem quais os fatores mais influentes em seu comportamento, tanto nas primeiras idades, como nos períodos consecutivos. Nesse ponto, é essencial se apresentar algumas das dificuldades encontradas na modelagem e que obscurecem a determinação dos parâmetros de relevância do modelo, por inserirem tanto não-linearidades térmicas como estruturais. Abaixo são citadas algumas delas:

- a deposição das camadas de concreto pode ser compassada (com intervalo de tempo constante) ou irregular no que diz respeito ao tempo e a espessura das camadas;
- a geração de calor de hidratação para cada camada ocorre defasada da anterior conforme o cronograma e processo de construção;
- o instante de lançamento (de manhã, de tarde, de noite) que interfere na velocidade de hidratação do cimento;
- a estação climática do instante de lançamento (das chuvas, das secas, de frio, de calor, da insolação);
- a duração da obra, por percorrer mais de uma das estações supracitadas;
- as etapas construtivas, por poder levar em consideração períodos em que a deposição é interrompida devido ao cronograma estabelecido (ocorrência do galgamento², por exemplo);

¹Ainda hoje não se tem uma definição clara de quanto é o período denominado primeiras idades. O que se tem aceito é que este período é de 1 a 2 dias quando se deseja apenas ter um tempo majorado para que determinadas propriedades (taxa de crescimento da resistência, por exemplo) tenham atingido valores pré-estabelecidos. Uma forma mais clara seria acompanhar o grau de hidratação da mistura a se determinar, apesar de não ser uma grandeza fácil de se obter em um canteiro de obras.

²galgamento, é um termo não definido segundo os dicionários Aurélio (FERREIRA, A. B. de H..DICIONÁRIO AURÉLIO ELETRÔNICO SÉCULO XXI. São Paulo: Lexikon Informatica, versão 3.0, Novembro 1999.) e Universal (<http://www.priberam.pt/dlpo/dlpo.aspx>), neste caso, é adoção de vertedouro livre central para a extravasão do volume de água no período das chuvas ou cheias durante o período construtivo

- a ordem e a seqüência da deposição do concreto nas praças da obra;
- a utilização de fôrmas de madeira, ou de compensado ou de estruturas metálicas móveis;
- a uniformidade e homogenia das misturas de concreto utilizadas;
- os artifícios utilizados para se formarem as galerias, as juntas de dilatação e as trincas induzidas na estrutura;
- a utilização de uma superfície de preparação que antecede cada camada de concreto lançada.

Para que se possa elaborar um modelo que reproduza as principais características da técnica do CCR possa ser elaborado, tendo em vista a durabilidade e a estabilidade dimensional da estrutura, é indispensável se assumir alguns critérios de orientação geral, resumidos em três itens citados abaixo:

- ter um monitoramento na construção e na operação da barragem para se acompanhar as especificações pré-estabelecidas em projeto. Determinar quais as grandezas de interesse e manter um registro regular e periódico para se calibrar o modelo computacional confeccionado. Esta busca pelos parâmetros de importância ou de sua calibração é denominada de retro-análise. Esta técnica consiste em a partir de dados e resultados de projetos similares é efetuado o desenvolvimento do modelo físico computacional, e com os dados de monitoramento de sua construção são feitos ajustes nos parâmetros de projetos ³;
- estabelecer uma metodologia para implementar o modelo escolhido;
- compor um conjunto de análises teóricas, bi(2D) e tridimensionais (3D), para se avaliar a exatidão e a precisão do modelo. Aplicar algumas hipóteses simplificadoras para se diminuir o trabalho computacional e confirmar se comprometem ou não a análise da estrutura;

³por exemplo, BADR (2004) utilizou esta metodologia na escolha de parâmetros em modelos matemáticos do material de pilares de longas paredes em estruturas de mineração através da avaliação de 38 estudos de caso e do acompanhamento de uma construção em andamento. A construção destes pilares ainda é feito segundo a experiência dos projetistas não se tendo nenhuma metodologia ou critério de engenharia para se avaliar o desempenho ou aprimoramento do projeto, e seu trabalho é um passo na caracterização de materiais empregados nessas estruturas.

Em virtude disso é desejável que haja acompanhamento de construções de estruturas com CCR e que seja previsto um monitoramento para fornecer um conjunto de dados com periodicidade regular, com confiabilidade e exatidão, e de acordo com o interesse e profundidade de abordagem nas modelagens e análises a serem efetuadas. Devido ao número reduzido de estruturas com CCR monitoradas é essencial, nessas primeiras abordagens, estabelecer modelos de caráter geral que permitam ajustes simples e rápidos sem implicar em retrabalho nos modelos e análises já estabelecidos. Acredita-se que essa forma de trabalho possa ser feita através da parametrização de um modelo computacional.

O presente trabalho procura instituir uma metodologia para um modelo paramétrico bidimensional aplicado a estruturas realizadas por deposição de camadas, em particular às barragens de gravidade construídas com CCR. Optou-se por um modelo 2D ao invés do 3D para se avaliar a carga computacional por ser mais simples investigar a influência dos vários parâmetros envolvidos.

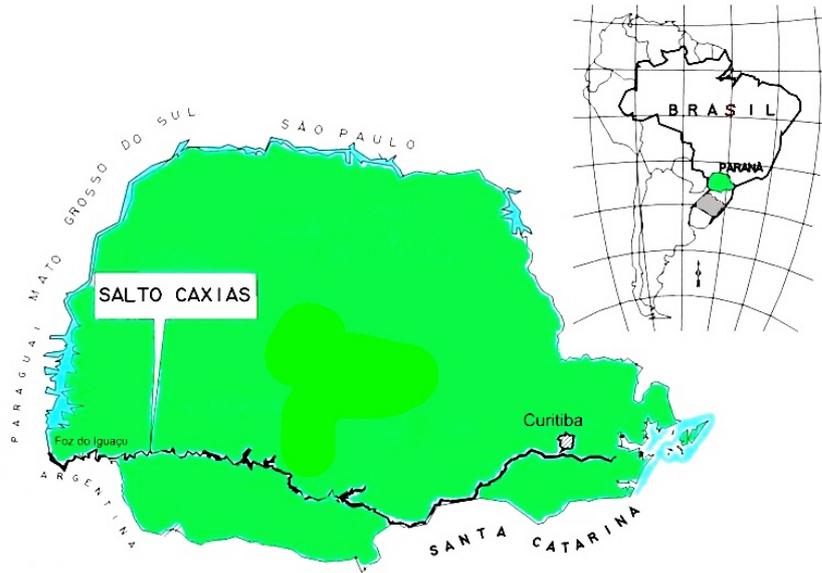
1.1 CONTEXTO DO TRABALHO

Com o intuito de se iniciar tal modelagem, a Companhia Paranaense de Energia Elétrica, COPEL, em parceria com o Instituto LACTEC e a Universidade Federal do Paraná, UFPR, deram início ao projeto: 'APLICAÇÃO DE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO TERMO-ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE CONCRETO E CONJUGAÇÃO COM INSTRUMENTAÇÃO'

A barragem de Salto Caxias foi escolhida para o desenvolvimento e aplicação da metodologia de análise termo estrutural. Alguns dos aspectos que justificam a escolha da Usina Hidroelétrica de Salto Caxias são citados a seguir:

- Sistema de instrumentação automatizado operante, com um banco de dados disponível e uma vasta quantidade de dados de temperatura dos concretos, piezometria, extensometria, vazões de percolação, etc;
- Acesso à documentação existente sobre o controle de execução da obra; dados de projeto da obra e de instrumentação;
- Necessidade de estudos mais aprofundados das causas da fissuração existente.

Figura 1: Localização da UHE de Salto Caxias



Fonte: Adaptado de (KRÜGER et al., 2003b) e de (COMPANHIALÉTRICA - CEEE, 2003), respectivamente.

1.1.1 Grandeza Monitorada

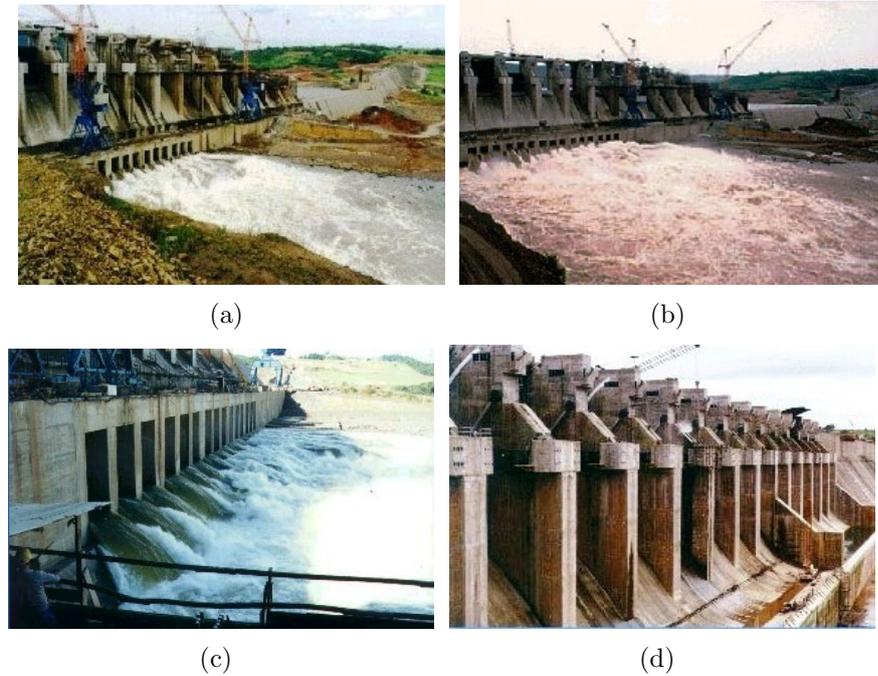
Uma das grandezas monitoradas de interesse é a temperatura do concreto, cuja evolução é proveniente da geração de calor devido à hidratação do aglomerante e das trocas de calor com o meio ambiente. Através da instalação de uma rede de termômetros embutidos no concreto ou junto aos paramentos exteriores da barragem é possível se observar em pontos isolados o desenvolvimento do campo de temperaturas. Aqueles instalados junto à face de montante servem após a fase de enchimento do reservatório, para a observação da temperatura da água do lago, a diferentes profundidades. No momento da instrumentação deve-se procurar instalar termômetros (permanentes) nos blocos e preferencialmente dotados de pêndulos diretos, objetivando a determinação dos gradientes térmicos entre os paramentos de montante e jusante da barragem, provocados pelos ciclos térmicos anuais, de modo a possibilitar a determinação de sua influência nos deslocamentos horizontais da crista da barragem durante o período operacional.

1.2 UHE SALTO CAXIAS

A Usina Hidroelétrica de Salto Caxias, da Companhia Paranaense de Energia, COPEL, localizado no Rio Iguaçu, como apresentado na Figura 1 a sua localização geográfica. É a maior UHE da América do Sul construída com concreto compactado com

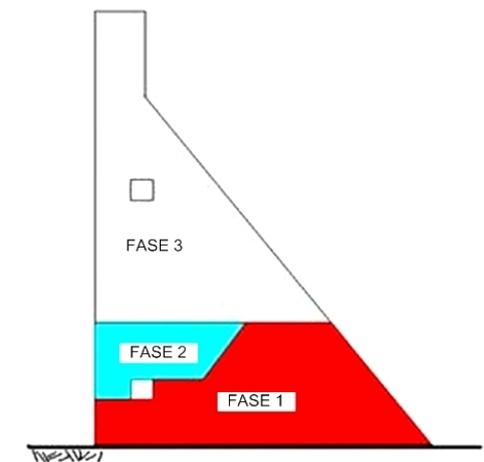
rolo, CCR, e é considerada a 8ª barragem em volume no mundo. Algumas de suas características se encontram na Tabela 1 e algumas fotos da evolução da construção do vertedouro e tendo ao fundo as estruturas com CCR são mostradas nas Figuras 2 a,b,c e d.

Figura 2: Vertedouro da UHE Salto Caxias - vistas parciais da barragem.



Fonte: (INTERTECHNE, 2003)

Figura 3: Fases construtivas da seção do BLOCO B08 da barragem.



Fonte: (KRÜGER et al., 2003b)

Como o foco deste trabalho está na avaliação das tensões de origem térmica que ocorrem durante o período construtivo, é importante conhecer algumas características do

Tabela 1: UHE Salto Caxias - Alguns dados técnicos

potência local do Projeto	1,240 GW
objetivo do Projeto	Rio Iguaçu - PR, Brasil
período de Construção	geração de energia elétrica Abril/1992 a Março/1998
Captação e Reservatório	
área de Captação	57.000 km^2
vazão Média Anual	1.246 m^3/s
área do Reservatório	NA Normal 141,40 km^2
volume do Reservatório	NA Normal $3,573 \times 10^9 m^3$
Vertedouro	
tipo	Superfície controlada, incorporado à barragem
capacidade de descarga	48.300 m^3/s
número de comportas	4
adufas de desvio	15
comportas tipo segmento	14
queda	65,5m
altura máxima da barragem	65m
Casa de Força	
tipo	Abrigada
número de Unidades	4
turbinas	verticais tipo Francis, 4 unidades
Barragem Principal	
tipo	Gravidade, CCR
volume	655.955 m^3
altura Máxima	65 m
comprimento longitudinal	1100,0 m

Fonte: (INTERTECHNE, 2003) e (LEME ENGENHARIA, 2003).

processo construtivo. Supondo que as regras empíricas de construção com concreto, como as descritas por METHA e MONTEIRO (1994), são observadas e praticadas pode-se iniciar a descrição do processo construtivo da estrutura a um nível macro-operacional.

Devido às condições hidrológicas da região, foi estipulado no projeto da barragem de Salto Caxias que algumas de suas estruturas deveriam ser construídas em fases (três), como apresentado na Figura 3, para permitir o galgamento durante a construção apresentado na Figura 4.

Figura 4: Galgamento da estrutura.



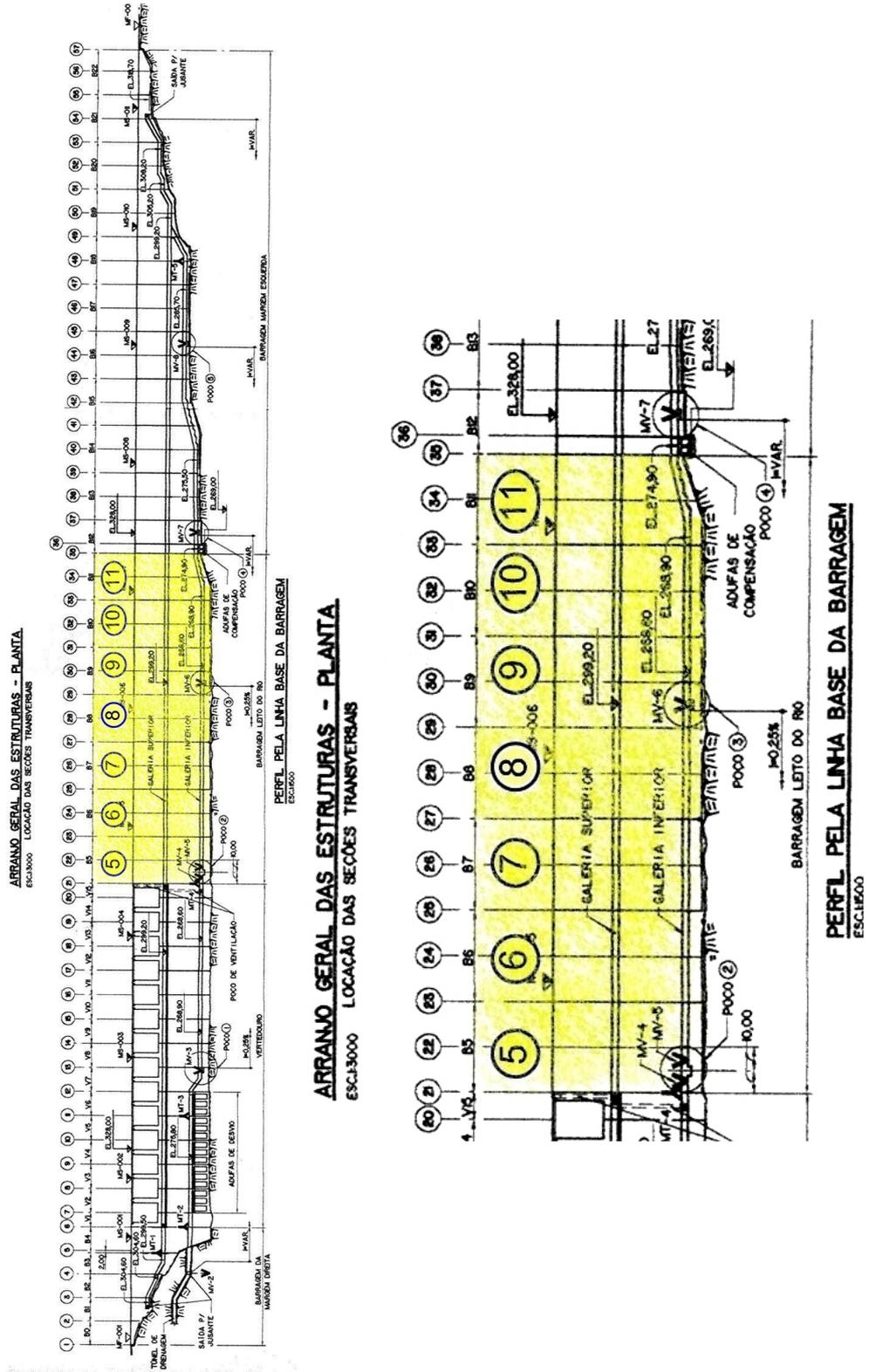
Fonte: Adaptado de (KRÜGER, 2001)

De fato, durante o período construtivo, o galgamento dos blocos 5 a 11 da barragem CCR (destacados na Figura 5) ocorreu diversas vezes após a execução das fases 1 e 2, destacados na Figura 3, com o maior evento ocorrendo em outubro de 1997 com uma vazão de $5.500m^3/s$, como mostram as fotos da Figura 4.

A medida que as camadas de concreto eram depositadas alguns sensores foram posicionados dentro da pasta para que fossem feitas as leituras como as de temperaturas em diversos pontos da barragem. Na Figura 6 está indicada a disposição dos sensores instalados em uma seção do bloco 08 (como apresentado na Figura 5) da barragem.

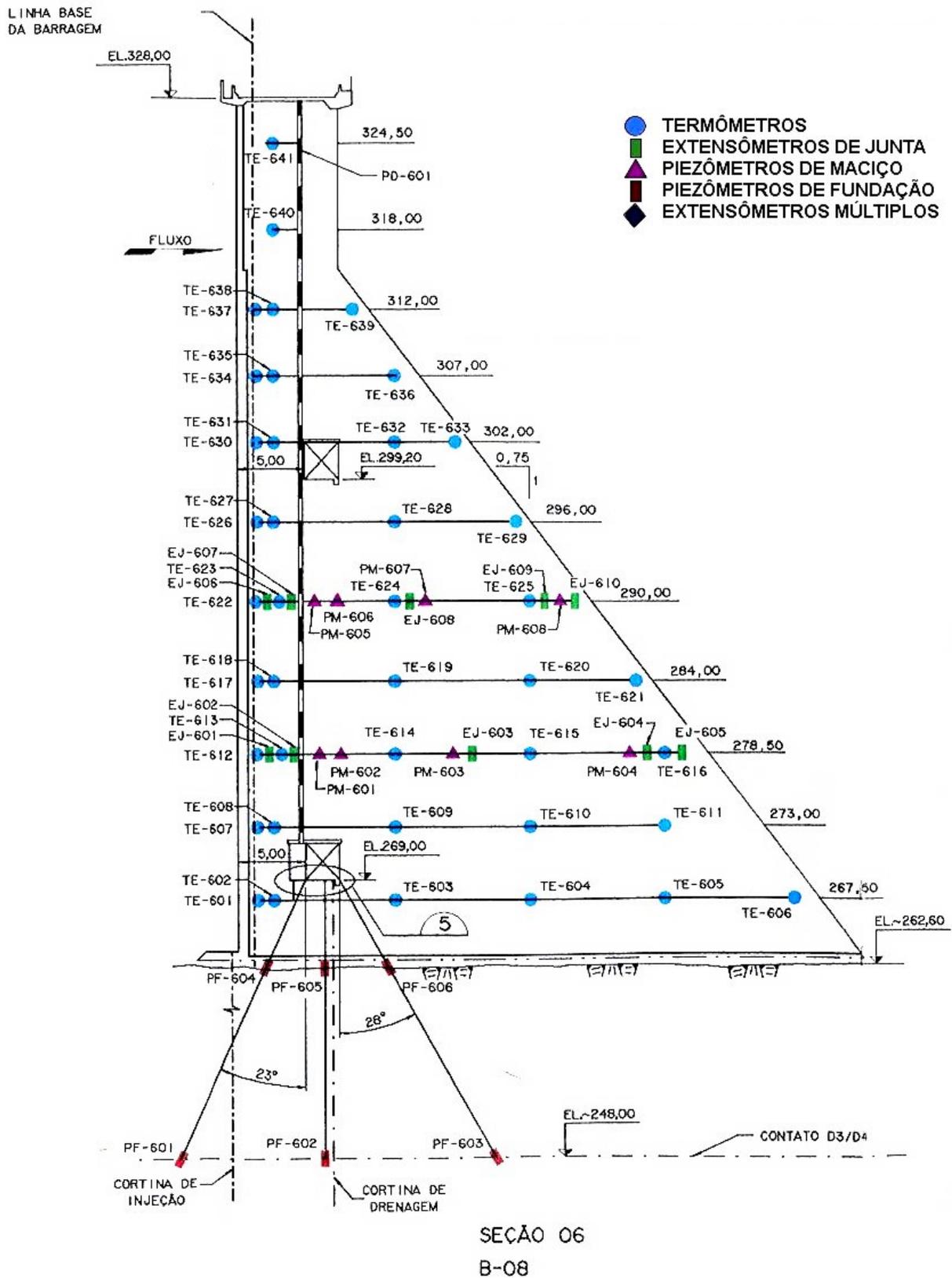
Um grande volume de informações sobre a barragem de Salto Caxias foi analisado com vistas à elaboração dos arquivos de dados para as análises computacionais e para comparação e validação dos resultados numéricos.

Figura 5: Estrutura da barragem com CCR.



Fonte: Adaptado de (KRÜGER, 2001).

Figura 6: Sensores instalados.



Fonte: Adaptado de (KRÜGER et al., 2003b)

1.3 MOTIVAÇÃO E DESAFIOS

Alguns dos fatores que impulsionaram este trabalho foram:

- Desenvolver uma metodologia para análise paramétrica termo-estrutural visando avaliar as diversas alternativas que podem ser empregadas dentro de um processo construtivo de barragens de CCR;
- Utilizar métodos numéricos na busca de soluções e verificação de um modelo envolvendo campos físicos acoplados (térmico-estrutural);
- Ter acesso a dados de temperatura de uma barragem em CCR monitorada durante as fases da construção;
- Utilizar o conceito de geração interna de calor;
- Efetuar uma análise transiente com carregamentos irregularmente espaçados;
- Agrupar vários parâmetros físicos interrelacionados entre si;
- Ser uma etapa para a elaboração de modelos mais complexos e elaborados como a modelagem tridimensional.

Os problemas para se determinar as deformações e distorções de origem térmica são encontrados em outros campos da Engenharia. Por exemplo na Engenharia Mecânica esse tipo de problema é encontrado na produção de peças fundidas e nos processos de resfriamento de plásticos injetados em moldes. Há dificuldades em se determinar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos materiais e sua interdependência da mesma forma que no preparo da massa do concreto.

Um exemplo de análise e modelagem na Engenharia Mecânica empregando-se essa metodologia pode ser encontrado em (ZHU; CHAO, 2002), onde os autores avaliam a dependência das propriedades do alumínio 5052-H32 com a temperatura. Algumas estruturas metálicas na indústria são obtidas através do processo de fundição, que nada mais é do que um processo de aquecimento, moldagem e solidificação de uma liga. A formação de grandes gradientes de temperaturas e a distribuição não linear do campo de temperaturas nos processos de esfriamento e de derretimento causam expansões e contrações não uniformes além de originar deformações plásticas no material.

Devido ao alto grau de complexidade dos processos físicos envolvidos no processo de fundição e devido à capacidade das ferramentas computacionais, os primeiros modelos desenvolvidos eram aplicados em modelos geométricos bidimensionais, assumindo-se vários parâmetros como constantes com a variação de temperatura. Mesmo com o advento de pacotes comerciais de ferramentas de elementos finitos tridimensionais, ainda resta uma lacuna que é determinar a dependência das propriedades dos materiais com a temperatura e com o gradiente de temperaturas. Zhu e Chao (2002) e outros autores citados em seu trabalho sugerem a utilização de uma aproximação multilinear para essas propriedades. Portanto, percebe-se que algumas das técnicas utilizadas neste trabalho podem ser aplicadas e extendidas em outros campos de conhecimento da Engenharia.

1.4 REVISÃO DA LITERATURA

Como foi visto anteriormente, as usinas hidroelétricas apresentam uma forte tendência no cenário energético brasileiro. As barragens podem ser a gravidade, construídas com concreto convencional ou com concreto compactado com rolo (CCR). Nessa Seção são apresentados alguns aspectos construtivos quando utilizado o CCR.

1.4.1 Construção com CCR

Como já dito anteriormente, uma vantagem da aplicação de CCR em relação aos métodos convencionais de construção de concreto convencional é a velocidade da aplicação. O processo, semelhante ao adotado nas barragens de terra, é feito com equipamentos de pavimentação e materiais comuns na elaboração da mistura do concreto, como apresentado na Figura 7a.

Segundo METHA e MONTEIRO (1994), em um resumo das vantagens e desvantagens do uso do CCR podem ser resumidos em:

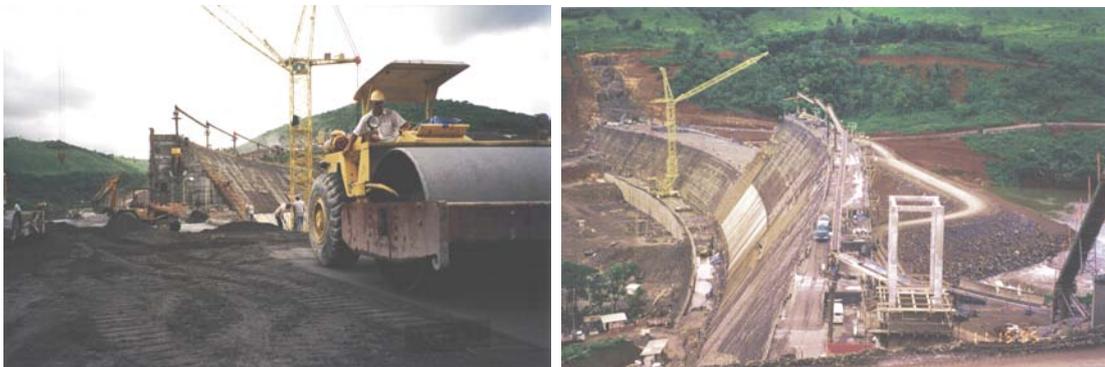
- menor consumo de cimento, por se poder utilizar um concreto muito mais magro ⁴;
- um custo menor devido ao reaproveitamento das formas a medida que as camadas são lançadas;
- tubos de resfriamento são desnecessários, em alguns casos, devido a pequena quantidade de massa de concreto;

⁴com menos cimento

- o período de construção sofre uma considerável redução;

O concreto compactado com rolo difere do convencional principalmente quanto às exigências de consistência; o concreto para compactação com rolo deve estar quase seco para prevenir que o equipamento de rolo vibratório afunde durante o seu uso, e deve estar suficientemente úmido para permitir uma distribuição uniforme e adequada da argamassa através de todo o material durante as operações de vibração e compactação. Nota-se que o fator água cimento neste caso não é o único fator dominante na resistência do concreto como ocorre no concreto convencional. A maior resistência se dá através de uma melhor compactação e a melhor compactação decorre da mistura mais úmida que suporta a vibração e compactação. A massa recém depositada necessita ter aderência com a camada anteriormente lançada, mas por serem massas de concreto em instantes diferentes no processo de cura é difícil se garantir tal aderência. Este problema é contornado hoje através da deposição de uma fina camada de massa de concreto com uma mistura especial, segundo METHA e MONTEIRO (1994).

Figura 7: Maquinário utilizado em CCR



(a) Uso de rolo compactador.

(b) Área de trabalho da construção.

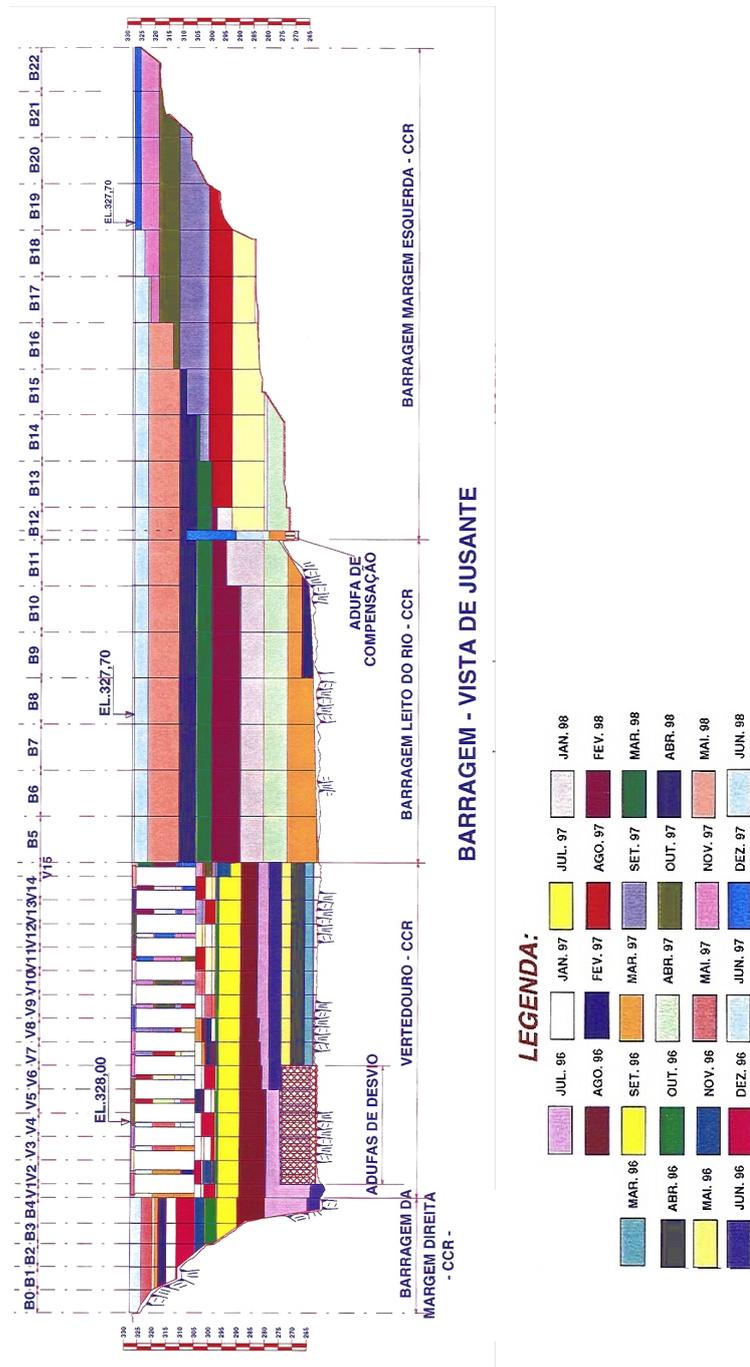
Nota: Adaptado de fotos de D. A. V. Krüger em visita a Barragem da UHE Derivação do Rio Jordão em 15/11/1995.

Na Figura 7b é possível observar a construção da barragem da UHE Derivação do Rio Jordão, em duas fases com diferentes cotas das camadas de concreto. Cada fase tem um cronograma de lançamento de concreto, o que leva a situações particulares em cada seção da barragem.

Observe na Figura 8 que as camadas de cada bloco são depositadas em instantes e com dimensões diferentes, tornando cada seção um caso do problema termo-estrutural.

Este e outros detalhes são abordados nesta seção para caracterizar a complexidade de um modelo numérico mais realista e exato do processo construtivo e mesmo operacional

Figura 8: Cronograma de deposição das camadas de concreto - barragem da UHE Salto Caxias



Fonte: Adaptado de LACERDA et al. (2003)

de uma seção de um bloco de barragem de concreto.

Apesar de se expor estas particularidades separadamente (em efeitos térmico, estrutural e construtivo) há vínculos fortes entre elas que não podem ser facilmente isoladas e por isso considerou-se o efeito predominante em cada caso.

1.4.2 Problema Térmico em Barragens

O concreto para se ter um emprego mais racional e econômico na construção civil, como mencionado anteriormente, necessita ser melhor caracterizado para se conhecer com mais exatidão suas propriedades estruturais que variam ao longo do tempo.

Quando o concreto é preparado, inicia-se um processo de maturação (cura) a qual depende das condições iniciais e de contorno de sua estrutura quando depositado em camadas ou em moldes, além da variação dessas condições ao longo do tempo. Observe na Figura 9 alguns dos fatores térmicos citados por LÉGER e VENTURELLI (1993) e que apenas 2 deles não são aplicáveis, em geral, no caso de barragens brasileiras: neve e gelo.

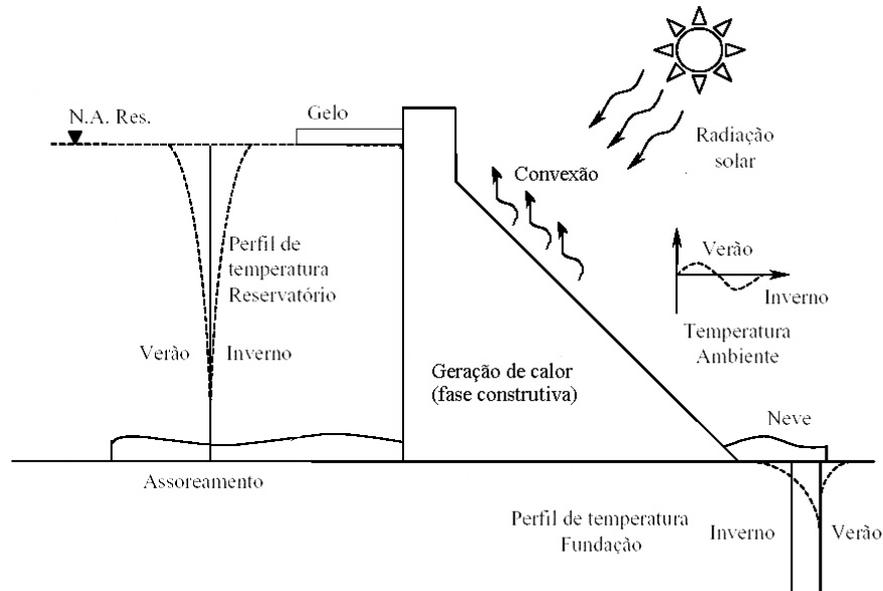
Em sua forma granular o cimento reage com a água (processo denominado hidratação) numa reação exotérmica com geração de calor. A Figura 10 que apresenta a curva da taxa de geração de calor adiabática com amostras do concreto de Salto Caxias ensaiadas nos laboratórios de FURNAS (ANDRADE, 1997). Em grandes volumes de concreto esse processo pode ser considerado como adiabático, segundo CERVERA, FARIA e PRATO (2002), devido ao grande quantidade de massa em relação à área da superfície em contato com o ar, o que restringe a formação de gradientes de temperaturas apenas às regiões mais superficiais da estrutura de concreto. Porém, esta geração de calor não ocorre de modo uniforme em toda estrutura como em trabalhos apresentados por SCHUTTER (2002) e KRÜGER, MACHADO e MARINO (2001) portanto, em deposições de concreto em grandes volumes ou áreas há evolução de gradientes de temperatura como explicado por SCHUTTER (2002), que leva ao aparecimento de tensões internas.

Na literatura é possível se encontrar trabalhos que abordam fatores que modificam a distribuição de temperatura como ISHIKAWA (1991), LÉGER e VENTURELLI (1993), AGULLO, MIRAMBELLAND e AGUADO (1996), CRICHTON (2001), LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996), SAETTA, SCOTTA e VITALIANI (1995), CERVERA, FARIA e PRATO (2002) e KRÜGER (2001). A seguir são apresentados alguns dos fatores que alteram a distribuição de temperatura em barragens considerando-se aspectos climáticos e construtivos.

1.4.3 A Influência de Fatores Climáticos

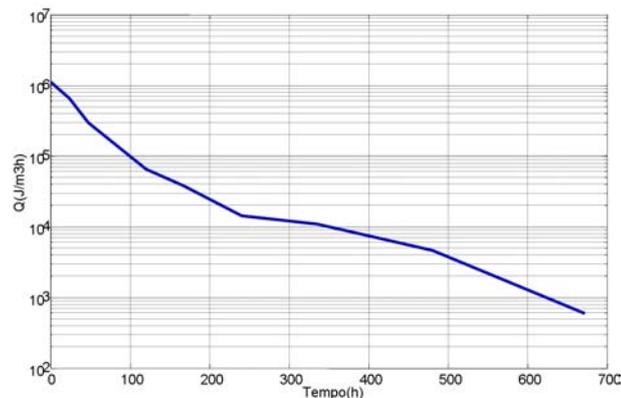
1. **temperaturas nas faces e no interior da barragem:** HAN et al. (2000) fez um estudo da estratificação da temperatura na água de um reservatório e seus efeitos no

Figura 9: Cargas térmicas.



Fonte: Adaptado de (LÉGER; VENTURELLI, 1993)

Figura 10: Calor gerado na hidratação do cimento.



Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 1997)

gradiente de temperatura na face da barragem; o trabalho de KIM, KIM e YANG (2001) apresenta um modelo para um sistema de tubos de refrigeração na estrutura do concreto e seus efeitos na redução no calor de hidratação;

2. **temperatura inicial da mistura de concreto:** ISHIKAWA (1991), em seu modelo termo-mecânico, leva em conta o efeito da temperatura inicial do concreto no modelo elaborado no pacote ADINA (*Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis* (ADINA R & D, 2005)) nas camadas de deposição do concreto; o trabalho de MOURET e BASCOUL (1999) avalia a influência da temperatura inicial na hi-

dratação e na formação de cristais de hidróxido de cálcio (HC) que pode levar à formação de pontos de fragilização; Através de um comparativo entre resultados obtidos pelo exame da microscopia eletrônica de varredura (SEM)⁵ e pelo exame ambiental da microscopia eletrônica de varredura (ESEM). Nesse trabalho, MOURET e BASCOUL (1999) apresenta através de uma avaliação micro-estrutural que o aumento da temperatura (variando de 20 a 50 °C) implica na aceleração da reação de hidratação. O que deveria, a princípio, garantir um aumento da resistência da estrutura, mas a formação difusa de componentes de HC nos espaços intersticiais entre os grãos de cimento e não sobre a superfície dos grãos leva a uma queda na resistência final da mistura.

3. **radiação solar:** HAN et al. (2000) faz uma estimativa de incidência solar através de duas estações meteorológicas próximas a barragem; outro artigo interessante que apesar de se tratar de um problema de solidificação de um material, vale a pena citar, é o trabalho de SARACIBAR, CERVERA e CHIUMENTI (2001) que aplica uma análise termo-mecânica incluindo mudança de fase, considerando todas as propriedades materiais dependentes da distribuição da temperatura. Uma situação muito próxima se comparada com a deposição do concreto em camadas que vão sofrendo um processo de cura estratificada;
4. **nuvens:** HAN et al. (2000) também avaliou a influência de nuvens na região o que afeta a radiação solar, a umidade e a temperatura da água no reservatório; assim a variação da temperatura e da condução térmica das faces da barragem podem ser modeladas com melhor exatidão levando-se em conta estes fatores meteorológicos;
5. **quantidade e distribuição dos agregados:** o agregado é predominantemente responsável pelo módulo de elasticidade e da estabilidade do concreto, além da densidade. A porosidade, textura e forma geométrica dos agregados são fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do concreto, já que estão diretamente relacionados com a fase interfacial entre a massa cimentícia e o agregado (denominada também de zona de transição). Um aumento da zona de transição não afeta a resistência a compressão, pois o cimento e os agregados são os fatores predominantes

⁵Os SEMs convencionais (figura abaixo) requerem condições de alto vácuo no interior da câmara de amostras. Materiais eletricamente não condutores como solo, rocha, concreto ou cerâmica, necessitam ser recobertos por uma camada condutora (metalização). Isto pode mascarar informações e eventualmente destruir feições estruturais delicadas, incapazes de resistirem a condições de alto vácuo. Esta característica dos MEVs convencionais, impede ainda a observação de amostras úmidas, bem como de quaisquer fenômenos ou reações que ocorram na presença de uma fase líquida ou gasosa. ARRAIS, E. M. D.. LIMITAÇÕES DOS MEVS CONVENCIONAIS. Rio Claro:UNESP, 2000. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/MEV2.html>>. Acesso em 11 dez. 2005.

neste caso; já a resistência a tração diminui com o aumento da zona de transição. Portanto misturas com maior quantidade ou com concentração maior de agregados devem, a princípio, levar a elementos estruturais com menor resistência a tração.

6. **uso de aditivos:** as propriedades do concreto fresco como endurecido podem ser alterados a partir do uso de aditivos que permitem alterar várias propriedades como trabalhabilidade, aceitação ou aumento do tempo de pega, controle do desenvolvimento da resistência mecânica, térmica (ação do gelo, fissuração térmica), química (reação álcali-agregado, soluções ácidas e sulfatadas).
7. **sazonalidade climática:** HAN et al. (2000) fez o levantamento durante 3 anos da variação das características da radiação solar, do índice pluviométrico e do vento para implementar em seu modelo térmico-estrutural da barragem de um reservatório; LÉGER e VENTURELLI (1993) sugerem dois tipos de abordagem: uma análise termo-mecânica temporal, na qual os efeitos térmicos e as deformações são acoplados e tratados simultaneamente e, uma análise térmica para se definir uma distribuição de temperatura crítica que pode ser utilizada como carregamento ao modelo de análise estrutural, conforme implementado por KRÜGER (2001).

1.4.4 A Influência de Fatores Construtivos

Alguns detalhes devem ser observados:

1. **quantidade e distribuição de água na mistura:** (SCHUTTER, 2002) utiliza uma variável interna em seu modelo, o grau de hidratação, para justificar as mudanças de comportamento estrutural do concreto com a quantidade de cimento hidratado, com a temperatura da mistura e com a quantidade de água distribuída no concreto granular. CERVERA, FARIA e PRATO (2002) fazem um estudo similar a nível macroscópico analisando e comparando seus resultados com os obtidos numa estrutura monitorada; MOURET e BASCOUL (1999) fazem uma avaliação através de resultados da microscopia por varredura de elétrons (SEM - *Scanning electron microscope* e ESEM - *Environmental scanning electron microscope*);
2. **a seqüência de deposição das camadas na praça de construção:** as camadas de concreto são depositadas conforme a disponibilidade de espaço e manobrabilidade das máquinas de pavimentação em cada etapa;

3. **a geometria da base de cada bloco:** na Figura 8 pode-se notar que existem diferentes cotas para cada um dos blocos da barragem e que foram necessários preparativos que demandam tempo (realçado pelas cores diferentes na base dos blocos) e recursos para adequá-los a deposição das camadas de concreto;
4. **o uso de moldes:** a colocação e seqüência de movimentação das formas são fatores que alteram as condições de transferência de calor para o meio ambiente, e que também podem ser considerados restrições ao movimento da massa de concreto depositado . No caso de Caxias, os moldes de concreto convencional são permanentes, não sendo necessário portanto a operação de desmolde e colocação. O importante nesse caso é levar em conta no modelo de análise as características dessa interface e sua influência nos resultados;
5. **a camada de preparação:** usualmente depositada antes de cada camada de concreto a fim de garantir a solidariedade entre duas camadas consecutivas;
6. **a localização das juntas de contração;**
7. **a localização indutores de trinca em cada bloco(juntas de contração induzida);**
8. **o processo de confecção das galerias de drenagem;**
9. **o efeito térmico das galerias de drenagem sobre as demais camadas recém depositadas;**

Os fatores citados anteriormente tem influência mais acentuada nas primeiras idades do concreto, isto é, há a geração do calor de hidratação, o surgimento de gradientes de temperaturas e a ação das tensões térmicas, enquanto a massa de concreto ainda apresenta características plásticas. Isto favorece o fenômeno da fluência, isto é, a deformação lenta da estrutura enquanto um carregamento é aplicado ao longo do tempo. A dependência da fluência com a temperatura e com o carregamento estrutural, a nível macroscópico, dependem do carregamento e do tempo que a estrutura terá para assimilar essas alterações no caso de carregamento cíclicos. WU e LUNA (2001) apresentam uma metodologia para um modelo 3D que leva em conta o fenômeno da fluência juntamente com a mudança das propriedades do material com a temperatura para se avaliar seus efeitos simultâneos na estrutura. A análise transcorreu para um período equivalente de 300 dias, a variação do campo de temperaturas devido a geração de calor no concreto, considerando-se a perda de calor para o meio externo por condução e o desenvolvimento

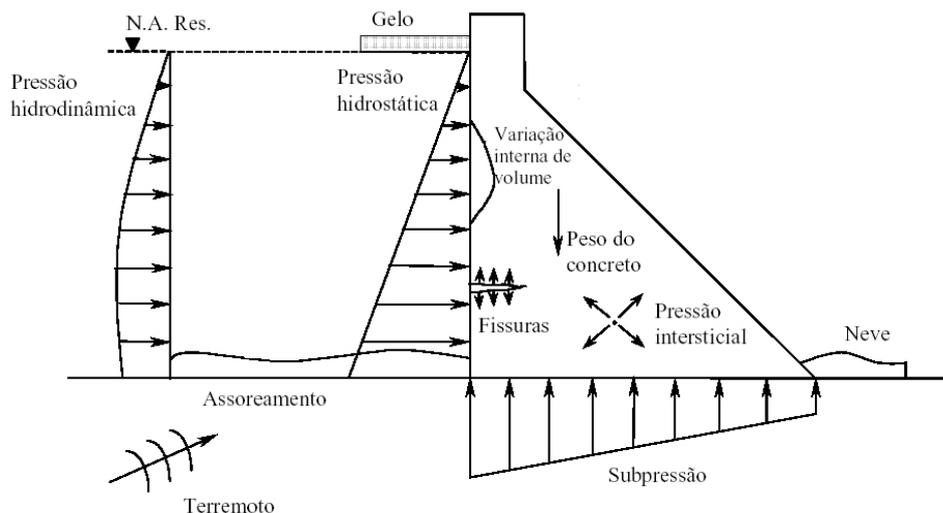
das tensões de origem térmica levando-se em conta o fenômeno da fluência. Observou-se que a tensão máxima de compressão ocorreu no período equivalente ao oitavo dia, e que a partir de então com o resfriamento da estrutura as tensões de compressão passara gradativamente para tensões de tração.

Nota-se que, para modelar as características estruturais do concreto, é necessário se fazer uma análise incremental das propriedades termo-cinético-químicas desde sua deposição até a propagação de trincas ou degradação estrutural. Essas propriedades estão relacionadas entre si e desvincular os efeitos de uma ou outra levaria a um processo de simplificação como estudado em CRICHTON (2001). Mesmo porque, uma análise realista do processo teria um custo computacional elevado como mencionado em HAN et al. (2000), por exemplo.

1.4.5 Problema Estrutural

Este trabalho é um primeiro passo para se estabelecer um modelo tridimensional das tensões de origem térmica em estruturas executadas em camadas. A partir dele se pretende avaliar o nível das tensões e distribuição do campo de temperaturas dentro de uma determinada seção da barragem a partir de um modelo mais 2D mais simples que a proposta pela análise 3D, conforme mencionado no trabalho de CRICHTON (2001).

Figura 11: Carregamento estrutural em barragens



1.4.6 Técnicas Já Empregadas

Excetuando-se a análise convencional de se trabalhar com a seção completa sem considerar as etapas construtivas da barragem (modelo em bloco único), há vários trabalhos como os de BERNARD, ULM e LMARCHAND (2003) que modelam as propriedades elásticas do concreto nas primeiras idades através da análise microestrutural de mecanismos de hidratação do cimento (grau de hidratação); e de ULM e COUSSY (1998) o qual faz o acoplamento de campos químico, térmico e mecânico para se avaliar a evolução das propriedades estruturais do concreto nas primeiras idades (grau de hidratação, cinética de hidratação); e que é utilizada por trabalhos como o de FAIRBAIRN et al. (2004) que emprega os modelos já descritos na otimização de estruturas de concreto executadas em camadas através de algoritmos genéticos.

O trabalho de FAIRBAIRN et al. (2004) que emprega algoritmos genéticos exige um volume grande de trabalho computacional (de 30 a 48 dias para os casos avaliados) o que torna a aplicação da metodologia um processo árduo.

1.5 TRABALHOS PRODUZIDOS

Durante o desenvolvimento da metodologia em camadas foram elaboradas várias publicações que apresentam resultados parciais, acumulativos, e que demonstram a capacidade da técnica elaborada:

(KRÜGER; MACHADO; MARINO, 2003); (LACERDA et al., 2003); (KRÜGER et al., 2003b); (KRÜGER et al., 2003a); (KRÜGER et al., 2004); (KAVAMURA et al., 2004) ; (LACERDA et al., 2005) ; (KRÜGER et al., 2005).

1.6 OBJETIVO

Elaborar uma metodologia de análise bidimensional das tensões de origem térmica em estruturas executadas em camadas utilizando rotinas de programação denominadas APDL(*ANSYS Parametric Development Language*) de um sistema computacional comercial de elementos finitos, ANSYS[®].

Validar essas rotinas implementadas através de testes progressivos em modelos encontrados na literatura, e em resultados experimentais como em um estudo sobre parte da estrutura da casa de força da UHE Serra da Mesa e sobre uma fase construtiva da

barragem da UHE Salto Caxias.

1.7 DESENVOLVIMENTO

O Capítulo 2 descreve o modelo térmico não linear, estrutural linear, o acoplamento dos campos térmico e estrutural.

O uso de Elementos Finitos através de um pacote comercial (ANSYS[®]) torna viável a criação de uma metodologia de análise iniciada com o trabalho de KRÜGER (2001) no qual é implementado o modelamento em camadas através de uma adaptação do recurso *Birth & Death* do ANSYS[®], seguido da contribuição de SILVA (2003) que implementou o acoplamento das análises térmica e estrutural. Os avanços conseguidos com este trabalho são apresentados na Secção 2.5.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia que permite se efetuar análises paramétricas em estruturas com geometrias mais complexas, podendo-se aplicar condições iniciais e de contorno dinâmicas, variar as propriedades dos materiais e se ajustar ao processo construtivo empregado.

Este trabalho optou por uma análise termo-estrutural parcial, sem perder sua generalidade, fazendo-se a validação apenas sobre uma fase construtiva. O que consome uma carga computacional menor (de 12h) se comparada com a análise da construção de toda a secção em questão da barragem (2 a 3 dias) e levando às mesmas conclusões. No Anexo B.2 se encontra a descrição do equipamento utilizado nas análises deste trabalho.

É importante lembrar que este trabalho procura apenas estabelecer uma metodologia de desenvolvimento com elementos finitos em 2D para um futuro trabalho em modelos 3D e, por conseguinte, agregando características elásto-visco-plásticas.

Para se validar tanto o modelo como a metodologia, no Capítulo 4, são apresentadas comparações com estruturas já executadas e monitoradas:

- na viga da estrutura da casa de força da UHE Serra da Mesa;
- na secção do bloco 08 da barragem da UHE Salto Caxias.

Finalmente no Capítulo 5 mostra um conjunto de análises termo-estruturais paramétricas para se conhecer a influência das condições de contorno, das condições iniciais, do processo construtivo e da modelagem nos resultados obtidos através do modelo e metodologia desenvolvidos.

2 Modelagem

A seguinte seqüência será adotada na apresentação deste capítulo: inicialmente serão relacionadas as características do concreto, as hipóteses para simplificar o modelo a ser implementado, as modelagens matemáticas térmica e a termo-estrutural, as respectivas formulações variacionais.

2.1 Características do material

De acordo com METHA e MONTEIRO (1994), é interessante que se contemple no estudo do concreto uma avaliação de sua composição considerando-se o tamanho, a composição química, a forma geométrica, e a distribuição dos agregados na mistura; a quantidade e a distribuição de água na mistura; os espaços vazios (ar) presentes na pasta em processo de cura; e, principalmente, dois períodos de sua formação denominados de *primeiras idades* e os 28 dias subsequentes.

Distintamente de outros materiais, o concreto tem a capacidade de ser empregado em uma variedade de formas e tamanhos. Isto porque o concreto fresco tem uma consistência plástica, o que permite ao material fluir nas formas pré-fabricadas. Após um certo número de horas, quando o concreto se solidifica parcialmente e endurece apresentando uma superfície resistente, as formas podem ser removidas para eventual re-utilização.

A partir do instante que seus componentes (cimento, água, agregados, aditivos, bolhas de ar, entre outros) são misturados para formar a pasta de concreto, inicia-se a reação química de hidratação do cimento. Nesta reação, o concreto muda suas características mecânica-estruturais devido ao processo exotérmico intenso que provoca deformações pela dilatação do material e posterior retração da massa devido a secagem da superfície e o resfriamento do interior. Essas deformações, que geralmente são restringidas, geram um campo de tensões que pode levar à fissuração da estrutura por tração conforme estudos de METHA e MONTEIRO (1994). Essas fissuras são nucleadas na cura e, por isso, é indispensável se ter um acompanhamento rigoroso sobre as variáveis do

processo no período construtivo, para que o comportamento mecânico da estrutura possa ser previsível ante as alterações de projeto que possam vir a ocorrer ¹.

Para se acompanhar um processo é necessário eleger quais os parâmetros a serem monitorados e seus respectivos valores ou tendências, levando-se em conta o grau de influência de cada um deles nos resultados desejados. Desta forma procura-se definir limites ou taxas para estes parâmetros durante o projeto e que devem ser acompanhados durante a fase construtiva.

Como não havia condições tecnológicas ou mesmo a preocupação com o comportamento do concreto nas primeiras idades não há um registro histórico na literatura do acompanhamento das estruturas construídas; e somente em algumas estruturas modernas há casos isolados de um acompanhamento técnico de monitoramento tanto nas fases construtivas como operacionais das barragens. Pelo levantamento feito por METHA e MONTEIRO (1994) pode-se notar o aumento pelo interesse de se caracterizar melhor as estruturas. Usualmente, tomam-se valores médios ou fixos para muitas das propriedades físicas (térmicas, mecânicas e químicas) nas análises termo-estruturais do concreto.

É neste cenário que surge então a importância de se criar modelos estruturais para o concreto em suas várias idades e ter os valores das propriedades que o caracterizem instantânea, precisa e exatamente. Conforme MABRUK, ISHIDA e MAEKAWA (2004) as modelagens nas primeiras idades se subdividem em dois grandes grupos: o grupo que se utiliza de uma variável interna denominada de grau de hidratação (FAIRBAIRN et al., 2004), (SILVOSO, 2002) e (SILVOSO, 2003); e outro grupo que se vale das formulações matemáticas de Maxwell e das cadeias de Kelvin. Há outros modelos que fornecem uma melhor compreensão do processo de cura, mas fornecem um intervalo limitado para predição do comportamento estrutural do concreto e que são citados e apresentados em (MABRUK; ISHIDA; MAEKAWA, 2004).

Existe uma inter-relação entre as propriedades mecânicas estruturais e as condições químico-cinéticas que definem o comportamento estrutural do concreto. Algumas dessas relações foram estabelecidas apenas no final do século passado, mas não levava em conta o período que representa o concreto nas primeiras idades.

O concreto, para atingir a maturidade, depende de muitos fatores e todos eles estão fortemente interligados. Por isso não há uma definição exata que possa ser utilizada na fase de projeto à fase construtiva.

¹Isto também vale para estruturas de concreto armado.(MABRUK; ISHIDA; MAEKAWA, 2004)

As propriedades diferenciadas do concreto dependem de vários fatores dentre as quais podem ser citadas:

- Fator água/cimento (*water/cement - w/c*);
- Quantidade de água retida na pasta;
- Qualidade da água (salgada, salobra, incolor, colorida)
- Umidade do ar durante a cura;
- Temperatura do concreto recém preparado;
- Tamanho, textura, peso e forma dos agregados;
- Porosidade da pasta;
- Tamanho dos poros;
- Permeabilidade da mistura;
- Tempo de cura;
- Velocidade de aplicação das cargas sobre a estrutura recém-lançada²;
- Homogeneidade da mistura;
- Uniformidade da distribuição dos agregados;
- Proporção dos produtos da cura;
- Tipo de cimento;
- Presença de ar incorporado na mistura;
- Grau de adensamento do material;
- Distribuição dos produtos da cura;
- Velocidade da reação de hidratação;
- Exsudação interna³;

²velocidade de deposição das camadas em estruturas CCR.

³formação de filme de água na superfície dos agregados no concreto recém lançado (diminuindo a aderência por cisalhamento na superfície do elemento agregado).

- Orientação dos cristais na superfície dos agregados⁴;
- Pureza e qualidade da água empregada.

Esses fatores se alteram ao longo da hidratação da massa de concreto e definem acumulativamente as características mecânicas da estrutura. As grandes dificuldades de se elaborarem regras para o desenvolvimento de um modelo são :

- a grande inter-relação entre as propriedades físico-químicas e as propriedades *supra* citadas;
- as características construtivas que não padronizadas ou não monitoradas reduzem a reprodutibilidade das características nos sítios de construção;
- as não linearidades geométricas, de comportamento do material e das condições de contorno a serem satisfeitas. A própria dinâmica da construção da estrutura dificulta o isolamento do efeito de cada um dos fatores;
- as características intrínsecas do processo construtivo; como, por exemplo, a seqüência cronológica de lançamento das camadas, a utilização de mantas protetoras e isolantes térmicas para proteger contra intempéries e contra baixas temperaturas como o que ocorre em algumas regiões nórdicas;
- a caracterização dos agregados empregados em cada mistura/fase, que podem formar micro-estruturas que afetem o comportamento macroestrutural.

Em (METHA; MONTEIRO, 1994) é abordado detalhadamente como estes fatores influenciam na resistência do concreto.

2.2 Simplificações na modelagem

Como um dos objetivos deste trabalho é elaborar uma metodologia simplificada para estruturas executadas em camadas, algumas hipóteses foram assumidas para reduzir o trabalho computacional. A primeira e mais importante delas é o desacoplamento do campo térmico com o estrutural, o que permite que o modelo trabalhe com a análise térmica transiente e com a análise estrutural estática multilinear. A análise térmica

⁴estringita e dos hidróxidos de cálcio J.C. Maso, *proceedings of Seventh International Congress on the Chemistry of Cements*, V1, Editions Septima, Paris, 1980. In: METHA, P.; MONTEIRO, P. *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

transiente permite estabelecer a geração de calor devido à hidratação do cimento na massa de concreto, enquanto que a análise estrutural estática linear permite verificar o efeito do carregamento térmico sobre a estrutura. Como este trabalho envolve um material com características muito peculiares, o concreto, optou-se por atualizar seu módulo de elasticidade após cada análise térmica permitindo assim obter resultados estruturais mais coerentes nas primeiras idades.

A seguir, relacionam-se as principais simplificações adotadas:

- na análise térmica, assume-se:
 - Temperaturas médias para os períodos entre lançamento de camadas;
 - Desconsidera-se qualquer influência:
 - * de diferenças na cinética química de hidratação na superfície e no interior das camadas;
 - * da insolação na temperatura superficial;
 - * da amplitude térmica diária;
 - * da umidade do ar na reação de hidratação e no campo de temperaturas;
 - * das variações das propriedades térmicas dos constituintes da massa;
 - * da mudança de fase da mistura de concreto antes e durante a cura;
 - * da perda de massa (absorção ou evaporação da água);
 - * das chuvas e de ventos no campo de temperaturas;
 - * das variações bruscas de temperaturas ⁵;
 - * das deformações súbitas de origem térmica;
 - O campo de temperaturas é obtido a partir da equação de Fourier;
- nas análises estruturais, considera-se:
 - Materiais elásticos multilineares: como uma aproximação para a mudança do comportamento visco-plástico do cimento durante a sua cura;
 - Materiais incompressíveis;
 - Materiais homogêneos e isotrópicos para o concreto;
 - Materiais homogêneos e isotrópicos para o solo da fundação;

⁵Decorrentes de fatores como os de fenômenos meteorológicos (chuvas e rajadas de vento) ou construtivos (lançamento de novas camadas sobre a camadas em processo de cura)

- Estado plano de deformações: considera-se que tanto a geometria como o carregamento podem desprezar quaisquer particularidades como a presença de juntas de contração, de indutores de juntas de contração, de galerias; e que a fundação interfere no campo de deformações e de temperaturas.
- Pequenas deformações e pequenos deslocamentos;
- quanto aos aspectos construtivos, considera-se:
 - As camadas:
 - * são depositadas instantaneamente;
 - * possuem propriedades térmicas e estruturais homogêneas. Pelo fato de cada camada ser executada em etapas para se cobrir grandes extensões durante a deposição, há grande probabilidade das propriedades estruturais e térmicas não serem as mesmas num dado momento; Apesar de que a defasagem de tempo entre as etapas ser maior para as camadas da base que as camadas do topo da estrutura da barragem;
 - * possuem as mesmas propriedades estruturais entre si, há apenas uma defasagem de tempo igual ao intervalo entre lançamentos sucessivos;
 - O processo de preparação que consiste na aplicação de uma massa entre as camadas não interfere nas propriedades termo-estruturais; seja essa massa a argamassa de ligação ou de regularização;
 - A movimentação de equipamentos não interfere nas características estruturais da camada de concreto lançada. Desprezam-se os efeitos dos caminhões basculantes como os apresentados nas Figuras 12a e b, que tem tara superiores a 30 toneladas. Pode-se reparar que as camadas de concreto lançadas na Figura 12b possuem depressões devido ao tráfego de equipamentos;

Figura 12: Equipamentos utilizados em CCR - Upper Still Water



Fonte: Adaptado de (Malcolm Dunstan & Associates CONSULTING AND ENGINEERING, 2003)

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA - TÉRMICA

O campo de temperaturas em um corpo (meio) é um dos fatores que determina o fluxo de calor em seu interior, da mesma forma que a diferença de temperaturas entre dois corpos e as condições de contorno envolvidas definem a troca de calor entre eles. Para se estabelecer o modelo matemático desta distribuição é necessário expor o fenômeno de fluxo de calor em suas partes mais elementares: condução; convecção, radiação. A partir das equações diferenciais de cada uma destas partes é possível se compreender como o fenômeno real se processa a começar da combinação dos efeitos de seus componentes. Assim, obter o modelo térmico de um corpo é deduzir as equações diferenciais e aplicar as condições de contorno e iniciais para determinar o campo de temperaturas na superfície e no interior do corpo.

2.3.1 Condução, Convecção e Irradiação de Calor

Considere um corpo, B , que ocupa uma região Ω do espaço euclidiano tridimensional, região essa limitada por uma superfície Γ , onde as condições de contorno são conhecidas. O campo de temperaturas $\Theta(\mathbf{x})$ e o fluxo de calor \aleph no contorno Γ são componentes importantes que fazem parte da determinação do fluxo de calor q por unidade de área em Ω . Para melhor estabelecer as condições de contorno e a superfície Γ é subdividida em dois subdomínios (vide Figura 13):

$$\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$$

onde:

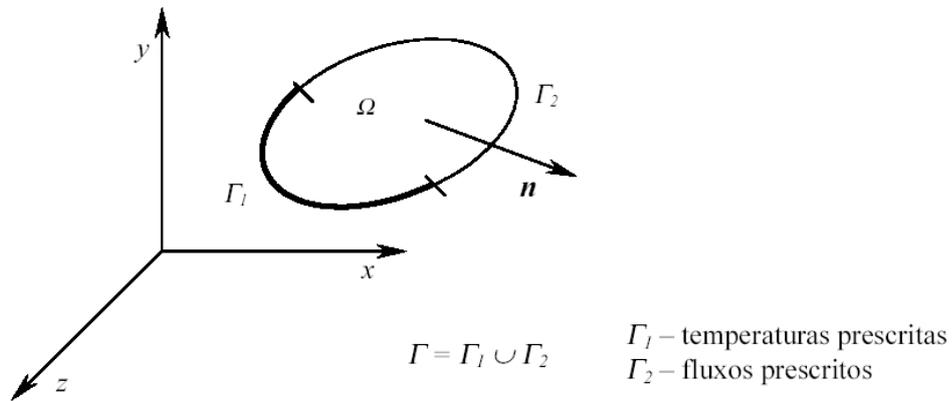
- $\Gamma_1 \cap \Gamma_2 = \{\}$, onde: $\{\}$ representa o conjunto vazio;
- em Γ_1 , há temperatura é prescrita;
- em Γ_2 , o fluxo de calor é prescrito.

Assim em Γ_1 , $\Theta^*(\mathbf{x}, t)$ é a temperatura prescrita, ou seja:

$$\Theta = \Theta^*(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \Gamma_1 \tag{2.1}$$

e ainda:

Figura 13: Condições de contorno.



Nota: Esta figura é apresentada em (KRÜGER, 2001) p. 31.

\aleph_1 , o fluxo de calor não prescrito em Γ_1

\aleph_2 , o fluxo de calor em Γ_1 , prescrito.

Na literatura sobre transferência de calor, como trabalhos de PARKUS (1976), LIENHARD IV e LIENHARD V (2004), SIEGAL e HOWELL (1981), P. INCROPERA e DeWITT (2002) e LEWIS et al. (1996), são apresentadas as leis e modelos que definem o fluxo de calor e o campo de temperaturas em corpos sob determinadas condições de contorno. Uma das leis importantes para se definir o campo de temperaturas é a Lei de Fourier de condução de calor, que se preocupa apenas com o fluxo de calor em caso estado estacionário das temperaturas.

$$q = -d \frac{\partial \Theta}{\partial \mathbf{n}} = -d(\nabla \Theta) \cdot \mathbf{n} = -d(\Theta, \mathbf{n}), \forall \mathbf{x} \in \Omega \quad (2.2)$$

onde:

\mathbf{n} - versor gradiente de temperatura;

q - fluxo de calor por unidade de área nos pontos de Ω ;

d - representa a condutividade térmica do material, neste caso isotrópico; no caso de meio anisotrópico é necessário se considerar o tensor de condutividade térmica \mathbf{D} ;

A Equação 2.2 mostra que o fluxo de calor ocorre no mesmo sentido de queda da temperatura em Ω .

Na superfície Γ_1 , o fluxo de calor \aleph_1 é descrito em duas parcelas:

$$\aleph_1 = \aleph_c(\mathbf{x}, t) + \aleph_r(\mathbf{x}, t), \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1 \quad (2.3)$$

onde:

\aleph_c - representa o fluxo de calor convectivo, na parte ${}^1\Gamma_1$ de Γ_1 ;

\aleph_r - representa o fluxo de calor radioativo, na parte ${}^2\Gamma_1$ de Γ_1 ;

Sendo que a condição que ${}^1\Gamma_1$ e ${}^2\Gamma_1$ devem satisfazer é que ${}^1\Gamma_1 \cup {}^2\Gamma_1 = \Gamma_1$.

As duas parcelas, \aleph_c e \aleph_r , são obtidas da seguinte forma:

\aleph_c - o fluxo de calor convectivo :

$$\aleph_c = h_f(\Theta - \Theta_\infty) \quad (2.4)$$

h_f é o coeficiente de transferência de calor no contorno;

Θ_∞ é a temperatura ambiente em torno de Γ_1 ;

$$\aleph_r - \text{fluxo de calor radioativo: } \aleph_r = \aleph_r^{absorvido} - \aleph_r^{emitido} \quad (2.5)$$

$\aleph_r^{emitido}$ - fluxo de calor por emissão radioativa é estabelecido de forma simplificada pela Equação 2.6 ⁶:

$$\aleph_r^{emitido} = \epsilon h_{SB}(\Theta^4 - \Theta_\infty^4) \quad (2.6)$$

ϵ - emissividade, que indica a relação entre o calor emitido pelo contorno e por um corpo negro a mesma temperatura;

h_{SB} - constante de Stefan-Boltzman = $5.67 \times 10^{-8} \frac{J}{m^2 K^4}$;

Θ_∞ - temperatura do meio em torno de Γ_1 .

$\aleph_r^{absorvido}$ - fluxo de calor por absorção radioativa: ser for por absorção radioativa, considere o coeficiente de absorção radioativo, da seguinte forma:

$$\aleph_r^{absorvido} = \beta \aleph_r^{negro} \quad (2.7)$$

\aleph_r^{negro} - calor absorvido por um corpo negro pela incidência de radiação;

$\aleph_r^{absorvido}$ - calor absorvido por um corpo real; e

⁶Um desenvolvimento mais completo pode ser encontrado nos trabalhos de transferência de calor já mencionados. Uma transcrição de ANSYS (2001) está no Anexo B.4

β - coeficiente de absorção.

Deste modo a Equação 2.3 é re-escrita como:

$$\aleph_1 = \aleph_c(\mathbf{x}, t) - \aleph_r^{emitido}(\mathbf{x}, t) + \aleph_r^{aborvido}(\mathbf{x}, t), \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1, t > 0 \quad (2.8)$$

Assim, para o caso estacionário e material homogêneo, isotrópico as equações de fluxo de calor: 2.1, 2.2 e 2.8 podem ser re-escritas como:

$$\Theta = \Theta^*(\mathbf{x}, t), \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1, t > 0 \quad (2.1)$$

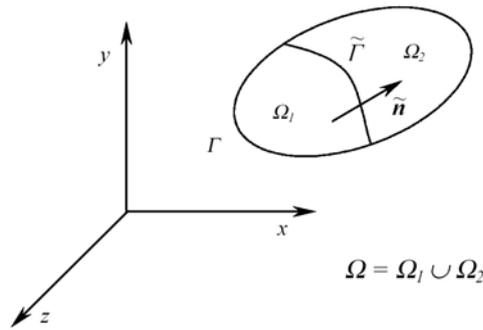
$$q = -d_n \Theta_{,n} \forall \mathbf{x} \in \Omega, t > 0 \quad (2.2)$$

$$\aleph_1 = \aleph_c(\mathbf{x}, t) - \aleph_r^{emitido}(\mathbf{x}, t) + \aleph_r^{aborvido}(\mathbf{x}, t), \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1, t > 0 \quad (2.8)$$

2.3.2 Condução Entre Dois Materiais

Para se resolver o problema da determinação do campo de temperaturas entre dois (ou mais) materiais (Ω_1 e Ω_2) em contato basta considerar a interface $\tilde{\Gamma}$ entre eles como apresentado na Figura 14 e compatibilizar a condição de contorno na mesma. Isto é, o fluxo em $\tilde{\Gamma}$ calculado a partir de Ω_1 e de Ω_2 deve ser a mesma, como é estabelecido na Equação 2.9:

Figura 14: Condições de contorno para condução.



Nota: Esta figura é apresentada em (KRÜGER, 2001) p. 35.

$$d_i^1 \Theta_{,\tilde{n}}^1 = -d_i^2 \Theta_{,\tilde{n}}^2, \forall \mathbf{x} \in \tilde{\Gamma} \quad (2.9)$$

onde:

Θ^j - temperatura do material j ;

d^j - condutibilidade do material j ;

Ω representa o domínio, o qual é composto por:

Ω_1 e Ω_2 que representam materiais diferentes;

$\tilde{\Gamma}$ representa as interfaces entre domínios;

2.3.3 Análises Transientes

A inclusão da dimensão tempo nas análises, implica na variação temporal das condições de contorno e do campo de temperaturas no domínio Ω . Trabalhos como os de LEWIS et al. (1996), BECKER, CAREY e ODEN (1981) e PARKUS (1976) abordam este caso em modelos mais simples mas através da técnica de separação de variáveis, isto é, ter o tempo t como mais um parâmetro real a ser considerado, e que não tem relação com as condições de espaciais.

A equação que avalia a condução de calor, pode ser obtida como extensão da Lei de Fourier, Equação 2.2, combinada com a expressão da Primeira Lei da Termodinâmica, que é dada pela seguinte equação:

$$\rho c (\Theta_{,t} + v \Theta_{,i}) + \aleph_{,i} = Q_b \quad (2.10)$$

onde:

- \aleph - fluxo de calor no contorno
- v - transporte de massa por calor

Tal expressão é conhecida como a equação de condução de calor, e é apresentada na Equação 2.11:

$$\Theta_{,ij} + \frac{Q_b}{d} = \frac{1}{\alpha} \Theta_{,t} \quad (2.11)$$

onde:

Q_b é a taxa de geração de calor por unidade de volume em Ω ;

α difusividade térmica do material de Ω , que é a relação entre a capacidade de transferir e armazenar calor e é definida pela expressão:

$$\alpha = \frac{d}{\rho c} \quad (2.12)$$

sendo:

ρ - massa específica do material no domínio;

c - calor específico do material;

d - condutividade térmica do material;

t - variável tempo;

A partir dessa equação é possível se estabelecer a relação entre o calor gerado, o fluxo de calor e a variação das temperaturas em Ω , quando conhecidas também as condições de contorno em Γ . Neste ponto, é importante salientar que o fluxo de calor que ocorre dentro de um corpo depende, dentre outras coisas, do número e das propriedades térmicas dos materiais que o compõem. Ressalta-se que a análise em camadas requer a atualização das propriedades térmicas do concreto durante o processo de resolução do modelo, tornando-o mais exato.

A Equação 2.13 indica as temperaturas iniciais (condições iniciais), $\Theta^o(\mathbf{x}, t)$, de cada ponto do domínio.

$$\Theta = \Theta^o(\mathbf{x}, t) \quad , \forall \mathbf{x} \in \Omega, t = 0 \quad (2.13)$$

A Equação 2.14 apresenta como as condições de contorno com temperatura prescrita se desenvolvem em função de $\Theta^*(\mathbf{x}, t)$:

$$\Theta = \Theta^*(\mathbf{x}, t) \quad , \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1, t > 0 \quad (2.14)$$

Assim, o problema transiente de condução de calor em material homogêneo e isotrópico é resumido através das Equações 2.11, 2.13 e 2.14:

$$\begin{aligned} (d_i \Theta_{,i})_{,j} + \frac{Q_b}{d} &= \frac{1}{\alpha} \Theta_{,t} \quad , \forall \mathbf{x} \in \Omega, t > 0 \\ \Theta &= \Theta^o(\mathbf{x}, t) \quad , \forall \mathbf{x} \in \Omega, t = 0 \\ \Theta &= \Theta^*(\mathbf{x}, t) \quad , \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1, t > 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.3.4 Formulação Variacional Térmica

Para se utilizar a formulação variacional deve-se estabelecer um conjunto de funções de aproximação \mathcal{T} que devem satisfazer as condições de contorno e um conjunto \mathcal{W} de funções de ponderação w_i . De acordo com LEWIS et al. (1996), a formulação variacional fraca deste problema é encontrar $\Theta \in \mathcal{T}$ de tal forma que, para o caso do problema estacionário, é desenvolvido a partir da Equação 2.16:

$$\int_{\Omega} \left[(d_i \Theta_{,i})_{,i} + Q_b \right] w_i d\Omega = 0, w_i \in \mathcal{W} \quad (2.16)$$

Segundo LEWIS et al. (1996), as funções de ponderação (w_i) e as de tentativa (N_i) podem ser completamente definidas se satisfizerem a seguinte condição:

$$\mathcal{F} = \{ \Theta \mid \Theta = f(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x} \in \Omega; -d_i \Theta_{,i} = \aleph_1(\mathbf{x}, \Theta), \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1; \Theta \in C^1 \} \quad (2.17)$$

$$\mathcal{W} = \{ W \mid W \in C^{-1} \} \quad (2.18)$$

onde:

C^1 - classe de funções contínuas com sua primeira derivada contínua;

C^{-1} - classe de funções descontínuas.

Pelo teorema fundamental do cálculo variacional, a função $\Theta(x)$ que satisfaz a Equação 2.16 é também solução da Equação 2.11. Da mesma forma que as condições expressas nas Equações 2.17 e 2.18, satisfazem as condições impostas pelas equações de condição de contorno (2.13 e 2.14).

Como apresentado por LEWIS et al. (1996), entre outros, esta formulação através de algumas simplificações e do Teorema da Divergência origina a formulação denominada de *formulação fraca*, a qual possibilita encontrar uma solução para a Equação 2.11 com as condições de contorno estabelecidas na Equação 2.14, representada na Equação 2.19:

$$\int_{\Omega} d\Theta_{,i} \cdot W_{,i} d\Omega = \int_{\Omega} Q_b W d\Omega - \int_{\Gamma_1} \aleph_1 W d\Gamma \quad (2.19)$$

Onde as seguintes condições impostas são:

$$\mathcal{F} = \{ \Theta \mid \Theta = f(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x} \in \Omega; \Theta \in C^0 \} \quad (2.20)$$

$$\mathcal{W} = \{ W \mid W = 0, \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1; W \in C^0 \} \quad (2.21)$$

onde:

C^0 - classe de funções contínuas.

Para o presente trabalho deve-se considerar ainda as mudanças nas propriedades

do material, pois as camadas possuem propriedades distintas por estarem em estgios de cura diferenciados. Basta assumir que ao longo da interface ($\tilde{\Gamma}$) entre os materiais ocorre apenas o fluxo de calor governado pelas propriedades dos materiais envolvidos no processo, e  exposto pela Equaao 2.9:

$$d_i^1 \Theta_{,n} = -d_i^2 \Theta_{,n}, \forall \mathbf{x} \in \tilde{\Gamma} \quad (2.22)$$

Portanto a formulaao variacional do problema  dado por:

$$- \int_{\Omega} [d_i \Theta_{,i}]_{,i} + Q_b W d\Omega + \int_{\Gamma_2} [d_n \Theta_{,n} + \aleph_2] W d\Gamma + \int_{\tilde{\Gamma}} [d_{\tilde{\mathbf{n}}} \Theta_{,\tilde{\mathbf{n}}}] W d\Gamma = 0 \quad (2.23)$$

A massa de concreto no processo de cura gera grandes quantidades de calor nas primeiras horas aps a deposiao. Portanto, o modelo trmico deve levar em conta efeitos transientes para se obterem resultados mais exatos das anlises processadas. Conseqentemente, a formulaao variacional tem o tempo como um parmetro t , na qual se deseja encontrar a funao $\Theta = \Theta(\mathbf{x}, t)$.

O problema torna-se encontrar Θ de tal forma que:

$$(d_i \Theta_{,i})_{,i} + Q_b = (\rho c \Theta)_{,t}, \forall \mathbf{x} \in \Omega, t > 0 \quad (2.24)$$

$$\Theta = f(\mathbf{x}, t), \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1, t > 0 \quad (2.25)$$

$$q(x, t) = -d_{,\mathbf{n}}(\Theta)_{,\mathbf{n}} = \aleph_1(\mathbf{x}, \Theta, t), \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1, t > 0 \quad (2.26)$$

$$d_1 \Theta_{,\tilde{\mathbf{n}}} = d_2 \Theta_{,\tilde{\mathbf{n}}}, \forall \mathbf{x} \in \tilde{\Gamma}, t > 0 \quad (2.27)$$

$$\Theta = g(\mathbf{x}, t), \forall \mathbf{x} \in \Omega, t = 0 \quad (2.28)$$

A formulaao variacional deste conjunto de equaoes  dada por:

$$\int_{\Omega} (\rho c \Theta(\mathbf{x}, t))_{,t} W + d_i \Theta_{,i} W_{,j} d\Omega = \int_{\Omega} Q_b W d\Omega - \int_{\Gamma_2} W \aleph_1 d\Gamma + \int_{\tilde{\Gamma}} [d_{,\tilde{\mathbf{n}}} \Theta_{,\tilde{\mathbf{n}}}] W d\Gamma \quad (2.29)$$

2.4 Modelagem Matemática - Estrutural

O estudo da Mecânica do Contínuo permite estabelecer as relações entre tensão e deformação através da cinemática da partícula, como descrito por LAI, RUBIN e KREMPL (1993). A determinação do modelo de análise pode ser realizada através de algumas hipóteses simplificadoras, como as apresentadas na Secção 2.2, sem a perda da exatidão dos resultados.

O número de equações e de condições a serem satisfeitas depende das hipóteses simplificadoras adotadas e das condições a serem satisfeitas pelo modelo. Estudos sobre a obtenção de modelos e as simplificações possíveis ou necessárias são encontrados em trabalhos de vários autores como por exemplo os trabalhos de PARKUS (1976), LEWIS et al. (1996), LAI, RUBIN e KREMPL (1993), ODEN, CAREY e BECKER (1981), BATHE (1996) e ZIENKIEWICZ e TAYLOR (1977).

A partir dos princípios da conservação de quantidade movimento, da conservação de massa e da conservação de energia desenvolve-se a modelagem:

- conservação de quantidade de movimento:

Para se desenvolver o modelo é necessário se adotar um sistema de coordenadas e se estabelecer uma convenção para os sinais das tensões. A Figura 15 apresenta o sistema de coordenadas cartesianas $\{0, \mathbf{x}\}$ e a convenção de sinais adotada neste trabalho.

O equilíbrio translacional é obtido a partir das Equações 2.30 escritas na forma tensorial.

$$S_{ij,j} = 0, \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2.30)$$

- conservação de massa: $\rho(t) = \rho_0 = \rho(t = 0)$ (2.31)

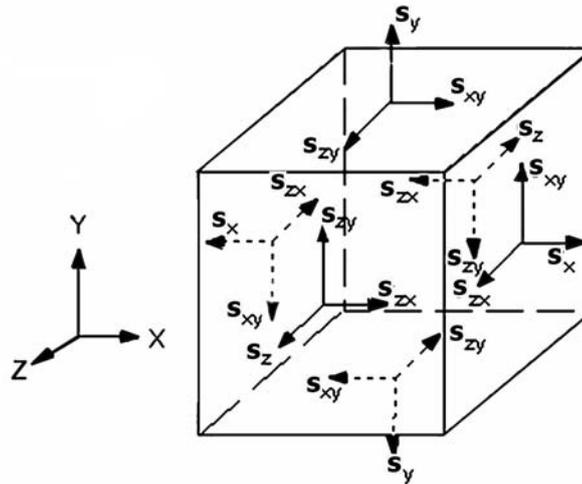
ρ_0 - densidade inicial de massa ($t = 0$);

$\rho(t)$ - densidade instantânea de massa no momento t .

- conservação de energia:

o fluxo de energia está na geração de calor e realização de expansão volumétrica do concreto, não são considerados neste trabalho fatores como energia de ativação da reação de hidratação e da emissão radioativa.

Figura 15: Convenção de sinais para as tensões.



A obtenção do modelo do material direciona a forma com que a análise é feita. O método de análise que o programa empregado permite estabelecer, as condições construtivas da barragem, e principalmente a capacidade computacional disponível e o tempo de resposta desejado delimitam a modelagem feita.

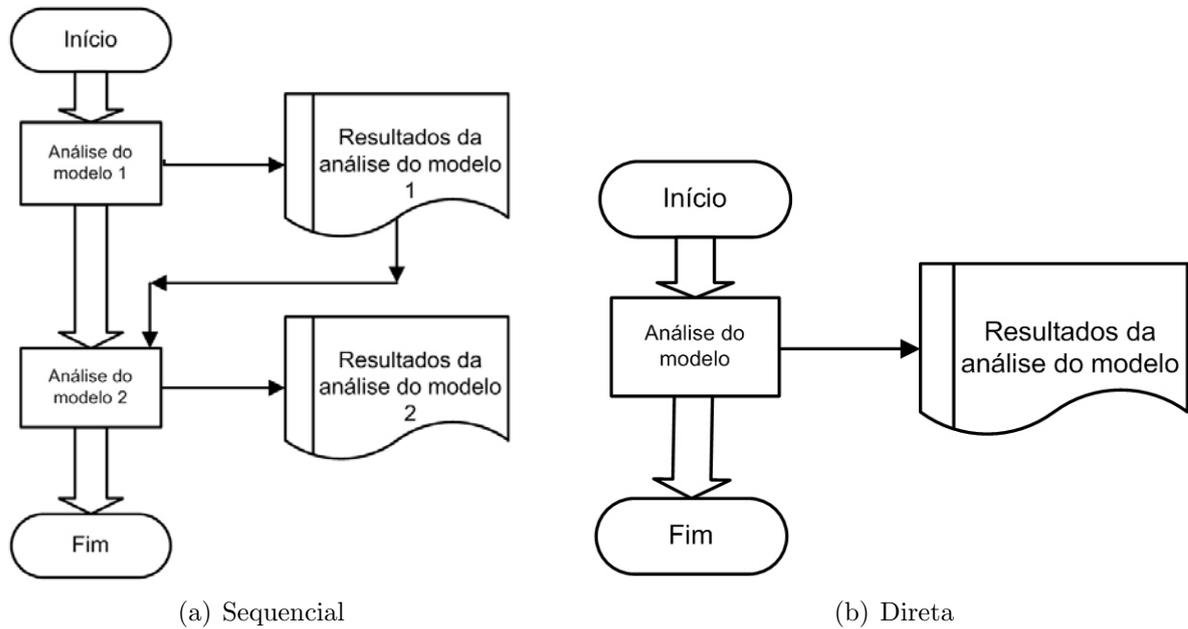
A análise pode ser feita de duas formas. Uma, denominada de método direto, trabalha com o acoplamento das duas áreas da Mecânica (a estrutural e a térmica), e outra que considera os efeitos separadamente, e é denominada de acoplamento sequencial. O segundo método demanda tratamento diferenciado, isto é, deve-se estabelecer qual das análises é a de interesse principal e conseqüentemente a outra está sendo acoplada. Uma das grandes vantagens desta segunda forma é a de permitir a escolha do método de solução utilizado para se encontrar resultados do modelo com menor carga de trabalho computacional e sem perda da exatidão.

Estes dois métodos estão resumidos abaixo:

Método direto O método direto emprega apenas uma análise levando-se em consideração as variáveis térmicas e estruturais em um único modelo. Para modelos em que o acoplamento é altamente não linear, a solução é encontrada em uma único estágio de trabalho computacional. Este método demanda uma grande capacidade computacional em termos de processamento e de armazenamento dos resultados temporários.

Método sequencial - os resultados de uma etapa de análise são introduzidas e na etapa posterior como carregamento. Isto supõe que os campos térmico e estrutural são

Figura 16: Métodos de análise



desacoplados no modelo matemático, isto é, se Φ é o modelo termo-estrutural então:

$$\Phi(\Theta, u) = \Phi_{termico}(\Theta) * \Phi_{Estrutural}(u) \quad (2.32)$$

onde:

Θ temperaturas;

u deslocamentos;

Este caso se aplica em modelos entre os campos em que não há um grau elevado de não linearidade. Isto permite que as análises sejam processadas separadamente, flexibilizando e tornando mais eficiente a análise destes modelos, por exemplo, ajustando-se os critérios de convergência na busca da solução.

Neste trabalho é empregada a análise sequencial para que os resultados térmicos e estruturais sejam armazenados e avaliados periodicamente. Os recursos computacionais disponíveis para armazenamento dos resultados são um dos fatores limitantes para uma análise direta.⁷

O enfoque da análise estrutural é o levantamento das tensões de origem térmica. A princípio, devido a sua não linearidade devido a geração de calor e as condições de

⁷Para a análise 2D termomecânica da primeira fase de construção da barragem Salto Caxias, simplificado, em cada etapa de análise são gerados cerca de 9Gb de resultados térmicos e estruturais intermediários em arquivos temporários.

contorno que necessitam ser atualizadas em cada etapa da análise, considera-se que a análise térmica é a principal, conforme trabalhos como:

- de KRÜGER, MACHADO e MARINO (2001), no qual a técnica do *Birth & Death* foi empregado para modelar o lançamento das camadas de concreto aplicada e utilizada por KRÜGER (2001); nesse trabalho, a análise é dividida em duas etapas distintas: a aplicação das condições iniciais e das cargas térmicas devido à geração de calor da hidratação do concreto. As condições iniciais são aplicadas a estrutura a cada instante de lançamento e é estabelecido a partir de carregamentos quase instantâneos (*load step*) com intervalo de 1 ms de aplicação; o resultado (distribuição do campo de temperaturas) desta primeira etapa é gravada e lida na etapa posterior quando é conderado a geração de calor;
- de KRÜGER, MACHADO e MARINO (2003), é feita a análise e comparação dos resultados obtidos com os dados dos sensores em campo;
- de LACERDA et al. (2003), a metodologia de análise é refeita. O estabelecimento das condições iniciais da estrutura são efetuadas a partir de carregamento ativado por controle de tempo (*Time Step*) interno ao programa de elementos finitos. Desta forma, a análise dispensa a gravação da distribuição do campo de temperaturas para posterior leitura, o que é uma grande vantagem para estruturas maiores ou que necessitem um maior número de análises entre lançamentos de camadas como o caso termo-estrutural.
- de KRÜGER et al. (2003b), o modelo contemplando a análise estrutural sequencial é implementada e os primeiros resultados são obtidos, analisados e publicados em congressos.
- de LACERDA et al. (2005), o programa é aprimorado para reduzir o tempo computacional, e uma nova estrutura de entrada de dados é implementada para flexibilizar sua aplicação em outras estruturas. Tais implementações são destinadas a um controle mais refinado no número de passos que determinada etapa da análise computacional deva ser feita ou não. Um exemplo onde isso ocorre é a etapa correspondente ao galgamento da estrutura de Salto Caxias, na qual o período de aproximadamente 3000 h não necessita ter um refinamento de uma análise em intercalos de 4 h como nos períodos de lançamento de camadas. Outra situação similar é quando o período entre lançamento de camadas é superior a 24 h uma vez que a geração de calor tem

seu pico nas primeiras 16 h de análise e após este tempo a geração contribui muito pouco na elevação adiabática da temperatura da estrutura.

A temperatura no concreto é alterada por dois fatores principais, segundo WU e LUNA (2001): a distribuição do calor de hidratação do cimento e as condições no entorno. A distribuição de temperatura não influencia somente o módulo de elasticidade (mesmo que de forma indireta), como também produz tensões térmicas no material.

PARKUS (1976) sugere a separação das deformações sofridas pelo material em duas partes. A primeira relacionada com as distribuições de temperaturas, e a segunda com o carregamento e as condições iniciais e de contorno estruturais, como apresentado na Equação 2.33.

$$\varepsilon = \varepsilon^{(1)} + \varepsilon^{(2)} \quad (2.33)$$

$\varepsilon^{(1)}$ - deformações de origem térmica;

$\varepsilon^{(2)}$ - deformações de origem estrutural.

Segundo LEWIS et al. (1996), o campo de temperaturas em um intervalo de tempo em um determinado meio causa expansão térmica ou contração no material de acordo com a fórmula apresentada na Equação 2.34 para um material isotrópico e homogêneo em uma dimensão:

$$\varepsilon^{(1)} = \alpha \Delta\Theta \quad (2.34)$$

$\varepsilon^{(1)}$ - deformação devido a expansão térmica;

α - coeficiente de expansão térmica;

$\Delta\Theta$ - variação da temperatura dentro do intervalo de tempo considerado.

Adotando-se a notação tensorial a Equação 2.34 para o caso 3D geral fica:

$$\varepsilon_{ij}^{(1)} = \alpha(\Delta\Theta)\delta_{ij} \quad (2.35)$$

onde:

δ_{ij} - Delta de Kronecker:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (2.36)$$

É importante lembrar que o coeficiente de expansão térmica é estabelecido empiricamente sobre pequenas amostras, e mais ainda, em uma única dimensão e sem nenhuma restrição à sua dilatação ou contração (PARKUS, 1976). De acordo com LEWIS et al. (1996), por estas razões esta forma de se obter as deformações não pode ser empregada para uma análise do contínuo, mas apenas para representar as deformações iniciais e assim obter o campo de tensões no material.

Considerando-se o caso geral, a deformação total estrutural de um meio é descrito como:

$$\varepsilon^{(2)} = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^{cr} + \varepsilon^{sw} \quad (2.37)$$

onde:

$\varepsilon^{(2)}$ - deformação total estrutural;

ε^{el} - deformação elástica;

ε^{pl} - deformação plástica;

ε^{cr} - deformação lenta (*creep*);

ε^{sw} - deformação pela expansão do material (*swelling*).⁸

Adotando-se a hipótese de um material elástico-linear, sem escoamento, e sem expansão, tem-se:

$$\varepsilon^{(2)} = \varepsilon^{el} + \underbrace{\varepsilon^{pl}}_0 + \underbrace{\varepsilon^{cr}}_0 + \underbrace{\varepsilon^{sw}}_0 \quad (2.38)$$

Para esta situação, pode-se obter a partir do campo de tensões:

$$\varepsilon_{ij}^{(2)} = \frac{1}{2G} \left(S_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} I_1 \delta_{ij} \right) \quad (2.39)$$

G - módulo de cisalhamento;

S_{ij} - componentes do tensor de tensões;

ν - coeficiente de Poisson;

I_1 - primeiro invariante do tensor de tensões (LAI; RUBIN; KREMPL, 1993):

$$I_1 = S_{ii} = S_{11} + S_{22} + S_{33} \quad (2.40)$$

⁸Um exemplo deste tipo de expansão é o originado pela expansão do concreto endurecido devido a reação de componentes químicos reativos e os álcalis presentes na estrutura interna. Maiores detalhes podem ser encontrados em trabalhos, como o de CARRAZEDO (2004).

Considerando-se as duas partes da deformação total, das Equações 2.39 e 2.35, tem-se a equação generalizada da lei de Hooke:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left(S_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} I_1 \delta_{ij} \right) + \alpha \Delta \Theta \delta_{ij} \quad (2.41)$$

Donde se obtém:

$$S_{ij} = 2G \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} e \delta_{ij} - \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha \Delta \Theta \delta_{ij} \right) \quad (2.42)$$

onde:

e - primeiro invariante do tensor de deformações:

$$e = e_{ii} = e_{11} + e_{22} + e_{33} \quad (2.43)$$

A relação entre e e I_1 é expressa da seguinte forma:

$$e = \frac{1-2\nu}{1+\nu} \frac{I_1}{2G} + 3\alpha \Delta \Theta \quad (2.44)$$

Assim o potencial elástico W_{el} de um material isotrópico que segue a lei Hooke generalizada é escrito da seguinte forma:

$$W_{el} = G \left\{ \sum_i \sum_j \varepsilon_{ij}^2 + \frac{\nu}{1-2\nu} e^2 - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha \Delta \Theta e \right\} + f(\Theta) \quad (2.45)$$

Desta forma representa-se a relação entre o tensor de tensões e o de deformações de forma conveniente:

$$S_{ij} = \frac{\partial W_{el}}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (2.46)$$

É importante lembrar que os componentes do tensor de deformações devem obedecer algumas relações cinemáticas que no caso de pequenas deformações são resumidas na Equação 2.47.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2.47)$$

Estas relações são estabelecidas e fundamentadas em trabalhos como os de LAI, RUBIN e KREMPL (1993) entre outros.

O conjunto das equações da termoelasticidade linear está completo. São ao todo:

- 6 expressões na Equação 2.30,
- 6 expressões na Equação 2.47,
- 3 expressões na Equação 2.46

e como incógnitas tem-se as 15 variáveis de S_{ij} , ε_{ij} e u_i . A temperatura Θ não é uma incógnita devido ao desacoplamento dos campos térmico e estrutural.

Neste trabalho, algumas hipóteses simplificadoras foram adotadas, como citadas anteriormente. Uma delas é a do estado plano de deformações, que leva em conta as seguintes igualdades:

$$S_{13} = S_{23} = 0 \quad (2.48)$$

Esta expressão, que é devido à simetria com respeito ao plano z , torna o equilíbrio das cargas, descritas no sistema cartesiano ortogonal, estabelecida por:

$$\sum_j \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} = 0 \rightarrow S_{ji,j} = 0 \quad (2.49)$$

onde:

x_j -direções dos sistema de coordenadas ortogonais cartesiano.

O que se reflete na Equação Generalizada da Lei de Hooke, Equação 2.41, como:

$$\begin{aligned} 2G\varepsilon_{11} &= S_{11} - \nu(S_{11} + S_{22}) + E_Y\alpha\Delta\Theta, \\ 2G\varepsilon_{22} &= S_{22} - \nu(S_{11} + S_{22}) + E_Y\alpha\Delta\Theta, \\ 2G\varepsilon_{12} &= S_{12} \end{aligned} \quad (2.50)$$

onde:

E_Y - módulo de Young:

$$E_Y = 2(1 + \nu)G \quad (2.51)$$

Para o caso apenas linear estrutural basta considerar:

$$\varepsilon_{i3} = 0 \quad (2.52)$$

e o estado de deformações determinado pelas equações 2.47, e a tensão na direção z é dada por:

$$S_{33} = \nu(S_{11} + S_{22}) - E_Y\alpha\Delta\Theta \quad (2.53)$$

Para a parte térmica, tem de se considerar as seguintes expressões:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \alpha\Delta\Theta & \varepsilon_{22} &= \alpha\Delta\Theta & \varepsilon_{33} &= \alpha\Delta\Theta \\ \varepsilon_{12} &= 0 & \varepsilon_{23} &= 0 & \varepsilon_{31} &= 0 \end{aligned}$$

Como deve haver as condições de compatibilidade entre as deformações ε_{ij} e os deslocamentos u_i , como estabelecido pela Equação 2.47, é o mesmo que: ◁

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2^2} &= \frac{\partial^3 u}{\partial x_2^2 \partial x_1} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_1^2} &= \frac{\partial^3 u}{\partial x_1^2 \partial x_2} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} &= \frac{\partial^3 u}{\partial x_2^2 \partial x_1} + \frac{\partial^3 v}{\partial x_1^2 \partial x_2}\end{aligned}\quad (2.54)$$

Resultando nas seguintes expressões quando os deslocamentos são eliminados das expressões da Equação 2.55 : ◁

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_1^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_1 \partial x_2} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(-\frac{\partial \varepsilon_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial \varepsilon_{31}}{\partial x_2} + \frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x_3} \right)\end{aligned}\quad (2.55)$$

Aplicando estas expressões da Equação 2.55 na Equação 2.54, tem-se que: ◁

$$\left. \begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}(\alpha \Delta \Theta) + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}(\alpha \Delta \Theta) &= 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}(\alpha \Delta \Theta) + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}(\alpha \Delta \Theta) &= 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}(\alpha \Delta \Theta) + \frac{\partial^2}{\partial x_1^2}(\alpha \Delta \Theta) &= 0\end{aligned}\right\} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2}(\alpha \Delta \Theta) = 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}(\alpha \Delta \Theta) = 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}(\alpha \Delta \Theta) = 0 \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2}(\alpha \Delta \Theta) = 0 \quad \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3}(\alpha \Delta \Theta) = 0 \quad \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_1}(\alpha \Delta \Theta) = 0 \quad (2.56)$$

Essas equações possuem uma única solução da forma:

$$\alpha \Theta = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z \quad (2.57)$$

onde: a_i são funções arbitrárias no tempo;

Para se encontrar a formulação variacional do problema termo-estrutural pode-se empregar o potencial termoelástico como o apresentado por PARKUS (1976), que através do campo de temperaturas consegue-se avaliar as tensões de origem térmica aplicando as equações generalizadas de Navier ou as equações generalizadas de Beltrami-Michell. O primeiro conjunto de equações trabalha com os componentes do deslocamento dados pela seguinte expressão:

$$u_{i,ij} + \frac{1}{1-2\nu} e_{,i} = 2 \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha \Theta_{,i} = \quad (2.58)$$

Enquanto o segundo conjunto trabalha com as componentes das tensões: ◁

$$(1 + \nu)S_{ij,ij} + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} = -E_Y \alpha \left(\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (\Delta \Theta) + \frac{1 + \nu}{1 - \nu} (\Delta \Theta \delta_{ij})_{,ij} \right) \quad (2.59)$$

Essas duas expressões são equações diferenciais lineares, não homogêneas e portanto de acordo com o princípio da superposição, como encontrado em BOYCE e DiPRIMA (1992), a solução pode ser separada com relação à parte homogênea, \bar{u}_i , e com a não-homogênea, \bar{u}_i , da equação diferencial. Denomina-se solução geral da equação diferencial a soma das duas soluções que devem satisfazer as condições de contorno e as iniciais.

Para se encontrar uma solução particular, \bar{u}_i , é usual se empregar o potencial termo-elástico Φ , expresso por:

$$\bar{u}_i = \Phi_{,i} \quad (2.60)$$

A solução da equação homogênea, \bar{u}_i , deve ser estabelecida de forma com que a solução geral, $u = \bar{u}_i + \bar{u}_i$, satisfaça as condições de contorno.

Assim, obtém-se o potencial elástico para o material isotrópico e utiliza-se a formulação variacional para encontrar o campo de tensões (ou deformações).

Como a metodologia emprega a ferramenta computacional ANSYS®, esta seção descreve brevemente como é feita a formulação matricial que é empregada no Método dos Elementos Finitos (MEF) aplicado nas análises. O trecho é baseado em (ANSYS, 2001).

2.5 Métodos Aproximados

Para se resolver modelos transientes procura-se discretizar a variável tempo de modelos com equações diferenciais parciais para transformá-los em um conjunto de equações diferenciais ordinárias. Existem dois métodos para se discretizar estas equações no tempo, o método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos (LEWIS et al., 1996). Existem outras técnicas de aproximação, mas como o trabalho foi desenvolvido sobre o pacote ANSYS, o qual utiliza estas duas técnicas, apenas os dois métodos já citados são abordados.

2.5.1 Diferenças Finitas

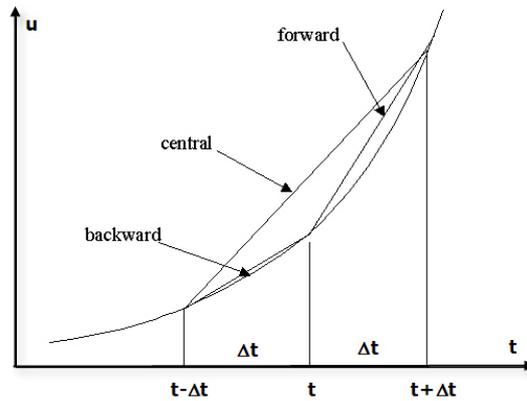
O método das diferenças finitas baseia-se na discretização da dimensão tempo e da dimensão espacial aplicando para isso a expansão em séries de Taylor, omitindo as

derivadas de ordem superior.

A discretização no tempo permite aproximar o valor da derivada temporal de uma determinada grandeza u no instante de tempo t como sendo uma relação entre a variação linear da grandeza dentro num intervalo de tempo. Esta derivada pode ser calculada de 3 formas diferentes, as quais estão resumidas na Figura 17.

Para se calcular a derivada podem ser empregados os valores posteriores (*forward*) calculada na Equação 2.61, ou anteriores (*backward*) calculada na Equação 2.62, ou média central (média aritmética entre valores posteriores e anteriores) calculada na Equação 2.63.

Figura 17: Cálculo de derivada com diferenças finitas



$${}_f\Theta_{,t} \approx \frac{\Theta(t+1) - \Theta(t)}{\Delta t} \quad (2.61)$$

$${}_b\Theta_{,t} \approx \frac{\Theta(t) - \Theta(t-1)}{\Delta t} \quad (2.62)$$

$${}_c\Theta_{,t} \approx \frac{\Theta(t+1) - \Theta(t-1)}{2\Delta t} \quad (2.63)$$

Cada um destes 3 métodos apresenta suas vantagens e desvantagens:

- O método *forward*, ${}_f\Theta_{,t}$, fornece o resultado através do cálculo dos valores do vetor de incógnitas em um sistema de equações lineares algébricas. Por isso é denominado de método Direto, Explícito ou de Método de Euler. Mas para que o método seja estável e tenha boa convergência é necessário que o passo temporal seja muito mais refinado que o espacial;
- O método *backward*, ${}_b\Theta_{,t}$, é conhecido com método implícito, pois para se resolver o sistema de equações é necessário inverter a matriz dos coeficientes;

- O método da diferença central, ${}_c\Theta_t$, pode levar a sistemas mal condicionados e instáveis em determinados casos.

As derivadas espaciais podem ser calculadas da mesma forma permitindo assim resolver sistemas de equações diferenciais parciais como sistema de equações diferenciais ordinárias. Este fato é importante para se poder desacoplar os efeitos temporais dos efeitos da posição do campo de temperaturas, isto é:

$$\tilde{\Theta}(x, y, z, t) = \tilde{\Theta}(x, y, z) \cdot \tilde{\Theta}(t) \quad (2.64)$$

Onde:

- $\tilde{\Theta}(x, y, z)$ é a porção da temperatura que depende da posição na qual é medida;
- $\tilde{\Theta}(t)$ é a porção da temperatura que depende do instante no qual é medida.

O método pode ser empregado para se descrever as variações da temperatura espacialmente, contudo neste trabalho devido ao uso do MEF este tópico não é abordado.

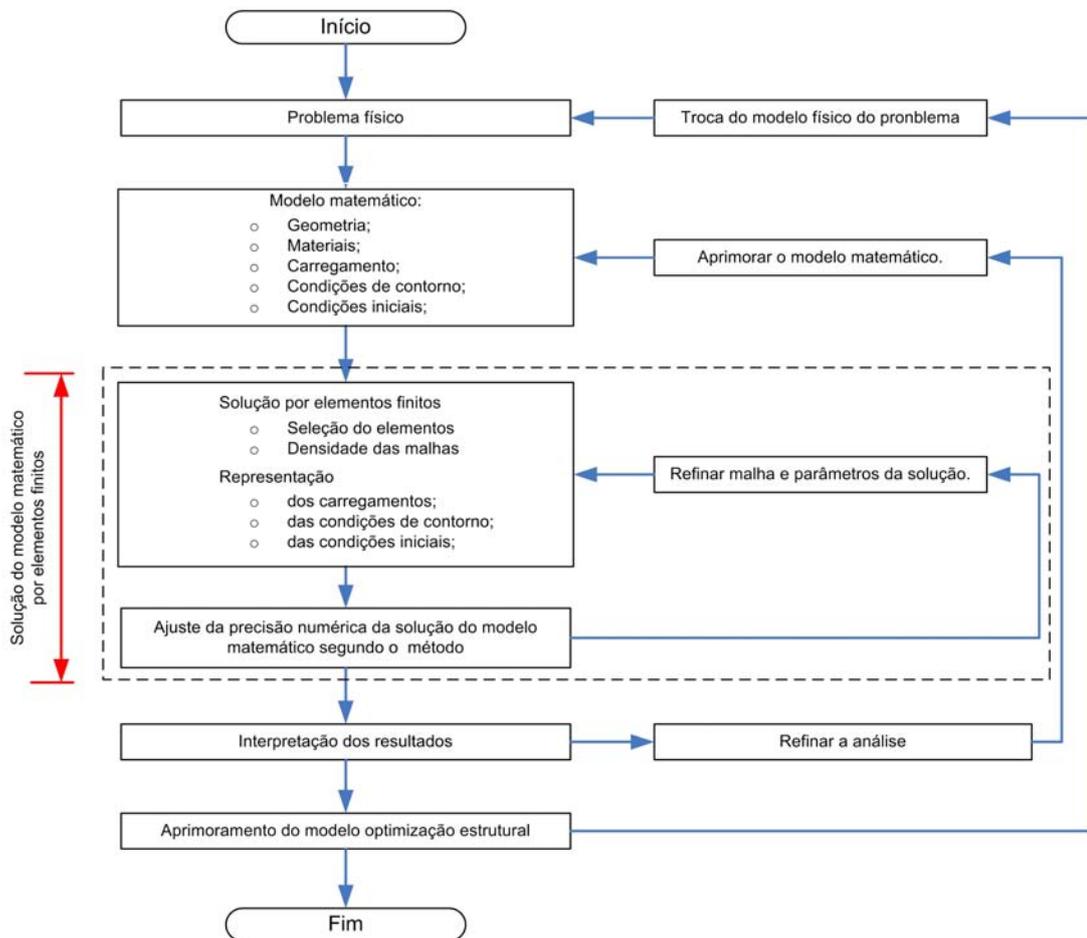
2.6 Método dos Elementos Finitos

Segundo BATHE (1996), a solução pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se desenvolvido graças a duas características importantes, a grande variedade de aplicações e ao desenvolvimento da computação de alto desempenho.

BATHE (1996) afirma que a solução de problemas pelo MEF apenas fornece uma ordem de grandeza (ou de tendência) das variáveis do problema, pois não há como reproduzir todas as condições presentes na natureza e em problemas físicos, mesmo em um modelo matemático refinado.

A Figura 18 mostra que, a partir do momento em que o modelo matemático tenha sido estabelecido e resolvido obtendo-se resultados consistentes, deve-se partir para um modelo matemático mais refinado do problema. Dessa forma faz-se uma evolução gradativa para uma melhor representação do problema físico a ser solucionado, e melhor conhecimento dos fatores que preponderam nos resultados.

Figura 18: Processo de solução pelo MEF



Fonte: Adaptado de (BATHE, 1996) p. 3.

O MEF pode ser utilizado de forma eficiente na determinação da distribuição de temperaturas em estruturas com geometria e condições de contorno complexas. 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 (KRÜGER; MACHADO; MARINO, 2001).

O MEF é um método para se obter uma solução aproximada através da discretização do domínio das soluções em subdomínios denominados de elementos finitos. O resultado obtido nesse processo tem um resíduo que é a diferença entre os valores da

solução esperada e a obtida. Através da formulação variacional do modelo matemático do problema é que se busca minimizar os resíduos provenientes da discretização. Há vários métodos que podem ser empregados como os métodos variacionais de Trefftz, Rayleigh-Ritz e os métodos de resíduos ponderados. Os resíduos ponderados podem ser divididos em métodos dos mínimos quadrados, método da colocação, método do subdomínio e o método de Galerkin. A vantagem de se empregar o método dos resíduos ponderados é que a solução de equações simultâneas recai na solução de sistemas de equações lineares algébricas, onde a matriz dos coeficientes é simétrica, como no caso do método de Galerkin.

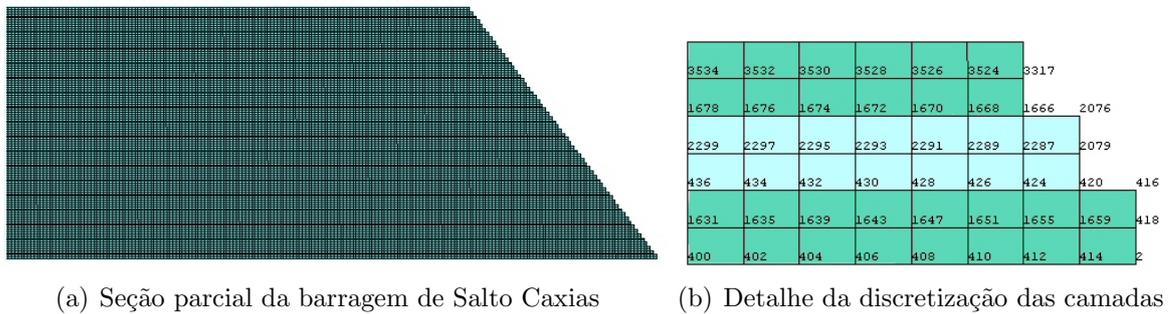
Além da formulação variacional o método pode ser aplicado diretamente nas equações diferenciais de equilíbrio do sistema estudado (BATHE, 1996). Para simplificar o modelo do problema é utilizada uma discretização do domínio da solução do problema, criando assim variáveis de estado ⁹ (valores nodais) que possam representar os carregamentos externos em termos dessas variáveis, mesmo quando essas cargas não estejam aplicadas diretamente sobre os nós (vértices ou extremidades da discretização). Esse processo transforma sistemas contínuos em sistemas discretos com parâmetros concentrados permitindo que uma solução seja encontrada mais facilmente, mesmo que seja uma aproximação. Para que esse processo seja aplicado com êxito é necessário se ter em mente as seguintes etapas: (BATHE, 1996)

- a idealização do modelo discretizado;
- a aplicação dos critérios de equilíbrio do elemento;
- a interconectividade dos elementos para que possa representar o comportamento do sistema que ele representa;
- a utilização de ferramentas matemáticas adequadas para se encontrar os valores das variáveis de estado ainda não determinadas.

A cada uma das partes dessa discretização recebe o nome de elemento. Neste trabalho, como se emprega o modelo bidimensional, os elementos são áreas que compõem a seção parcial da barragem analisada. A discretização pode ser vista para a seção parcial do bloco 8 da barragem de Salto Caxias na Figura 19.

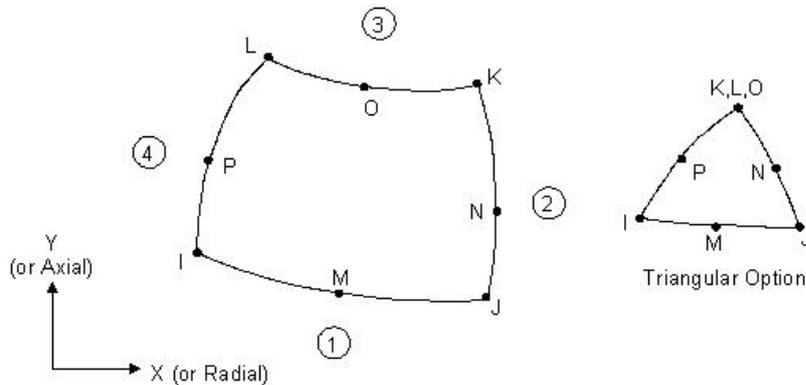
⁹Em Engenharia de Controle, essa denominação é utilizada para se eleger o menor conjunto de parâmetros para se caracterizar o comportamento do sistema (seu ESTADO). Qualquer outra variável ou parâmetro do modelo pode ser obtido em termos das variáveis desse Estado. (OGATA, 2003)

Figura 19: Discretização do domínio



Neste trabalho os elementos são compostos de 8 nós e 4 arestas como apresentados na Figura 20. Existe também a possibilidade de se trabalhar com um elemento triangular (se os nós K,L e O forem coincidentes). Trata-se portanto de um elemento quadrático empregado para materiais com propriedades ortotrópicas. Existe um elemento estrutural correspondente, que é o PLANE82, que possui as mesmas características geométricas que o PLANE77.¹⁰ O elemento possui apenas um grau de liberdade, a temperatura nos nós dos vértices.

Figura 20: Geometria do elemento PLANE77



Para cada elemento deve-se garantir seu equilíbrio e que cada um de seus nós está em equilíbrio também. Esse equilíbrio para elementos 2D pode ser obtido adotando-se um sistema de coordenadas, no caso um sistema cartesiano ortogonal, como já apresentado na Figura 20, verificando-se a conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento.

¹⁰Maiores detalhes do funcionamento e uso dos elementos PLANE77 e PLANE82 são encontrados em ANSYS (2001)

Os resultados das condições de equilíbrio são encontrados em várias literaturas, tendo-se o cuidado com as mudanças de notação e convenções utilizadas. Entre as obras se destacam autores como ZIENKIEWICZ e TAYLOR (1977), LEWIS et al. (1996), BATHE (1996), COOK, MALKUS e PLESHA (1989) e ODEN, CAREY e BECKER (1981). Ao se transferir as condições de carregamento para o modelo discretizado e colocado as incógnitas em termos das variáveis de estado, isto é descrito o problema em termos dos valores nodais, estabelece-se o equilíbrio para cada elemento e as restrições (de valores de nós e de elementos) através da elaboração das matrizes dos elementos e das relações para se constituir a matriz global do modelo.

Deste modo, as variáveis de temperatura, $\Theta(x, y, z, t)$, devem ser descritas em função das temperaturas nodais, $\Theta_e^i(x, y, z, t)$, do elemento e no qual se localiza o ponto (x, y, z) . Como se trata de uma análise transiente particiona-se a temperatura em termos das temperaturas no instante t , no nó i e no elemento e ${}^t\Theta_e^i$ através das funções da forma do nó i e no elemento e , N_i^e , isto é:¹¹

$$\Theta(x, y, z, t) = \sum_1^8 N_i^e \cdot {}^t\Theta_e^i = \{N_i^e\}' \{{}^t\Theta_e^i\} \quad (2.65)$$

Este processo ajuda na solução de problemas de análise transiente. Como qualquer outra aproximação, este método produz um resíduo nos resultados obtidos e necessita ser minimizado. Para isto basta resolvê-lo pela forma direta ou pela formulação variacional para minimização do erro. Ao se efetuar o desenvolvimento das expressões, como em LEWIS et al. (1996), pode-se concluir que os métodos das diferenças finitas e o método dos elementos finitos do ponto de vista de desenvolvimento matricial não possuem diferenças.

2.7 Aplicação dos Métodos Aproximados

Com a formulação variacional apresentada pelas expressões da Equação 2.29 pode-se utilizar os métodos aproximados, por exemplo, de Galerkin para aplicar o método dos elementos finitos e encontrar uma solução para o problema de distribuição de temperaturas.

O método aproximado de Galerkin escolhe as função $\psi(\mathbf{x})$ que satisfaça as condições de contorno em Γ_1 e um conjunto de funções contínuas que satisfazem as condições

¹¹A notação A^T indica a matriz transposta de A .

de homogeneidade no contorno, $N_j(\mathbf{x})$, conforme descrito por LEWIS et al. (1996), onde:

$$\psi(\mathbf{x}) = \Theta^*(\mathbf{x}) \quad , \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1 \quad (2.66)$$

$$N_j(\mathbf{x}) = 0 \quad , \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1 \quad (2.67)$$

De tal forma que as classes de funções são agora re-escritas como:

$$\mathcal{F} = \left\{ \Theta \setminus \Theta = \psi + \sum_{i=1}^{\infty} a_i N_i; \Theta = \Theta^*(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1; \Theta \in C^o \right\} \quad (2.68)$$

$$\mathcal{W} = \left\{ W \setminus W = \sum_{j=1}^{\infty} b_j N_j; W = 0, \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1; W \in C^o \right\} \quad (2.69)$$

Considerando uma dimensão finita para o espaço de funções peso e de aproximação é possível se encontrar a solução Θ em termos de N .

Para se conseguir uma solução aproximada considere um subconjunto das classes \mathcal{F} e \mathcal{W} com dimensão finita P , então para $l = 1 \dots P$ e $m = 1 \dots P$:

$$\mathcal{F}^{(P)} = \left\{ \tilde{\Theta} \setminus \tilde{\Theta} = \psi + a_l N_l; \tilde{\Theta} = \Theta^*(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1; \tilde{\Theta} \in C^o \right\} \quad (2.70)$$

$$\mathcal{W}^{(P)} = \left\{ \tilde{W} \setminus \tilde{W} = b_m N_m; \tilde{W} = 0, \forall \mathbf{x} \in \Gamma_1; \tilde{W} \in C^o \right\} \quad (2.71)$$

Para se determinar a solução aproximada por Galerkin através da formulação fraca é necessário se encontrar o valor de $\tilde{\Theta} \in \mathcal{F}^{(P)}$ para toda função peso \tilde{W} da classe $\mathcal{W}^{(P)}$.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \left(\rho c \tilde{\Theta} \right)_{,t} \underbrace{\tilde{W}}_{b_m N_m} + k_i \tilde{\Theta}_{,i} \cdot \underbrace{\tilde{W}}_{b_m N_m} d\Omega = \\ & \int_{\Omega} \aleph_2 \underbrace{\tilde{W}}_{b_m N_m} d\Omega - \int_{\Gamma_2} \underbrace{\tilde{W}}_{b_m N_m} \aleph_2 d\Gamma + \int_{\tilde{\Gamma}} \left[k_i \tilde{\Theta}_{,i} \right] \underbrace{\tilde{W}}_{b_m N_m} d\Gamma \end{aligned} \quad (2.72)$$

Então para cada função N_m , para $m = 1, 2, \dots, P$ tem-se:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \left(\rho c \tilde{\Theta} \right)_{,t} N_m + k_i \tilde{\Theta}_{,i} \cdot N_{m,i} d\Omega = \\ & = \int_{\Omega} \aleph_2 N_m d\Omega - \int_{\Gamma_2} N_m \aleph_2 d\Gamma + \int_{\tilde{\Gamma}} \left[k_i \tilde{\Theta}_{,i} \cdot \tilde{\mathbf{n}}_{,i} \right] N_m d\Gamma \end{aligned} \quad (2.73)$$

Como $\tilde{\Theta}$ pode ser escrito como uma combinação linear das funções de aproximação $N_1, N_2, N_3, \dots, N_P$, conforme Equação 2.70, então o gradiente de $\tilde{\Theta}$ é re-escrito como:

$$\tilde{\Theta}_{,j} = (\psi + a_i N_i)_{,j}$$

$$= \psi_{,j} + a_i N_{i,j}$$

consequentemente a Equação 2.73 é re-escrita para cada $j = 1, 2, 3, \dots, P$ como:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (\rho c \psi + \rho c a_l N_l)_{,t} N_j + k_i (\psi_{,i} + a_l N_{l,j}) \cdot N_{j,i} d\Omega = \\ & \int_{\Omega} \aleph_2 N_j d\Omega - \int_{\Gamma_2} N_j \aleph_2 d\Gamma + \int_{\tilde{\Gamma}} [k (\psi_{,i} + a_l N_{l,j}) \cdot \tilde{\mathbf{n}}] N_j d\Gamma \end{aligned} \quad (2.74)$$

Para todo $j = 1, 2, 3, \dots, P$.

Manipulando a expressão:

$$\begin{aligned} a_l \underbrace{\int_{\Omega} k_i N_{l,k} N_{j,k} d\Omega}_{K_{ij}} = & \underbrace{\int_{\Omega} \aleph_2 N_j d\Omega - \int_{\Gamma_2} N_j \aleph_2 d\Gamma - \int_{\Omega} k_i \psi_{,i} N_{j,i} d\Omega}_{\mathbf{r}_j} + \\ & \int_{\tilde{\Gamma}} k_i \psi_{,\tilde{\mathbf{n}}} N_j d\Gamma + \int_{\tilde{\Gamma}} k_i a_l N_{l,\tilde{\mathbf{n}}} N_j d\Gamma - \\ & \int_{\Omega} (\rho c \psi_{,i})_{,t} + (\rho c a_l N_{l,i})_{,t} N_j d\Omega \end{aligned} \quad (2.75)$$

Para todo $j = 1, 2, 3, \dots, P$.

$$\begin{aligned} a_l K_{lj} = & \mathbf{r}_j + \\ & \int_{\tilde{\Gamma}} k_i \psi_{,\tilde{\mathbf{n}}} N_j d\Gamma + \int_{\tilde{\Gamma}} k_i a_l N_{l,\tilde{\mathbf{n}}} N_j d\Gamma - \\ & \int_{\Omega} (\rho c \psi_{,i})_{,t} + (\rho c a_l N_{l,i})_{,t} N_j d\Omega \end{aligned} \quad (2.76)$$

Exemplicando cada uma das partes (problema estacionário, problema com mais de um material e problema transiente) da equação 2.76, tem-se:

- Para problemas estacionários, com material homogêneo a formulação do problema tem a forma:

$$a_l K_{lj} = \mathbf{r}_j$$

onde as incógnitas são os valores a_i e o carregamento externos, as condições de contorno são apresentadas em r_j e os valores de K_{ij} já são calculadas previamente em função de N_i . Bastaria resolver o sistema de equações lineares algébricas para

se determinar os valores de a_i e conseqüentemente o valor aproximado de Θ pelo método de Galerkin.

- Para análises transitórias, pode-se trabalhar com a separação de variáveis espacial e temporal, isto é:

$$\Theta(x, y, z, t) = \Theta_{esp}(x, y, z)\Theta_{tempo}(t) \quad (2.77)$$

e então efetuar a discretização das variáveis envolvidas no problema através de uma aproximação como indicado anteriormente.

2.8 Equilíbrio dos Elementos - Térmico

Ao se efetuar a discretização das variáveis do problema é importante se garantir o equilíbrio de cada um dos elementos, isto é feito através da imposição de restrições nodais e de condições de interface para entre os elementos garantindo desta forma uma solução aproximada compatível e única.

Neste trabalho não foram levados em consideração os efeitos de calor radiado, portanto o equilíbrio dos elementos não inclui essa questão.

2.8.1 Modelo discretizado

A primeira lei da termodinâmica indica que a energia térmica deve ser conservada. Restringindo isto a um volume do controle diferencial:

$$\rho c (\Theta_{,t} + \{v\}' \{L\} \Theta) + \{L\}' \{N\} = Q_b \quad (2.78)$$

onde:

$\{v\}$ - vetor transporte de massa por calor;

$$\{v\} = \{v_x v_y v_z\}' \quad (2.79)$$

$\{L\}$ - operador diferencial de vetor;

$$\{L\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}' \quad (2.80)$$

$\{N\}$ - vetor do fluxo do calor;

Q_b - taxa da geração do calor por o volume de unidade

Em seguida, a lei de Fourier é usada relacionar o vetor do fluxo do calor aos gradientes térmicos:

$$\{q\} = -[D]\{L\}\Theta \quad (2.81)$$

onde:

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & d_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & d_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

matriz de condutividade de calor, em que d_{xx} , d_{yy} e d_{zz} são, respectivamente, as condutividades nas direções x , y e z do elemento. Como o material é isotrópico $d_{xx} = d_{yy} = d_{zz} = d$.

Combinando a equação 2.78 e a equação 2.81:

$$\rho c (\Theta_{,t} + \{v\}' \{L\} \Theta) + \{L\}' [D] \{L\} \Theta = Q_b \quad (2.83)$$

Três tipos de condições de contorno são considerados. Assume-se que estas condições descrevam as condições existentes em todo o elemento:

- em Γ_1 que tem as temperaturas prescritas Θ^* , existem duas das condições:

$$\Theta = \Theta^* \quad (2.84)$$

- ${}^1\Gamma_1$ tem-se \aleph_c , fluxo de calor convectivo pré-estabelecido;

$$\{q\}' \mathbf{n}_e = \aleph_c = h_f (\Theta - \Theta_\infty) \quad (2.85)$$

onde:

- * Θ é a temperatura na superfície;
- * Θ_∞ é a temperatura adjacente a superfície;
- * \mathbf{n}_e o versor normal apontando para fora do elemento.

- ${}^2\Gamma_1$ tem-se \aleph_r , fluxo de calor radioativo.

- e em Γ_2 tem-se \aleph_2 , fluxo de calor prescrito \aleph_2 , então:

$$-\{q\}' \mathbf{n}_e = \aleph_2 \quad (2.86)$$

Combinando as Equações 2.81 com 2.86 e 2.85:

$$[D] \{L\} \Theta = q^* = \aleph_p \quad (2.87)$$

$$[D] \{L\} \Theta = \alpha(\Theta - \Theta_\infty) = \aleph_c \quad (2.88)$$

Note que o fluxo de calor especificado é positivo no contorno (isto é, no sentido oposto de $\{\mathbf{n}_e\}$), que explica os sinais negativos nas Equações 2.86 e 2.85.

Pré multiplicando a Equação 2.83 por uma variação virtual na temperatura, $(\delta\Theta)$,

$$\rho c \delta\Theta [(\Theta_{,t} + \{v\}' \{L\} \Theta) + \{L\}' [D] \{L\} \Theta] = \delta\Theta Q_b \quad (2.89)$$

integrando-se sobre o volume do elemento:tem-se:

$$\int_{\Omega_e} \rho c \delta\Theta [(\Theta_{,t} + \{v\}' \{L\} \Theta) + \{L\}' ([D] \{L\} \Theta)] d\Omega_e \quad (2.90)$$

onde:

Ω_e - volume do elemento;

$\delta\Theta$ - uma temperatura virtual permissível ($= \delta\Theta(x, y, z, t)$)

2.8.2 Determinação das Equações Matriciais

Como indicado em 2.77, Θ varia no espaço e no tempo, e pela separação de variáveis esta dependência pode ser reescrita para um elemento como indicado na Equação 2.91:

$$\Theta(x, y, z, t) = \underbrace{\Theta(x, y, z)}_{\{N\}'} \underbrace{\Theta(t)}_{\Theta_e} \quad (2.91)$$

onde:

$\{N\} = N(x, y, z)$ - funções da forma do elemento;

$\{\Theta_e\} = \{\Theta_e(t)\}$ - vetor nodal da temperatura do elemento.

Assim, as derivadas do tempo da Equação 2.91 podem ser escritas como:

$$\dot{\Theta} = \frac{\partial}{\partial t} \Theta = \{\dot{\Theta}_e\} \quad (2.92)$$

e $\delta\Theta$ tem o mesmo formato que Θ :

$$\delta\Theta = \delta\Theta_e' \{N\} \quad (2.93)$$

A expressão $L\Theta$ é escrita como:

$$\{L\}\Theta = [B]\{\Theta_e\} \quad (2.94)$$

onde:

$$[B] = \{L\}\{N\}$$

A formulação variacional da equação pode ser obtida da Equação 2.91 à Equação 2.94 :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_e} \rho c \delta\Theta [\Theta_{,t} + \{v\}' \{L\} \Theta] + \{L\}' ([D]\{L\}\Theta) d\Omega_e &= \int_{\Omega_e} \delta\Theta Q_b d\Omega_e \\ &+ \int_{\Omega_e} \rho c \{\delta\Theta_e\}' \{N\} \{N\}' \{\dot{\Theta}_e\} d\Omega_e + \\ &+ \int_{\Omega_e} \rho c \{\delta\Theta_e\}' \{N\} \{v\}' [B] \{\Theta_e\} d\Omega_e + \\ &+ \int_{\Omega_e} \{\delta\Theta_e\}' \{B\}' \{D\}' [B] \{\Theta_e\} d\Omega_e = \\ &+ \int_{\Gamma_2} \{\delta\Theta_e\} \{N\} \mathfrak{N}_p d\Gamma_2 \quad (2.95) \end{aligned}$$

Os termos são definidos em fundamentos do fluxo de calor: ρ é suposto constante sobre o volume do elemento. Por outro lado, c e Q_b podem variar sobre o elemento. Finalmente, $\{\Theta_e\}, \{\dot{\Theta}_e\}$, e $\{\delta\Theta_e\}$ são valores nodais e não variam ao longo do elemento, de modo que também podem ser removidos da integral. Agora, desde que todas as quantidades são pré-multiplicadas pelo vetor arbitrário $\{\delta\Theta_e\}$, este termo pode ser deixado fora da equação resultante. Assim, a Equação 2.95 pode ser reduzida a:

$$[C_e^t] \{\dot{\Theta}_e\} + ([K_e^{tm}] + [K_e^{tb}] + [K_e^{tc}]) \{\Theta_e\} = \{Q_e\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\} \quad (2.96)$$

onde:

$[C_e^t]$ matriz de calor específico do elemento:

$$[C_e^t] = \rho \int_{\Omega_e} c \{N\} \{N\}' d\Omega_e \quad (2.97)$$

$[K_e^{tm}]$ matriz de condutividade por transporte de massa do elemento:

$$[K_e^{tm}] = \rho \int_{\Omega_e} c \{N\} \{v\}' [B] d\Omega_e \quad (2.98)$$

$[K_e^{tb}]$ matriz de condutividade por difusão do elemento:

$$[K_e^{tb}] = \rho \int_{\Omega_e} \{B\}' \{D\}' [B] d\Omega_e \quad (2.99)$$

$[K_e^{tc}]$ matriz de condutividade por convecção na superfície do elemento:

$$[K_e^{tc}] = \int_{\Gamma_2} h_f \{N\} \{N\}' d^2\Gamma_1 \quad (2.100)$$

$\{Q_e^f\}$ vetor de fluxo de massa do elemento:

$$\{Q_e^f\} = \int_{\Gamma_1} h_f \{N\} d^3\Gamma_1 \quad (2.101)$$

$\{Q_e^c\}$ vetor de fluxo de calor na superfície do elemento:

$$\{Q_e^c\} = \int_{\Gamma_1} h_f \{N\} \{N\}' \{\Theta_e\} d^3\Gamma_1 \quad (2.102)$$

$\{Q_e^g\}$ geração de calor no elemento:

$$\{Q_e^g\} \int_{\Omega_e} Q_b \{N\} d\Omega_e \quad (2.103)$$

Comentários e modificações das definições acima:

- $[K_e^{tm}]$ - não é simétrico.
- $[K_e^{tc}]$ é calculado como definido acima, para PLANE77 e PLANE82 somente. Todos elementos restantes usam uma matriz diagonal, com os termos diagonais definidos pelo vetor .
- $[C_e^t]$ é geralmente diagonalizada;
- Se $[C_e^t]$ existir e for diagonalizável e também a análise for transiente, $\{Q_e^g\}$ tem seus termos ajustados de modo que sejam proporcionais aos termos das diagonais principais de $[C_e^t] \cdot \{Q_e^j\}$. O vetor da taxa da geração do calor para aquecimento é tratado analogamente, se for considerado. Este ajuste assegura que os elementos sujeitos ao aquecimento uniforme tenham um aumento uniforme de temperatura. Entretanto, este ajuste muda também a entrada não uniforme da geração do calor para um valor médio sobre o elemento.
- Para problemas da mudança da fase, $[C_e^t]$ está avaliada pela curva de entalpia (TAMMA; NAMBURU, 1990), se esta for fornecida ao modelo.

2.9 Equilíbrio dos Elementos - Estrutural

Baseado ainda no sistema de coordenadas cartesianas ortogonais, sejam:

$\{S\}$ - o vetor de tensões:

$$\{S\} = \{S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{12}, S_{23}, S_{13}\} \quad (2.104)$$

$[D]$ - matriz elasticidade;

$\{\varepsilon^{el}\}$ - vetor de deformação elástica;

$\{\varepsilon\}$ - vetor de deformação total;

$\{\varepsilon^{th}\}$ - vetor de deformação térmica.

Então a relação entre tensões e deformações é dada pela expressão:

$$\{S\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (2.105)$$

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\} \quad (2.106)$$

Isolando-se o vetor de deformação total:

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1}\{S\} + \{\varepsilon^{th}\} \quad (2.107)$$

Da Equação 2.34, que descreve a expansão térmica:

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\} &= [D]^{-1}\{S\} + \underbrace{\{\varepsilon^{th}\}}_{\{\alpha(\Delta\Theta)\delta_{ij}\}} \\ \{\varepsilon\} &= [D]^{-1}\{S\} + \alpha(\Delta\Theta)\delta_{ij} \end{aligned} \quad (2.108)$$

onde:

α - coeficiente de dilatação térmica;

$\Delta\Theta$ - diferença de temperatura:

$$\Delta\Theta = \Theta - \Theta_{ref} \quad (2.109)$$

sendo que:

Θ_{ref} - temperatura de referência do material;

$[D]^{-1}$ - matriz de flexibilidade:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{yx}}{E_1} & -\frac{\nu_{zx}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{yz}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_3} & -\frac{\nu_{zy}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \quad (2.110)$$

onde:

E_i - módulo de Young na direção i ;

ν_{12} - coeficiente de Poisson principal;

ν_{21} - coeficiente de Poisson secundário;

G_{12} - módulo de cisalhamento no plano 12;

Para este trabalho, como o material é isotrópico, não faz diferença entre os módulos de Young (E_y), entre os coeficientes de Poisson (ν), e entre os módulos de cisalhamento (G).

portanto a matriz de flexibilidade torna-se para o material isotrópico:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_Y} & -\frac{\nu}{E_Y} & -\frac{\nu}{E_Y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E_Y} & \frac{1}{E_Y} & -\frac{\nu}{E_Y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E_Y} & -\frac{\nu}{E_Y} & \frac{1}{E_Y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \quad (2.111)$$

Das Equações 2.104, 2.108 e 2.111, tem-se:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \alpha \Delta \Theta + \frac{S_{11}}{E} - \frac{\nu S_{12}}{E} - \frac{\nu S_{13}}{E} \\ \varepsilon_y &= \alpha \Delta \Theta - \frac{\nu S_{11}}{E} + \frac{S_{22}}{E} - \frac{\nu S_{33}}{E} \\ \varepsilon_z &= \alpha \Delta \Theta - \frac{\nu S_{11}}{E} - \frac{\nu S_{22}}{E} + \frac{S_{33}}{E} \\ \varepsilon_{12} &= \frac{S_{12}}{G_{12}} \quad \varepsilon_{13} = \frac{S_{13}}{G_{13}} \quad \varepsilon_{23} = \frac{S_{23}}{G_{23}} \end{aligned}$$

Isolando as tensões no lado esquerdo da igualdade, matricialmente tem-se:

$$\begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2\nu^2 + \nu - 1} \left[\begin{Bmatrix} \nu - 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & \nu - 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & \nu - 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} + (1 + \nu)\alpha\Delta\Theta \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \right]$$

$$S_{12} = \varepsilon_{12}G_{12} \quad S_{13} = \varepsilon_{13}G_{13} \quad S_{23} = \varepsilon_{23}G_{23}$$

2.9.1 Derivação das Equações Matriciais

O Princípio dos Trabalhos Virtuais, PTV, afirma que uma pequena variação da energia interna, U , deve ser compensada por um valor idêntico de trabalho realizado pelas forças externas, V , isto é:

$$\delta U = \delta V \quad (2.112)$$

onde: δ representa uma pequena variação.

A energia interna $U = U_1 + U_2$, sendo:

- Energia de deformação interna U_1 :

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \int_{\Omega_e} \underbrace{\{\delta\varepsilon\}'}_{[D][\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\}]} \underbrace{\{S\}}_{[D][\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\}]} d\Omega_e \\ &= \int_{\Omega_e} \underbrace{\{\delta\varepsilon\}'}_{\delta\{u\}'[B]'\{u\}} [D] [\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\}] d\Omega_e \end{aligned} \quad (2.113)$$

Onde:

$[B]$ - é a matriz de relação entre deslocamento e deformação:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \quad (2.114)$$

$\{u\}$ - é o vetor deslocamento com relação ao sistema de coordenadas cartesiano adotado.

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \int_{\Omega_e} \delta\{u\}'[B]'\underbrace{[D]}_{[B]\{u\}} \left[\underbrace{\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\}}_{[B]\{u\}} \right] d\Omega_e \\ &= \int_{\Omega_e} \delta\{u\}'[B]'\underbrace{[D][B]}_{[B]}\{u\} d\Omega_e - \int_{\Omega_e} \delta\{u\}'[B]'\underbrace{[D]}\{\varepsilon^{th}\} d\Omega_e \end{aligned} \quad (2.115)$$

- Energia de deformação interna de movimento da superfície contra uma área com resistência distribuída, U_2 :

$$\delta U_2 = \int_{area_f} \delta\{w_n\}'\{S\}darea_f \quad (2.116)$$

Onde:

$\{w_n\}$ - movimento normal à superfície. Como $\{w_n\}$ é normal a superfície, então:

$$\{w_n\} = \{N_n\}\{u\} \quad (2.117)$$

onde $\{N_n\}$ é a matriz de forma para movimentos normais a superfície;

$\{S\}$ - tensão oferecida pela superfície;

$area_f$ - área da resistência distribuída;

Mas, se k é elasticidade por unidade de área, então pode-se escrever:

$$\{S\} = k\{w_n\} \quad (2.118)$$

e como k é constante para um material isotrópico, a Equação 2.116 é re-escrita como:

$$\begin{aligned} \delta U_2 &= \int_{area_f} \delta\{w_n\}'k\{w_n\}darea_f \\ &= k\delta\{u\}' \int_{area_f} \{N_n\}'\{N_n\}darea_f\{u\} \end{aligned}$$

Considerando a energia devido ao trabalho das forças externas: δV_1 , δV_2 e δV_3 .

- δV_1 devido a forças inerciais por unidade de volume:

$$\delta V_1 = \int_{\Omega_e} \delta\{w\}' \frac{\{F^a\}}{\Omega_e} d\Omega_e \quad (2.119)$$

onde:

$\{w\}$ - vetor deslocamento;

$\{F^a\}$ - vetor força resultante;

De acordo com a Segunda Lei de Newton:

$$F = ma \rightarrow \frac{F^a}{\Omega_e} = \rho \frac{\partial^2 \{w\}}{\partial t^2} \quad (2.120)$$

pode-se colocar o deslocamento em termos dos deslocamentos nodais:

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.121)$$

onde:

$\{N\}$ - matriz de funções de forma do elemento

$$\delta V_1 = -\delta\{u\}'\rho \int_{\Omega_e} [N]'[N]d\Omega_e \frac{\delta^2}{\delta t^2}\{u\} \quad (2.122)$$

- δV_2 devido a pressão;

$$\delta V_2 = \int_{area_p} \delta\{w_n\}'\{P\}darea_p \quad (2.123)$$

$\{P\}$ - pressão sobre a superfície do elemento;

$area_p$ - área na superfície do elemento sobre a qual atua a pressão.

$$\delta V_2 = -\delta\{u\}' \int_{area_p} \{N_p\}\{P\}darea_p \quad (2.124)$$

- δV_3 devido a forças nodais.

$$\delta V_3 = -\delta\{u\}'\{F_e^n\} \quad (2.125)$$

$\{F_e^n\}$ - vetor de forças aplicadas nos nós dos elementos.

$$\delta V_3 = -\delta\{u\}'\{F_e^n\} \quad (2.126)$$

Portanto das Equações 2.112, 2.115, 2.119, 2.122, 2.124 e 2.126 resulta que:

O lado esquerdo da igualdade da Equação 2.112 fica sendo:

$$\begin{aligned} \delta\{u\}' \underbrace{\int_{\Omega_e} [B]'[D][B]d\Omega_e}_{[K_e]}\{u\} - \delta\{u\}' \underbrace{\int_{\Omega_e} [B]'[D]\{\varepsilon^{th}\}d\Omega_e}_{\{F_e^{th}\}} \\ + k\delta\{u\}' \underbrace{\int_{area_f} \{N_n\}'\{N_n\}darea_f}_{[K_e^f]}\{u\} = \end{aligned} \quad (2.127)$$

O lado direito da igualdade da Equação 2.112 fica sendo:

$$\begin{aligned} -\delta\{u\}'\rho \underbrace{\int_{\Omega_e} [N]'[N]d\Omega_e}_{[M_e]} \underbrace{\frac{\delta^2}{\delta t^2}\{u\}}_{\{\ddot{u}\}} + \delta\{u\}' \underbrace{\int_{area_p} \{N_p\}\{P\}darea_p}_{[F_e^{pr}]} \\ + \delta\{u\}'\{F_e^n\} \end{aligned} \quad (2.128)$$

Re-escrevendo as Equações 2.127 e 2.128 juntas novamente:

$$([K_e] + [K_e^f])\{u\} - \{F_e^{th}\} = [M_e]\{\ddot{u}\} + \{F_e^{pr}\} + \{F_e^{nd}\} \quad (2.129)$$

$[K_e]$ - matriz de rigidez do elemento;

$[K_e^f]$ - matriz de rigidez da base do elemento;

$\{u\}$ - vetor deslocamento nodal;

$\{F_e^{th}\}$ - vetor de carregamento térmico do elemento;

$[M_e]$ - matriz de massa do elemento;

$\{\ddot{u}\}$ - vetor aceleração;

$\{F_e^{pr}\}$ - vetor pressão aplicada ao elemento;

$\{F_e^{nd}\}$ - forças nodais aplicadas no elemento.

Desta forma é possível se calcular as tensões e deformações nos pontos de integração dos elementos combinando-se as Equações 2.106 e 2.114:

$$\{S\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (2.130)$$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \quad (2.131)$$

3 Modelagem com Ansys

O pacote comercial ANSYS® possui ferramentas que permitem ações interativas (através do *ANSYS-Interactive*) ou executadas em forma de um programa em lote parametrizado (*Ansys Parametric Development Language-APDL*), ou ainda com desenvolvimento de interfaces gráficas para o usuário final. Para maiores detalhes pode-se consultar o tópico ”*Organization of the ANSYS Program*” do *Operations Guide* de ANSYS (2001).

O APDL é um recurso de programação disponível e utilizado neste trabalho devido ao seu potencial e a sua facilidade de uso. Apesar de muitos recursos do *ANSYS-Interactive* ainda não estarem disponíveis ou acessíveis na versão corrente do ANSYS, conforme descrito em *APDL Programmer’s Guide* de ANSYS (2001), a programação em *batch* auxilia bastante o processo de modelagem e análise, principalmente quando há procedimentos repetitivos a serem implementados.

O ANSYS possui recursos que atendem a busca de solução para problemas de engenharia através do método dos elementos finitos. Possui, também, inúmeros recursos computacionais para as etapas da modelagem, análise e pós-processamento dos resultados.

Pelo número de tipos de modelagens e de análises que é capaz de executar, muitos de seus recursos possuem uma documentação pouco detalhada e aprofundada. Existem muitos valores e condições de uso que não são explicitamente declarados em sua documentação para um melhor ajuste dos valores de parâmetros e seus efeitos nos resultados obtidos. Para estes recursos o ANSYS é, de certa forma, um sistema fechado. Portanto, há necessidade de além de desenvolver o modelo proposto, ter de efetuar avaliações dos resultados obtidos de forma criteriosa e analítica tanto quanto possível.

Antes de iniciar a descrição da modelagem é importante ressaltar que o programa em APDL aqui desenvolvido possui bastante flexibilidade sobre as grandezas físicas dimensionais, estruturais e térmicas envolvidas. Apesar de tratar de um caso particularizado da seção da barragem de Salto Caxias, o código fonte pode ser facilmente adaptado a outras estruturas executadas por deposição de camadas.

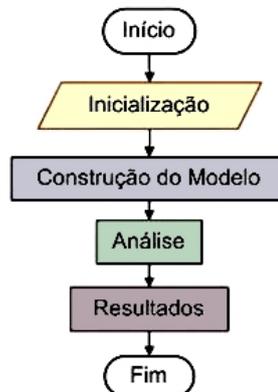
A necessidade de se flexibilizar a modelagem das estruturas e a fácil manipulação dos parâmetros envolvidos nas análises força a utilização de arquivos de dados independentes do programa fonte e a elaboração de alguns recursos de macroprogramação ¹ tornando assim o programa mais compreensível e modulável.

3.1 Etapas para a análise

Para se empregar o ANSYS é necessário seguir uma seqüência padronizada de macro-tarefas pré-definidas de acordo com o tipo de análise que se deseja executar.

Um extenso material é encontrado na sessão Basic Analysis Procedures Guide (ANSYS, 2001), o qual descreve as inúmeras possibilidades de análise através do Método de Elementos Finitos e a interface computacional. Na Figura 21 tem-se a representação esquemática da seqüência simplificada, mas representativa dos passos executados:

Figura 21: Fluxograma simplificado de análise.



Inicialização : elaboração de um modelo geométrico computacional, definindo forma, tamanho e posição das estruturas a serem analisadas. Os modelos podem ser representados através de elementos primitivos da geometria como pontos, linhas, curvas para definir as arestas e áreas, superfícies, volumes para definir as partes e interfaces entre os componentes das estruturas. Os tipos de elementos a serem empregados;

Construção do modelo : associação das propriedades dos materiais a cada componente estrutural, definindo as propriedades da malha de elementos finitos, e a geração da malha de elementos finitos; São informados os carregamentos a que o modelo está

¹Utilização de subrotinas e procedimentos para reduzir o tamanho do código-fonte

sujeito, as condições de contorno, as condições iniciais, a malha e aspectos de seu refinamento e distribuição, as propriedades dos materiais associados ao modelo, a ativação e desativação dos elementos e o tipo de análise.

Análise : determinação do campo de deslocamentos, dadas as condições iniciais e de contorno, para assim estabelecer a distribuição das tensões na estrutura.

Pós-processamento : obtenção dos resultados nodais nos pontos de interesse, gravação dos resultados em arquivos em forma de texto e gráficos; e processamento dos resultados para se efetuar sistematicamente a análise dos mesmos;

Esquemáticamente representado no macrofluxograma da Figura 22 fica mais claro quais são e em que etapa são executadas as operações descritas:

Nos itens seguintes são descritas mais detalhadamente a elaboração do modelo e a análise empregadas.

3.1.1 Inicialização e construção do modelo

Entende-se por inicialização um conjunto estruturado de dados e de procedimentos que definem:

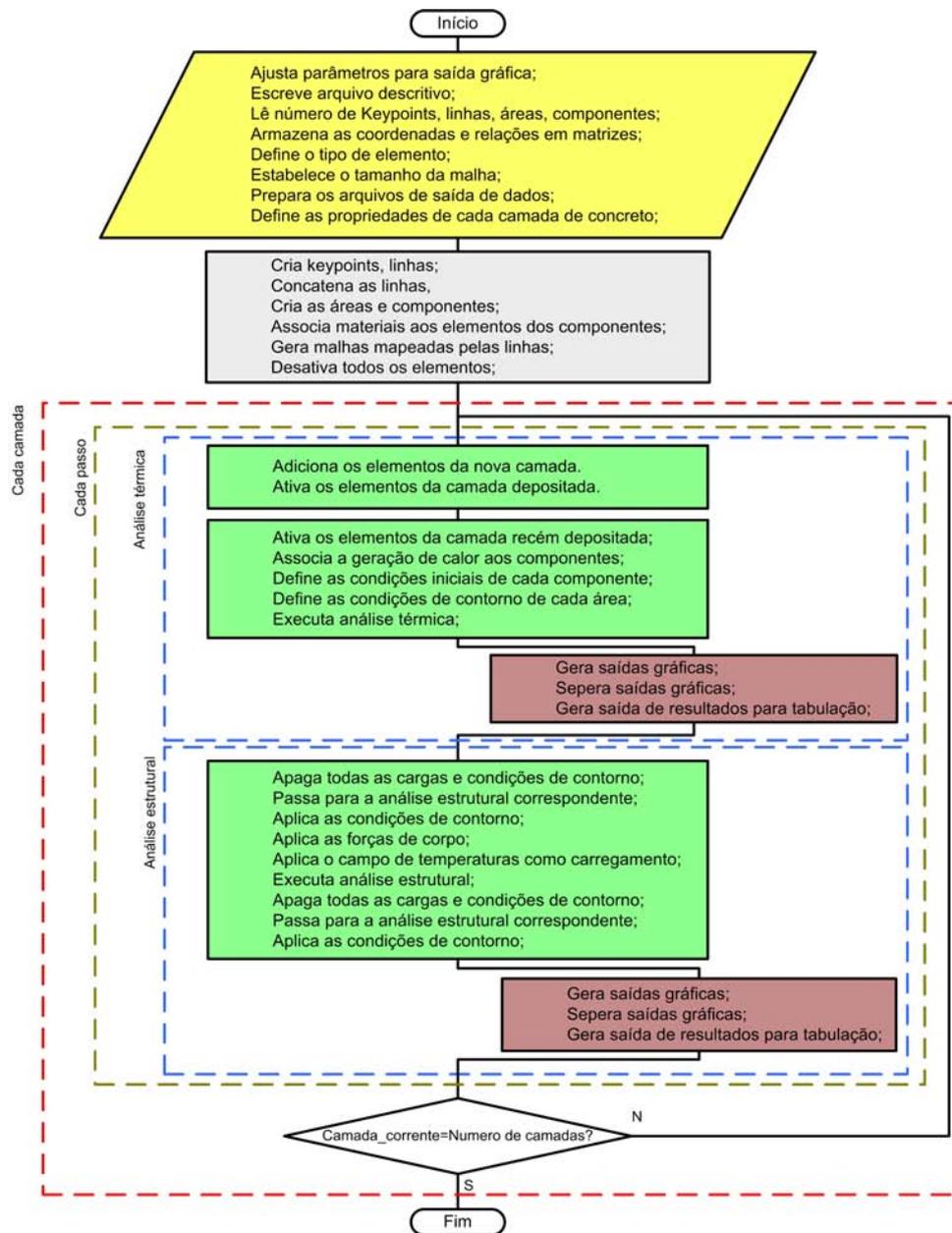
a modelagem matemática : descreve a inter-relação das grandezas envolvidas na análise do modelo;

Optou-se pela análise 2D, dando prosseguimento aos trabalhos de KRÜGER (2001) e de SILVA (2003). Objetivando comparar com resultados anteriormente obtidos. É importante lembrar que a modelagem 2D representa uma simplificação de análise onde se supõem não haver alterações das propriedades e dos resultados ao longo da dimensão desprezada; e que toda simplificação representa um desvio nos resultados obtidos pela análise assim feita com os valores obtidos em campo. Mas esta diferença torna-se aceitável a medida que a carga de trabalho computacional necessária para se chegar a um resultado aproximado sofre uma queda da ordem de 40% se comparada com as análises 3D.

o modelo geométrico : representa as dimensões físicas dos componentes do sistema analisado;

A geometria da estrutura a ser analisada foi decomposta em uma subconjuntos de entidades geométricas (componente, área, linha, pontos), para que se possa ter um

Figura 22: Fluxograma simplificado do programa elaborado neste trabalho.



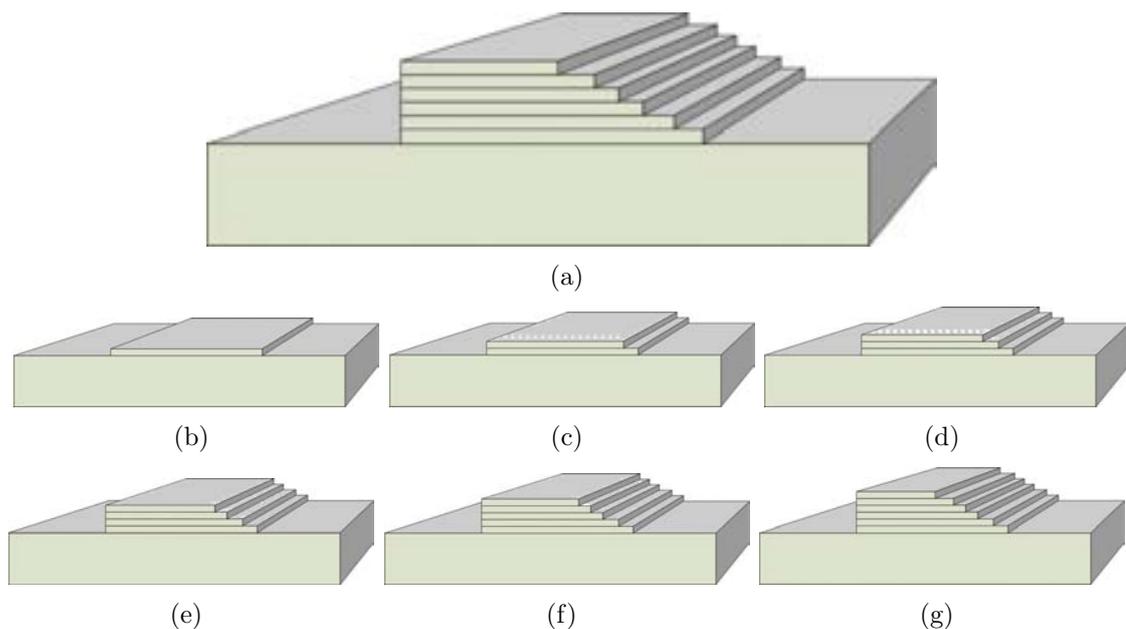
controle sobre as propriedades nelas aplicadas, como já empregada por KRÜGER (2001) e por SILVA (2003).

o elemento : é a discretização do modelo matemático, seus parâmetros e suas propriedades. O elemento é escolhido de acordo com o modelo matemático desenvolvido a partir da análise que se deseja efetuar, considerando-se as simplificações e as condições iniciais e as condições de contorno a serem adotadas. Como o modelo analisado é termo-estrutural desacoplado, selecionou-se o elemento que pudesse transpor o campo de temperaturas da análise térmica como cargas na análise estática estrutu-

ral.

Uma característica importante a ser considerada no modelo é o andamento da obra, isto é, a deposição de camadas sucessivas para se compor a estrutura em seus diversos estágios de acordo com o cronograma estabelecido em projeto. Para a metodologia desenvolvida por (KRÜGER, 2001) é importante que o modelo fornecido ao ANSYS tenha a matriz de rigidez de toda a estrutura já definida antes da análise. Utilizou-se o recurso do *Birth & Death*² para representar a deposição de camadas de concreto, apesar de utilizar o recurso de forma inversa, isto é desativando inicialmente os nós dos elementos das camadas não lançadas e ativando-os a medida que o modelo necessite em suas análises (KRÜGER, 2001). As Figuras 23 a a f esquematizam a construção da estrutura completa para a geração de toda a malha (a), e as demais figuras a ativação/uso das camadas depositadas nas análises efetuadas.

Figura 23: Ativação dos elementos correspondentes às camadas.



o material : são os valores das grandezas físicas e propriedades atribuídas aos elementos.

Uma característica desejada para o elemento é a possibilidade de se alterar suas propriedades, em particular o módulo de elasticidade, uma vez que, neste trabalho,

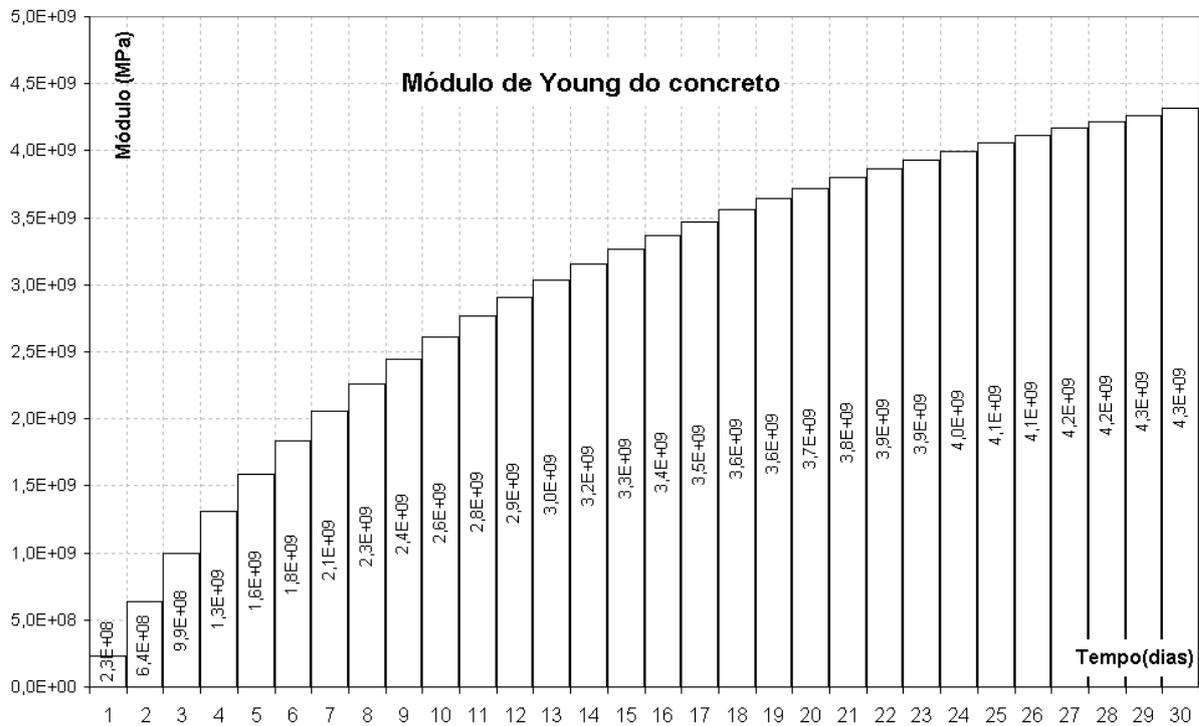
²Desenvolvido para se modelar estruturas em escavações, onde o material é retirado para se formar as cavidades. Obviamente o material removido não têm mais influência na análise estrutural, e portanto a contribuição do campo de deslocamentos referentes aos nós a ele associados deve ser desconsiderada. No ANSYS isto é feito através de uma técnica denominada *Birth & Death*, em que as componentes da matriz de rigidez referentes a estes nós são pouco ponderadas utilizando-se fatores multiplicativos de redução (desativação).

o concreto tem um processo de encruamento para o período considerado para sua análise. a Figura 24 apresenta a variação do módulo de elasticidade do concreto empregando-se a formulação obtida do trabalho de ANDRADE (1997).

$$E = \frac{d}{2.12 \times 10^{-3} + d0.162 \times 10^{-3}} 10^6 MPa \quad (3.1)$$

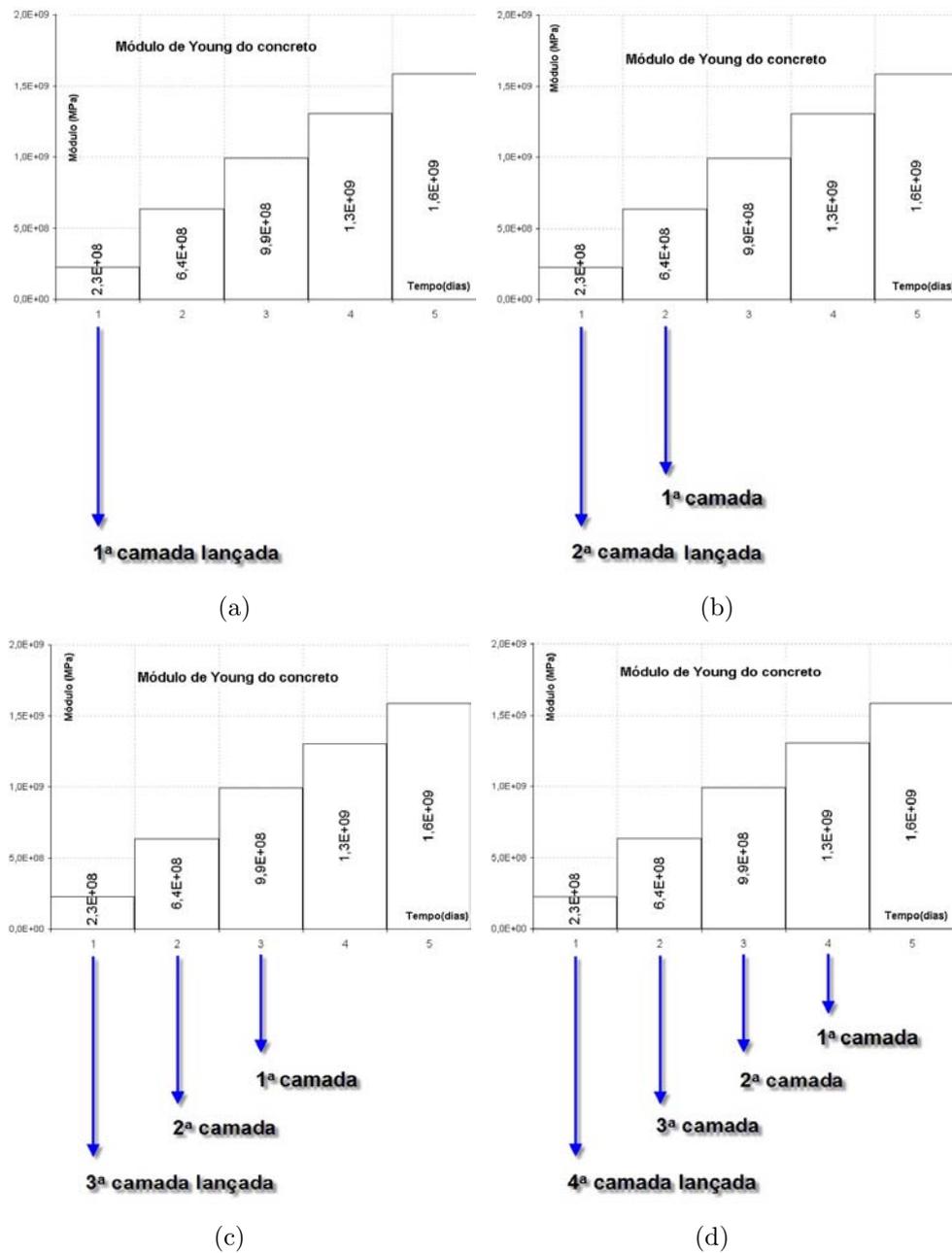
onde d é o tempo transcorrido em dias.

Figura 24: Variação do Módulo de Elasticidade do concreto durante a análise.



A Figura 25 apresenta, para o lançamento das 4 primeiras camadas, como são atualizados os módulos de elasticidade do concreto a medida que o concreto é depositado considerando-se intervalos de 1 dia. A Figura 25a representa o lançamento da primeira camada com módulo de elasticidade médio calculado com $d = 0.5$ pela Equação 3.1. No momento em que a segunda camada pe lançada o módulo de elasticidade do concreto da primeira camada é atualizado para $d = 1.5$, como indicado na Figura 25b. O concreto da segunda camada, por ser um concreto recém lançado, é definido com $d = 0.5$. A medida que o tempo transcorre no modelo analisado os módulos dos concretos de cada camada são atualizados como apresentados nas Figuras 25c e d.

Figura 25: Alteração do módulo de elasticidade das 4 primeiras camadas



a **malha de elementos finitos** : são os atributos que definem o tamanho, a forma, e a distribuição da malha;

- A malha gerada não pode ser muito refinada, devido a relação entre as dimensões das camadas (30cm de altura) e da estrutura modelada como um todo ($\approx 45\text{m}$ de comprimento x 220m de altura), o que produz um modelo computacionalmente volumoso (colocar mais que um par de elementos para a altura de cada camada pode gerar arquivos de pelo menos 1Gb para a secção

parcial do bloco 8 de Salto Caxias);

- Por outro lado não se pode simplesmente aumentar o tamanho dos elementos, pois afetaria a exatidão dos resultados;
- Existe também uma relação entre a altura e comprimento do elemento que devem ser satisfeitos para que não se tenha problemas de convergência dos resultados.

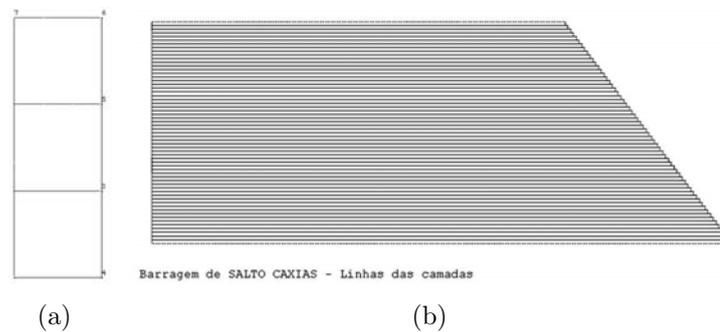
Pode-se mostrar que o emprego de pelo menos 2 elementos na altura de cada camada produziriam uma aproximação melhor que empregar apenas um único elemento.³

Para se iniciar o modelo geométrico é necessário escolher a seção a ser modelada, criar as geometrias associadas a cada camada, e exprimir a seqüência de lançamento das camadas de seu processo construtivo através de sucessivas ativações de seus elementos geométricos (componentes). A seção da estrutura define o contorno da geometria e a seqüência de lançamento estabelece o número de camadas, o instante de lançamento, as camadas que são ativadas, e suas respectivas condições de contorno e condições iniciais. Como dito anteriormente, a metodologia permite definir e elaborar modelos com muita flexibilidade, e a seguir são apresentadas algumas das geometrias possíveis:

- o modelo representado na Figura 26a-b, utilizado por KRÜGER (2001) para estudo do modelo térmico e por SILVA (2003) no modelo termo-estrutural. A Figura 26a representa a geometria simplificada de 3 camadas de concreto foi empregado para se compreender os mecanismos disponíveis no programa ANSYS e assim efetuar as primeiras modelagens e análises. Esta geometria foi empregada por SILVA (2003) para se implementar as primeiras análises termo-estrutural utilizando a metodologia do *Birth-Death*. A Figura 26b representa a Fase 1 e 2 da construção da seção parcial do bloco 08 da barragem de Salto Caxias. Esta geometria foi empregada para as análises térmicas efetuadas por KRÜGER (2001).
- Outras possíveis geometrias apresentando formas construtivas alternativas para o lançamento de camadas são apresentadas nas Figuras 27 e 28; e mesmo para processos construtivos que podem ser aproximados por um modelo 2D (Figura 29).

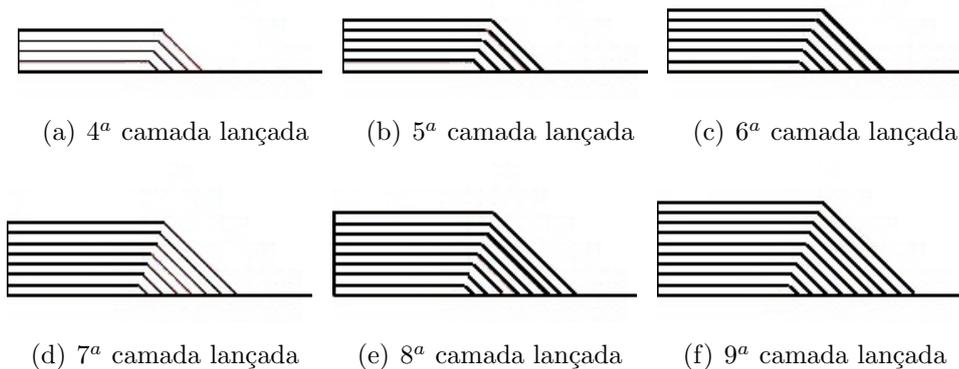
³Por exemplo, uma malha em que cada camada tivesse apenas um único elemento linear, ao receber as condições de contorno e as condições iniciais, teria de desenvolver o gradiente vertical de temperaturas apenas entre dois nós. O motivo é explicado pela aplicação das condições de contorno de cada camada recém lançada: se houver apenas um único elemento para a altura da camada, os nós inferiores receberiam as cargas térmicas da camada previamente lançada e os nós superiores as condições iniciais (temperatura ambiente), não restando nós intermediários para se desenvolver o gradiente de temperatura dentro de cada elemento.

Figura 26: Alguns modelos geométricos possíveis.



No caso da secção apresentada na Figura 27 pode-se diminuir o uso do concreto convencional na jusante como molde das camadas depositadas. A

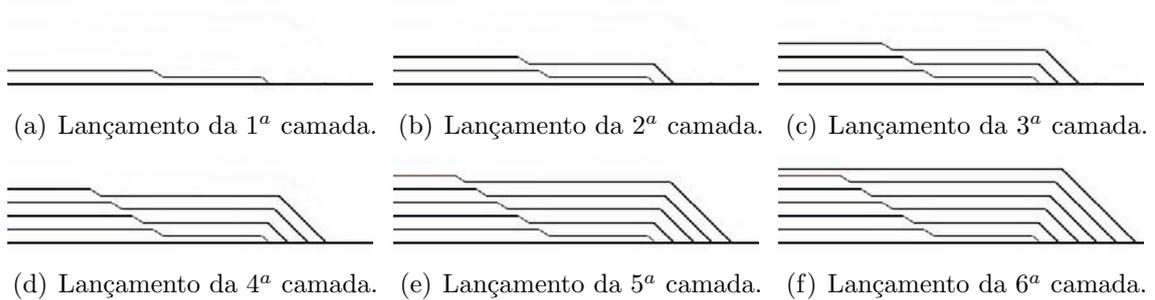
Figura 27: Outras geometrias e técnicas construtivas possíveis (1)



A Figura 28 apresenta uma geometria que possibilita o aumento da altura das camadas em cada etapa. A parte da camada próxima a montante pode ser mais espessa devido aos moldes utilizados, por exemplo, os de concreto. Desta forma pode-se agilizar o processo construtivo e diminuir o uso de moldes na jusante.

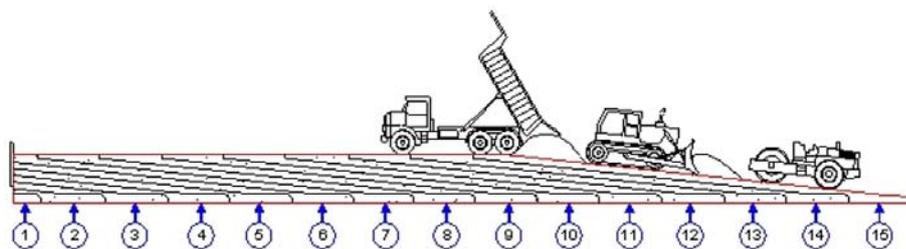
Uma outra possibilidade de geometria é a apresentada na Figura 29, que foi utilizada por KRÜGER et al. (2004) para pequenas barragens. É uma técnica em que as camadas de concreto são depositadas obliquamente, e em camadas mais espessas que as do CCR. As camadas modeladas na referida figura possuem altura de aproximadamente 2,0 m o que representa 7 camadas de 30 cm de altura. O fato de se trabalhar com o lançamento oblíquo permite o emprego de uma quantidade maior de massa de concreto num mesmo intervalo de tempo quando comparado

Figura 28: Método escalonado (2)

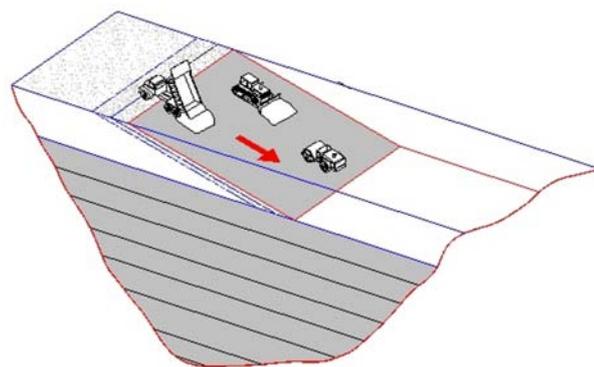


com o CCR. O processo então é limitado agora pela capacidade de produção da massa da construtora e pelos maquinário disponível para se trabalhar com a massa de concreto lançada.

Figura 29: Pequenas barragens método rampado (3)



(a) lançamento das camadas

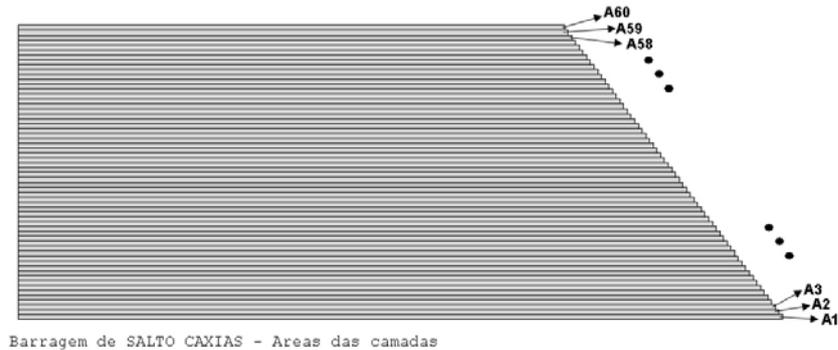


(b) construção da barragem com método rampado

Para se modelar o lançamento das camadas na análise é necessário ativar os elementos associados a camada recém lançada. Portanto cada camada é subdivida em áreas, como apresentada na Figura 30. Estas áreas, contínuas ou não, possuem as mesmas propriedades materiais, condições iniciais e podem possuir os mesmos parâmetros nas

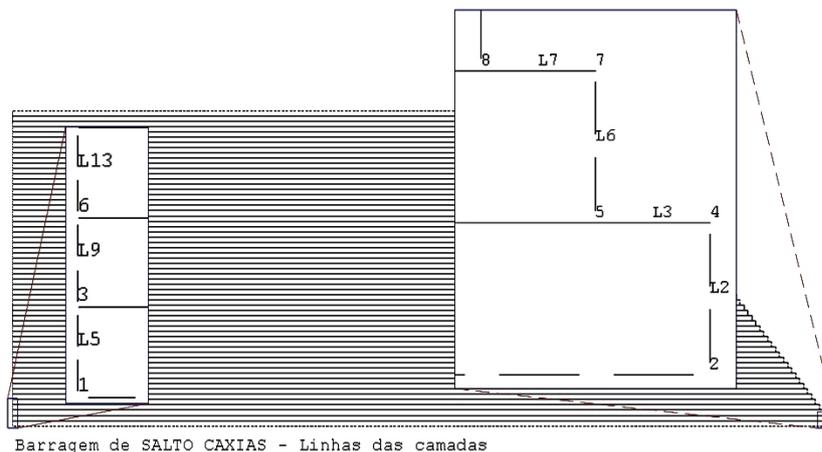
mesmas condições de contorno. Para se ter um controle sobre estas características é necessário sistematizar a geração destas áreas, das linhas que as compõem, e dos pontos que definem as extremidades das linhas.

Figura 30: Camadas definidas pelas áreas A1 a A60



A Figura 31 mostra nos destaques o número dos *Keypoints* e as linhas L2, L3, L6, L7 e L5, L9 e L13 a eles associadas. A sistematização de criação das linhas permite criar um programa para aplicar ou remover as condições de contorno e as condições de convexão de calor nas superfícies expostas ao ar ambiente, e mesmo outros casos particulares como:

Figura 31: Áreas definidas pelas linhas

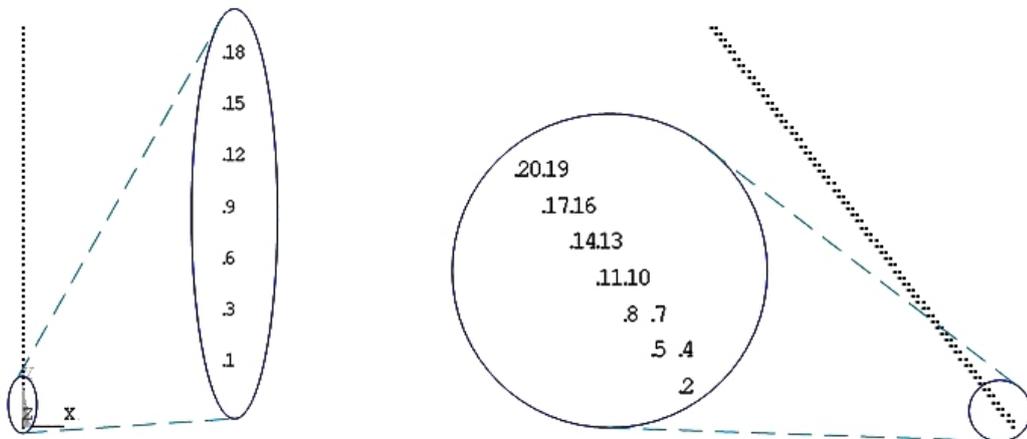


- a perda de calor pelas galerias de drenagem;
- o emprego do concreto convencional para moldar a pasta de concreto em camadas nos primeiros dias de cura;

- a aplicação de uma superfície isolante após a deposição de cada camada para evitar a perda de umidade até o instante da deposição da próxima camada; ou até mesmo da argamassa de ligação entre as camadas;
- a mudança do coeficiente de filme (convecção) em cada período analisado;
- o uso de outras formas geométricas;

A estruturação do programa inicia-se com a construção do modelo a partir de suas entidades mais simples que são os *Keypoints*, (Kp), que definem a posição geométrica das extremidades das linhas, das arestas, e conseqüentemente definem as áreas das camadas. A seqüência da numeração dos *Keypoints* é feita automaticamente pelo ANSYS e é necessário apenas apresentar suas coordenadas na ordem apropriada. Estas coordenadas são geradas em um planilha eletrônica e disponibilizadas ao módulo de modelagem geométrica.

Figura 32: Detalhe da geração dos *Keypoints*



Para se ter domínio quanto ao tamanho e à distribuição da malha gerada optou-se pelo controle de geração a partir das linhas de contorno de cada área. Desta forma garante-se a geração de pelo menos dois elementos para a altura de cada camada, como mostrado na Figura 33a.

Os materiais e suas propriedades são incorporados aos elementos de cada camada.

Neste ponto é importante lembrar que a análise estrutural aplicada é multilinear, as propriedades físicas variantes no tempo são calculadas e associadas ao instante corrente da análise. O módulo de elasticidade do concreto é alterado a cada lançamentos de camada, representando de forma simplificada a sua cura. Quanto à análise térmica, devido à geração de calor pela hidratação do cimento, ela é transiente e feita em vários passos

para que se possa acompanhar a evolução do campo de temperaturas e a distribuição das tensões associadas.

Figura 33: Elementos obtidos na geração da malha mapeada.

3534	3532	3530	3528	3526	3524	3317		
1678	1676	1674	1672	1670	1668	1666	2076	
2299	2297	2295	2293	2291	2289	2287	2079	
436	434	432	430	428	426	424	420	416
1631	1635	1639	1643	1647	1651	1655	1659	418
400	402	404	406	408	410	412	414	2

(a) Detalhe dos elementos gerados

Nota: Os números apresentados na Figura (a) correspondem a numeração dos nós correspondentes.

3.1.2 Análise do modelo

A análise é efetuada respeitando-se a evolução da construção da barragem na seção avaliada. A geometria do modelo é atualizada de acordo com a deposição das camadas, pois o ANSYS permite desativar ou ativar elementos do modelo de acordo com as necessidades da análise, tornando o processo de modelagem mais exato e realista. Na verdade, toda a geometria do modelo é definida previamente, permitindo que se controle a a posição e nomeação de cada entidade geométrica: áreas, linhas, pontos, elementos e nós. Assim, paralelamente ao modelo geométrico são elaborados arquivos com a designação dessas entidades e o valor das propriedades que devem ser impostos ao longo das análises parciais do modelo. As entidades desativadas têm o valor de sua participação ponderada por um fator que praticamente anula os efeitos de seus resultados e ações. O método de ativação e desativação de elementos é denominado de *Birth & Death*⁴.

O modelo da seção da barragem é primeiramente especificado como descrito anteriormente, e em seguida todos os elementos, com exceção daqueles associados à fundação, são desativados. A medida que as camadas de concreto são lançadas no modelo, seus elementos correspondentes são ativados. Desta forma seus nós e elementos são habilitados a contribuírem para o resultado da análise.

⁴Maiores detalhes em (ANSYS, 2001).

Para os elementos ativos definem-se as condições e as cargas térmicas aplicadas que são:

- a geração de calor aos elementos das áreas;
- a temperatura de lançamento (condições iniciais) nos nós da camada recém lançada;
- o coeficiente de filme (convecção de calor) aplicado às linhas correspondentes às superfícies expostas ao ar;
- a temperatura ambiente (condições de contorno) atribuída às linhas correspondentes às superfícies expostas ao ar;

A análise para a primeira camada é diferenciada das demais, mas o procedimento, em geral, é feito da seguinte forma:

- caracterizar os passos de carga;
- definir a forma de aplicação das cargas de *Stepped* ou *Ramped*;
- aplicar as cargas no contorno dos elementos e nos nós;
- selecionar um método de resolução (*Solver*);
- definir os critérios de performance desejados;
- efetuar a análise para se obter a distribuição de temperaturas.

Caso a camada seja posterior a primeira, ou já possua algum resultado térmico, basta acrescentar a leitura das cargas térmicas dos nós correspondentes da análise anterior como condição inicial. O que não ocorre com a primeira camada.

Para que o modelo agregasse as etapas mais significativas da geração de calor, isto é, dentro das primeiras horas, foi necessário considerar períodos de tempo compatíveis através da divisão da análise em intervalos menores de tempo⁵.

Como os intervalos de tempo entre lançamentos de camadas consecutivas atinge valores de até 125 horas é interessante sub dividir estes intervalos para que o modelo possa capturar de forma mais exata o efeito térmico da geração de calor e sua contribuição na análise estrutural.

⁵O ANSYS permite para as análise não lineares que um determinado carregamento em um determinado período (denominado de *STEP*) possa ser efetuado em várias etapas, as quais são denominados de *SUBSTEP*.

Esta subdivisão pode ser feita, por exemplo, adotando-se o mesmo período de tempo cujo valor seja um divisor comum a todas as camadas. Estes sub-intervalos são denominados de passos e são empregados em todas as análises paramétricas. Desta forma é possível se ter resultados das análises paramétricas nos mesmos instantes permitindo assim uma comparação efetiva dos resultados.

Optou-se pelo uso do processo de *STEPS* com a execução sequencial da análise térmica e estrutural em cada sub-intervalo, para se acompanhar a análise estrutural através da atualização das propriedades estruturais do concreto.

O *solver* foi escolhido de acordo com a capacidade da máquina utilizada (veja ANEXOS B.2 e B.3) para as análises e com as recomendações apresentadas por ANSYS (2001). Os métodos com *solvers* distribuídos (AMG(Algébrico Malha Multipla) e DDS) não foram possíveis de se implementar devido às características da licença do ANSYS e do programa de gerenciamento para este tipo de resolução.

Optou-se pelos métodos pré-condicionados do Gradiente Conjugado (PCG) e do Gradiente Conjugado de Jacobi (JCG). O método PCG é de 4 a 10 vezes mais rápidos que o JCG para modelos sólidos, aumentando a eficácia da resolução do problema para modelos que demandam muita carga computacional. Mais especificamente foi escolhido o *solver* PCGOUT, que trabalha como o PCG, mas ao invés de armazenar as matrizes pré-condicionadas na memória, o método as coloca no disco rígido para se liberar mais memória do equipamento. O que torna o método um pouco mais lento que o PCG puro para modelos pequenos e médios, e mais veloz para grandes modelos.

Métodos Algébricos Iterativos (AMG) não são recomendados para este tipo de problema. Métodos iterativos automáticos, como ITER, não estão disponíveis para os elementos térmicos na versão do programa utilizado. No ANEXO B.3 é transcrita a tabela de seleção de *Solvers* de acordo com o tamanho do modelo, e a necessidade de memória e espaço livre em disco rígido.

3.1.3 Pós-processamento

O ANSYS possui uma grande variedade de formas para se extrair resultados da análise executada. As formas mais comuns são as seguintes:

- de listas;
- de tabelas;

- de gráficos;
- de animações;
- de dados para outros programas;

Neste trabalho os resultados das análises são comparados em função de um ou mais parâmetros. E apesar de todo potencial do ANSYS para apresentar os resultados, a comparação entre modelos diferentes não é executável de forma simples e direta. Portanto optou-se pela saída de dados na forma de dados tabelados em arquivos no formato texto ASCII para uma análise posterior em outros programas de manipulação e visualização gráfica.

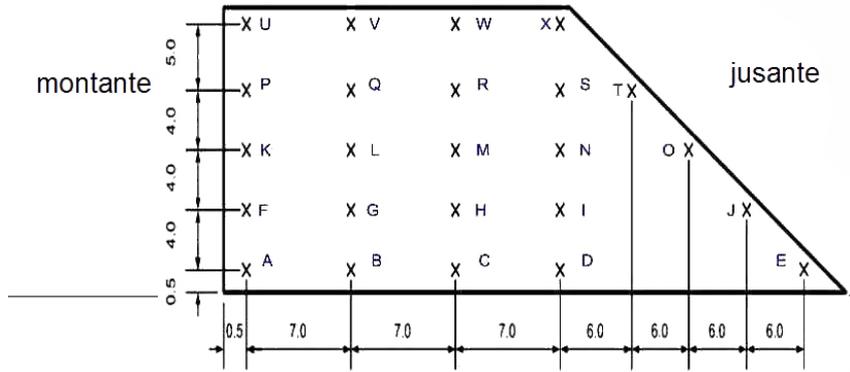
Os resultados coletados são valores de algumas grandezas monitoradas, apresentadas na Tabela 2 abaixo, em pontos da estrutura os quais foram selecionados nas proximidades das posições apresentadas na Figura 34a para o caso da estrutura parcial de Salto Caxias e nos pontos monitorados por termômetros na seção completa de Salto Caxias na Figura 34b.

Tabela 2: Grandezas monitoradas nos pontos selecionados

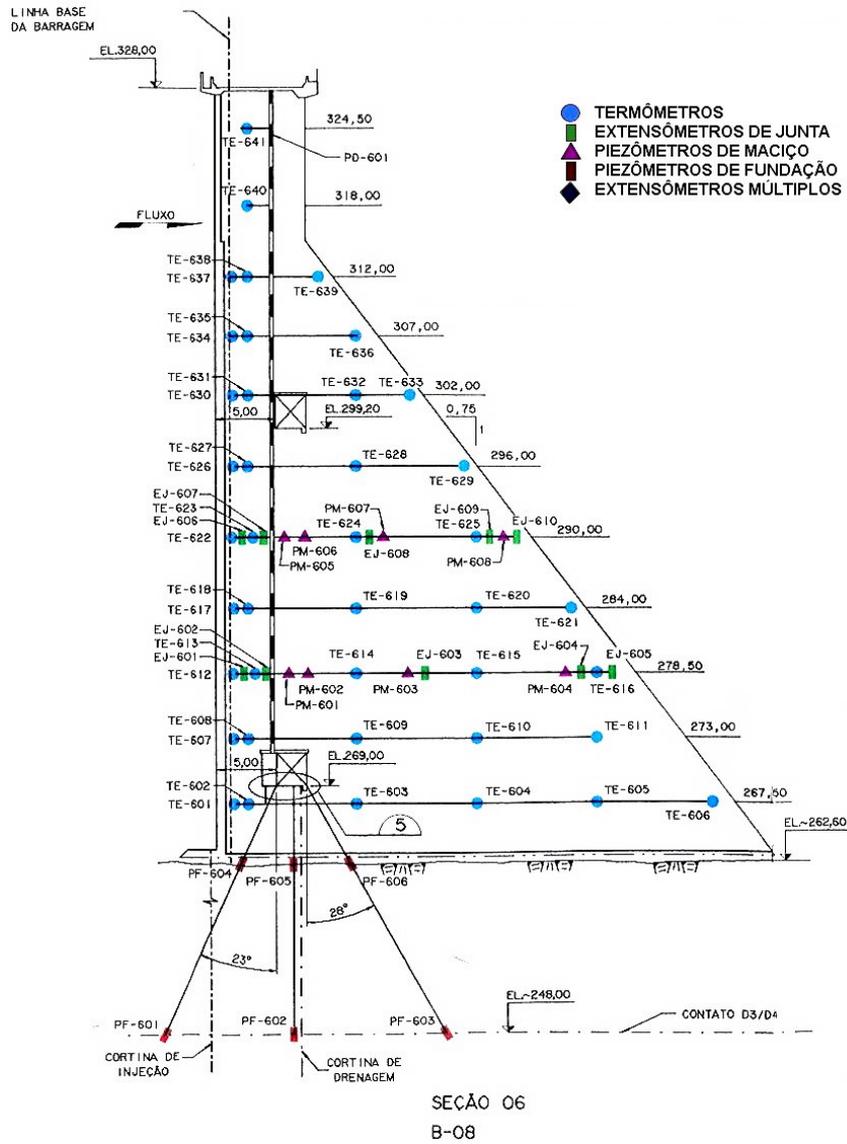
Tipo de análise	Térmica	Estrutural
Grandeza monitorada	T	$u_x, u_y,$ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3,$ S_x, S_y, S_z

É importante ressaltar que os valores apenas passam a ter algum significado físico quando o elemento correspondente ao nó monitorado se torna ativo. Pois quaisquer valores lidos antes da ativação dos elementos da camada tem valores espúrios (*dummies*) dentro do modelo, pelo simples motivo da camada de concreto associada a esta área ainda não estar depositada.

Figura 34: Pontos monitorados em Salto Caxias



(a) Seção parcial



(b) Seção completa

4 Análise Térmica Comparativa

Para a validação numérica da metodologia aplicada à análise térmica, é feito um conjunto de comparações com os resultados de modelos já comprovados e com dados de estruturas monitoradas. Após esta comprovação, a análise termo-estrutural será aplicada em um estudo paramétrico. Assim, o objetivo desse capítulo é a comprovação do funcionamento da metodologia para a análise térmica. A verificação é efetuada através das seguintes análises:

- Secção 4.1 análise de um modelo composto por três camadas comparando os resultados com os obtidos por KRÜGER (2001);
- Secção 4.2 análise da viga de concreto da casa de força da UHE Serra da Mesa comparando-se os resultados com os de ANDRADE (1997);
- Secção 4.3 análise térmica da secção simplificada de um bloco típico da barragem da UHE Salto Caxias e comparação com os valores de monitoramento.

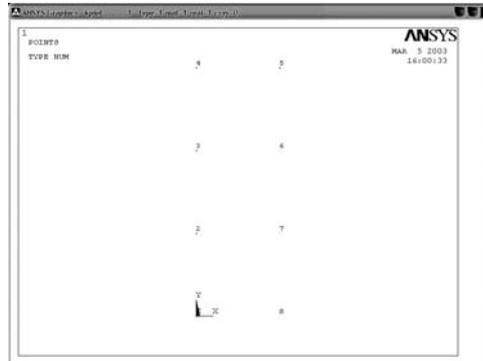
4.1 Modelo de 3 camadas

A partir de um modelo geométrico simples, realizou-se uma análise para verificar a metodologia implementada em linguagem APDL. O programa foi estruturado em módulos, para que se pudesse realizar análises em geometrias diversas e em condições iniciais e de contorno parametrizadas.

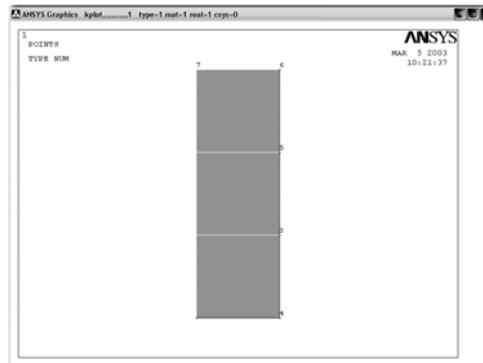
O modelo geométrico adotado é o mesmo utilizado por KRÜGER (2001) onde o comportamento térmico de uma estrutura de três camadas de concreto é feito através de elementos lineares quadrangulares e regulares, conforme apresentado na Figura 35. Na Figura 35a estabelece-se os pontos que definem a geometria das camadas; na Figura 35b os contornos que definem as áreas correspondentes a cada camada da estrutura, e em c são

gerados os elementos, que são então desativados, e re-ativados a medida que as camadas são lançadas (os elementos apenas da primeira camada são ativados na ilustração).

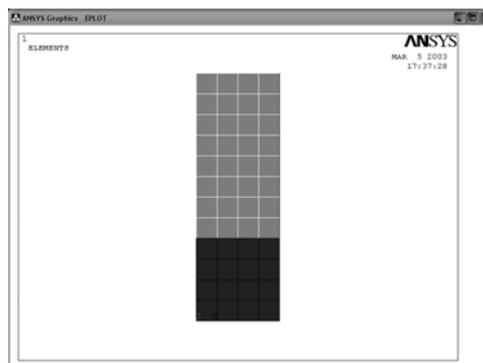
Figura 35: Modelo de validação



(a) Keypoints



(b) Áreas

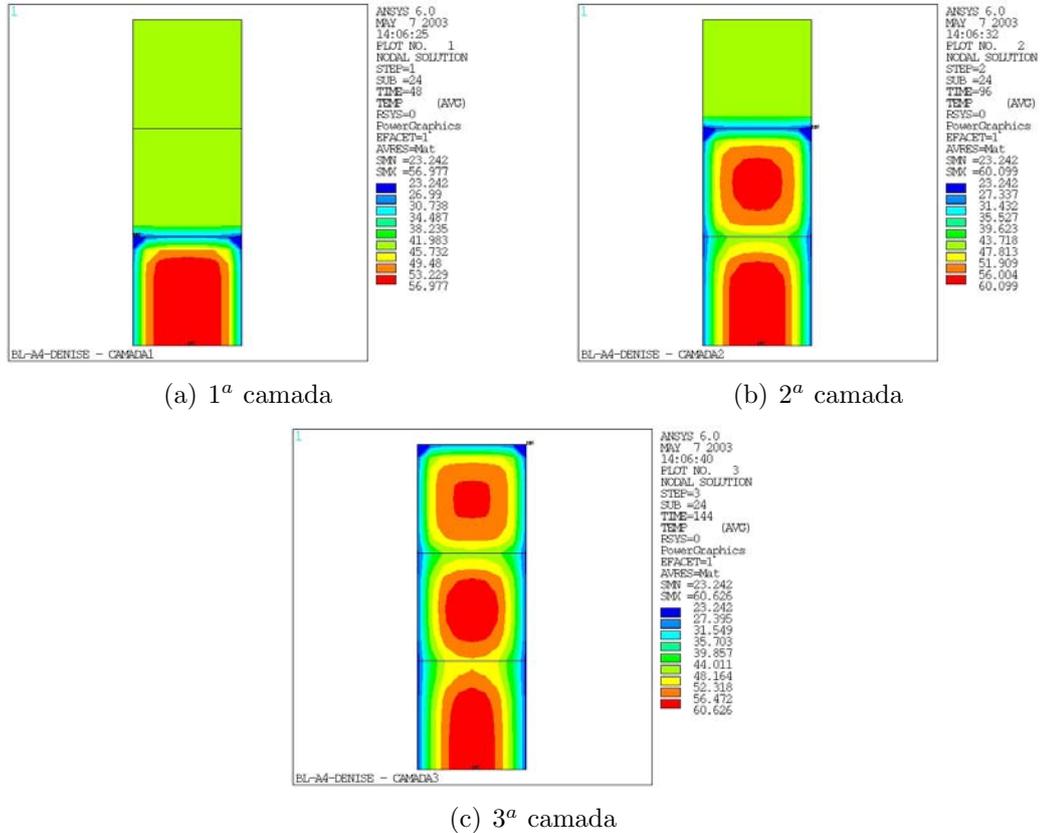


(c) Desativação de elementos

KRÜGER (2001) trabalha com passos de aplicação de carga para o modelo térmico, e aplica um *LoadStep* em um tempo reduzido para caracterizar as condições de contorno e de carregamento antes do início da análise de cada camada de concreto. Neste trabalho, optou-se por se estabelecer as condições iniciais, para as camadas posteriores a primeira, através da leitura de valores de temperatura da análise prévia. O que de certa forma agiliza o processamento pois não há a necessidade de se realizar uma análise

prévia, mesmo que imediata e simples, para aplicar tais condições.

Figura 36: Resultados do modelo de validação



Os resultados da distribuição de temperaturas nas diversas camadas são apresentados nas Figuras 36 a, b e c.¹ Monitorando-se os erros nos mesmos pontos de KRÜGER (2001) chegou-se a erros relativos inferiores a 1% para as temperaturas máximas e mínimas nos instantes finais das análises efetuadas.

4.2 Modelo Serra da Mesa

Esta seção compara os resultados obtidos com esta metodologia com os valores de uma estrutura real e com outras análises efetuadas sobre esta mesma estrutura. A estrutura escolhida foi a da viga de concreto da Casa de Força da Usina Hidrelétrica Serra da Mesa (ANDRADE, 1997).

¹Nestas figuras as camadas desativadas foram incluídas para mostrar que os nós dos elementos inativos tem temperaturas prescritas até o instante em que os respectivos elementos são ativados. Para um modelo pequeno como este isto não representa uma vantagem, mas ao se trabalhar com modelos de maior complexidade e tamanho diminui-se consideravelmente a carga computacional. Pois desta forma as temperaturas são prescritas nestes nós.

As propriedades do concreto convencional adotadas para a realização da análise térmica são:

- Massa específica: 2295 kg/m³;
- Calor específico: 1063 J/kg°C;
- Condutividade térmica: 8172 J/mh°C;
- Coeficiente de filme (convecção): 8374 J/m²h°C.²

Para as simulações foram adotadas, segundo ANDRADE (1997):

- temperaturas médias ambiente na região como sendo 25,5 °C e,
- temperaturas médias de lançamento do concreto de 27 °C.

A Figura 37 a apresenta os resultados da análise térmica a 504 horas do início do lançamento do concreto da primeira camada, com a análise efetuada em um modelo que representa a construção em um único lançamento. É importante perceber que há uma seta que indica o ponto de temperatura máxima na secção analisada no final da análise.

Apesar de não ser a maior temperatura alcançada pelo modelo, como pode ser constatado pelo gráfico da Figura 37b, o qual indica que a temperatura máxima ocorre em torno de 100 horas de concretagem, e que a partir daí a temperatura decresce devido a dissipação de calor ser maior que a geração de calor por hidratação dos componentes do cimento.

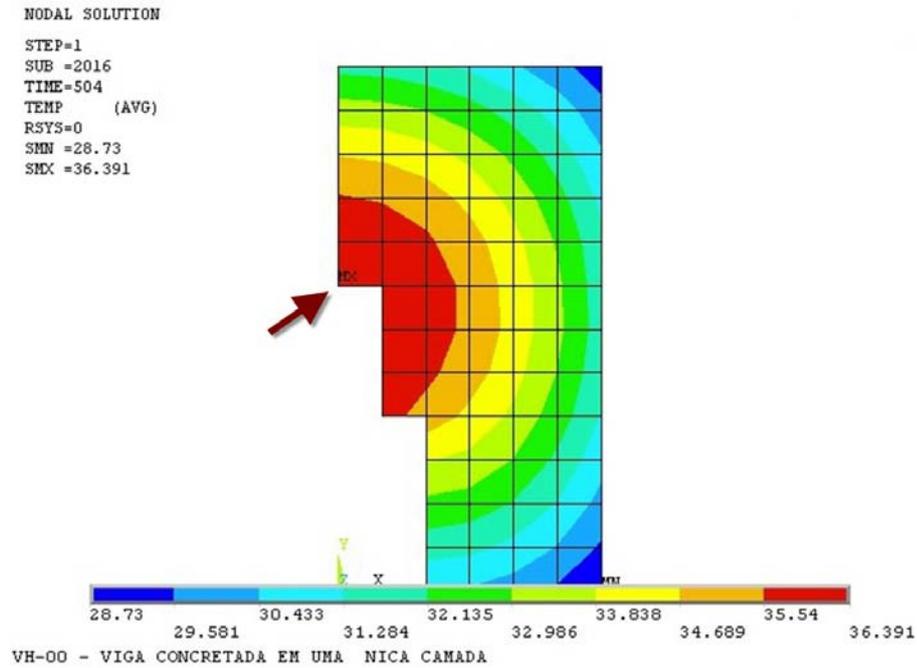
Outro ponto importante constatado é que a posição da região em que ocorre a temperatura máxima não sofre alteração significativa, pois as condições de contorno e a geração de calor já estão estabelecidas para toda a geometria.

Ao se efetuar a análise da estrutura de acordo com os aspectos construtivos, isto é, em camadas lançadas em diferentes instantes de tempo obtém-se a distribuição de temperaturas apresentadas na Figura 38. Para cada camada lançada a 72 (a), 168 (b), 336(c), e 504 horas (d) foi feito um gráfico com os resultados da distribuição de temperaturas. A cor branca representa a temperatura do ar com a camada superior ³.

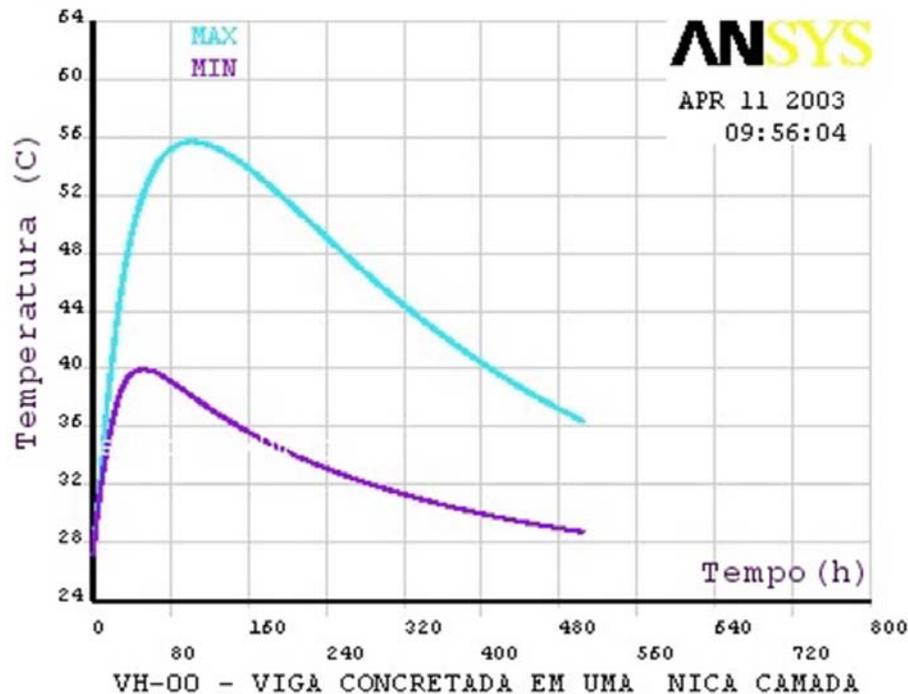
²não foi considerado a condução na parede da forma.

³Este artifício foi utilizado apenas para se representar a temperatura do ar nos resultados gráficos. É importante ressaltar que pela técnica do *Birth-Death* os valores assumidos pelos nós dos elementos nas camadas inativas não influenciam os resultados das análises.

Figura 37: Evolução das temperaturas na viga de Serra da Mesa em bloco-único



(a) Bloco único - temperaturas a 504 horas

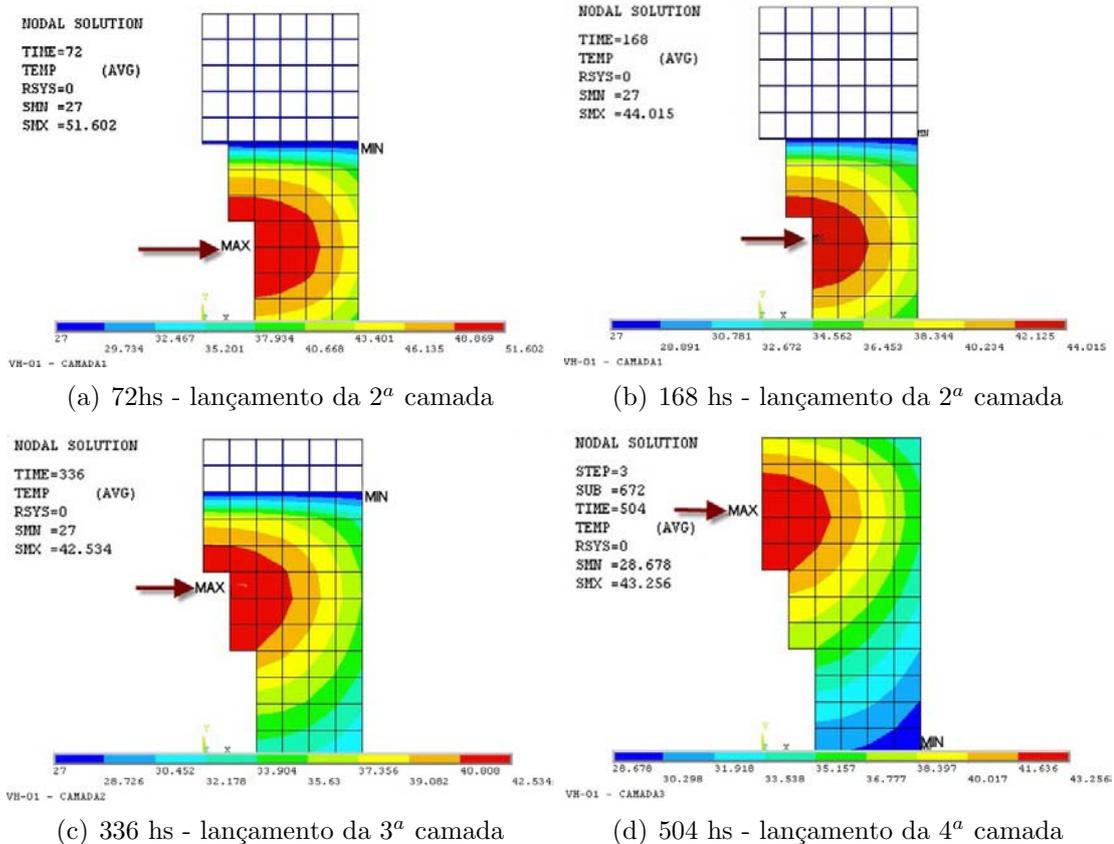


(b) Evolução das temperaturas máxima e mínima

Fonte: Adaptado de (LACERDA et al., 2003)

É importante notar que a temperatura máxima final atingida na metodologia de análise proposta é maior que na análise tradicional representando um único lançamento do concreto. Respectivamente $43.256\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $36.391\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo portanto a diferença de 6.865

Figura 38: Evolução das temperaturas na viga de Serra da Mesa - em camadas



Fonte: Adaptado de (LACERDA et al., 2003)

°C na temperatura máxima obtida.

Através da Figuras 38 a-d é possível além de acompanhar a distribuição do campo de temperaturas perceber que ocorre um deslocamento vertical para cima do ponto de máxima temperatura ao se empregar o modelo que leva em conta as camadas. Os pontos em que ocorreram a temperatura máxima estão indicadas pelas setas nas figuras.

Procurou-se aplicar as condições iniciais e de contorno semelhantes para a análise em camadas como para a análise tradicional. Entretanto não é possível aplicar exatamente as mesmas condições para as duas análises, dado que na metodologia proposta a geometria do modelo é atualizada de acordo com o processo construtivo, enquanto a análise tradicional não leva este fato em consideração.

Conclui-se desta análise que as conclusões obtidas por ANDRADE (1997) sobre a necessidade de se representar os aspectos construtivos em uma análise térmica é uma questão que não pode ser desconsiderada.

Nos resultados obtidos observaram-se diferenças inferiores a 5%, quando compa-

rados com aqueles obtidos por KRÜGER (2001). Isto se deve a forma de realização da simulação e do número de passos de carregamento (*sub-steps*) utilizados ⁴.

4.3 Modelo da Secção Parcial da Barragem da UHE Salto Caxias

Nessa seção, as análises estão focadas na seção transversal parcial da barragem de Salto Caxias já descritas no primeiro capítulo na subseção 1.1.

Para as análises foram considerados os valores médios das temperaturas do concreto lançado e da temperatura média do ar no entorno, conforme variação indicada no gráfico da Figura 40. Estes valores foram obtidos a partir de monitoramento das condições no local, segundo as condições apresentadas por LACERDA et al. (2003), e são apresentados na Figura 39.

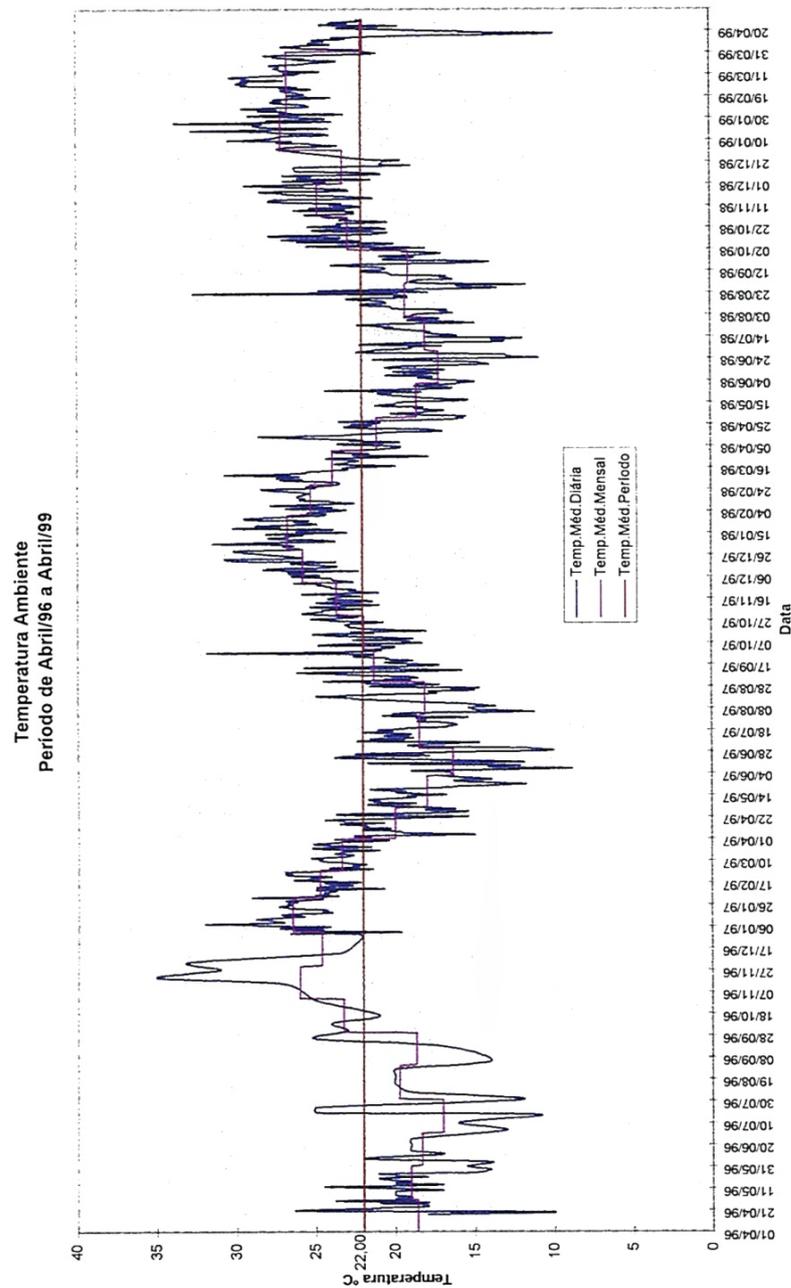
Os pontos monitorados na estrutura são os termômetros TE-601 próximo à superfície lateral, TE-603 e TE-604, no interior do maciço, indicados na Figura 41. Eles foram escolhidos por não estarem situados muito próximos à fundação o que diminui os efeitos dos gradientes de temperaturas devido ao fluxo de calor para o monólito sob a barragem.

Observa-se no gráfico da Figura 42 as curvas das temperaturas monitoradas na barragem construída por TE-601, TE-603 e TE-604 e, respectivamente, as curvas das temperaturas da análise efetuada em camadas, designadas por TE-601n, TE-603n e TE-604n. A linha vertical pontilhada indica o período das análises efetuadas nos estudos para este trabalho (intervalo de tempo de 720h). Os valores observados para tempos superiores a 720h foram feitos para se avaliar a evolução de seus valores de acordo com as medições efetuadas.

Utilizou-se o gráfico para o período inicial de 720h no qual as temperaturas foram monitoradas e comparadas para salientar que o modelo consegue indicar as mesmas tendências nas variações e valores das temperaturas. Graficamente, pode-se observar que as diferenças entre os valores monitorados e calculados são menores para os termômetros no interior do maciço, TE-603 e TE-604, do que para o termômetro mais próximo à superfície, TE-601. Mesmo assim, o termômetro TE-601 consegue, mesmo que um pouco defasado, reproduzir a oscilação da temperatura devida à variação da temperatura ambiente. No modelo, o valor do coeficiente de convecção de calor é assumido constante, tendo

⁴Por se tratar de uma análise não linear a influência dos *sub-steps* define a exatidão do resultado. No Anexo C é feita uma avaliação da influência do número de passos na temperatura final da análise térmica.

Figura 39: Temperatura ambiente monitorada.

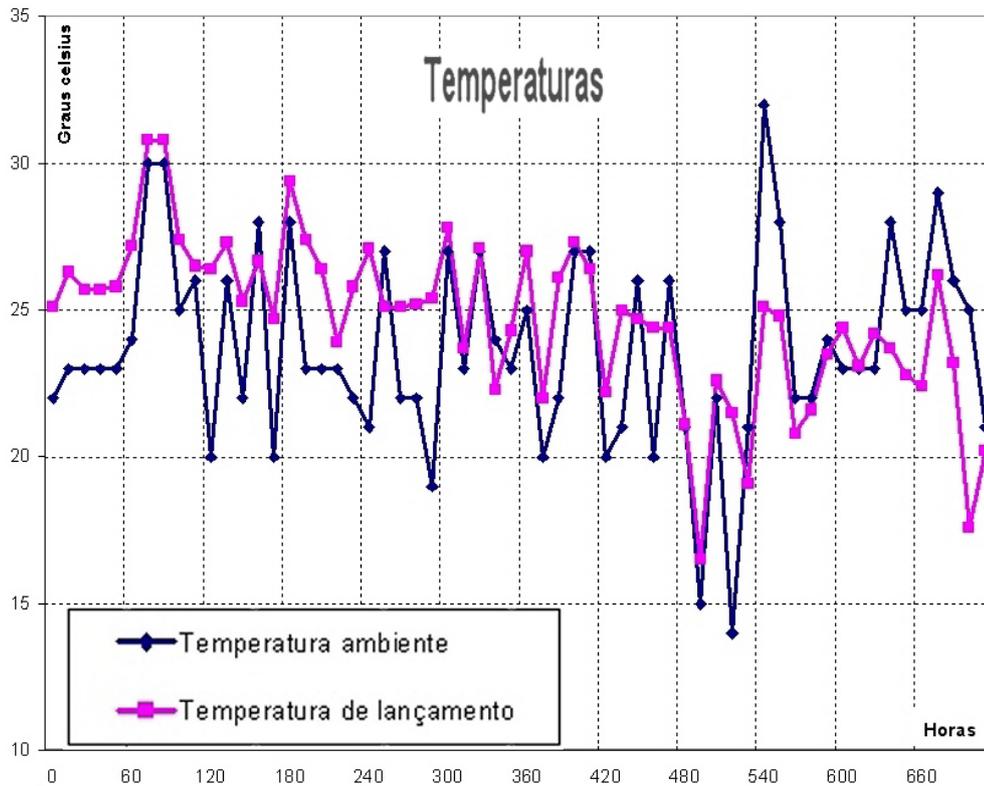


Fonte: Adaptado de LACERDA et al. (2003)

apenas os valores da temperatura do ar no entorno atualizados pode ser a causa principal do aumento crescente da diferença nos valores das temperaturas. Outras hipóteses simplificadoras como considerar as propriedades térmicas do concreto como invariantes no tempo podem ter levado a diferenças nos instantes e valores de temperaturas de pico no modelo.

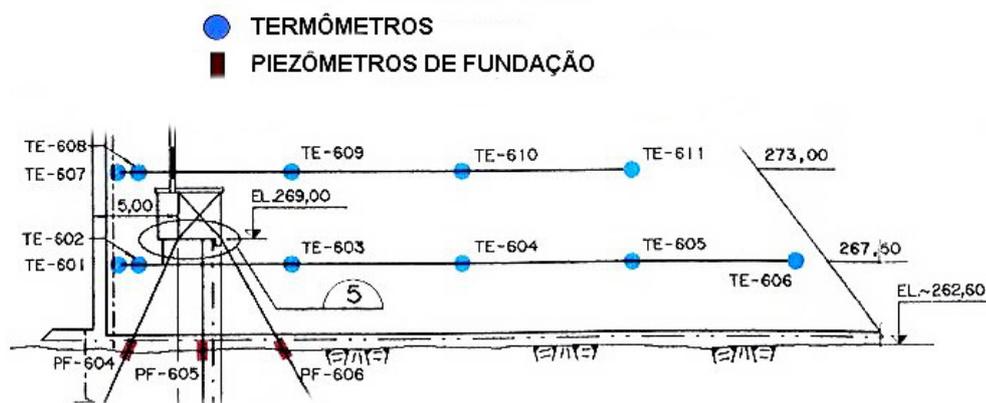
Os resultados posteriores a 720h no gráfico da Figura 42 mostra que o modelo proposto consegue obter valores de temperatura que tem a mesma tendência dos valores

Figura 40: Temperaturas de lançamento do concreto e do ar entorno



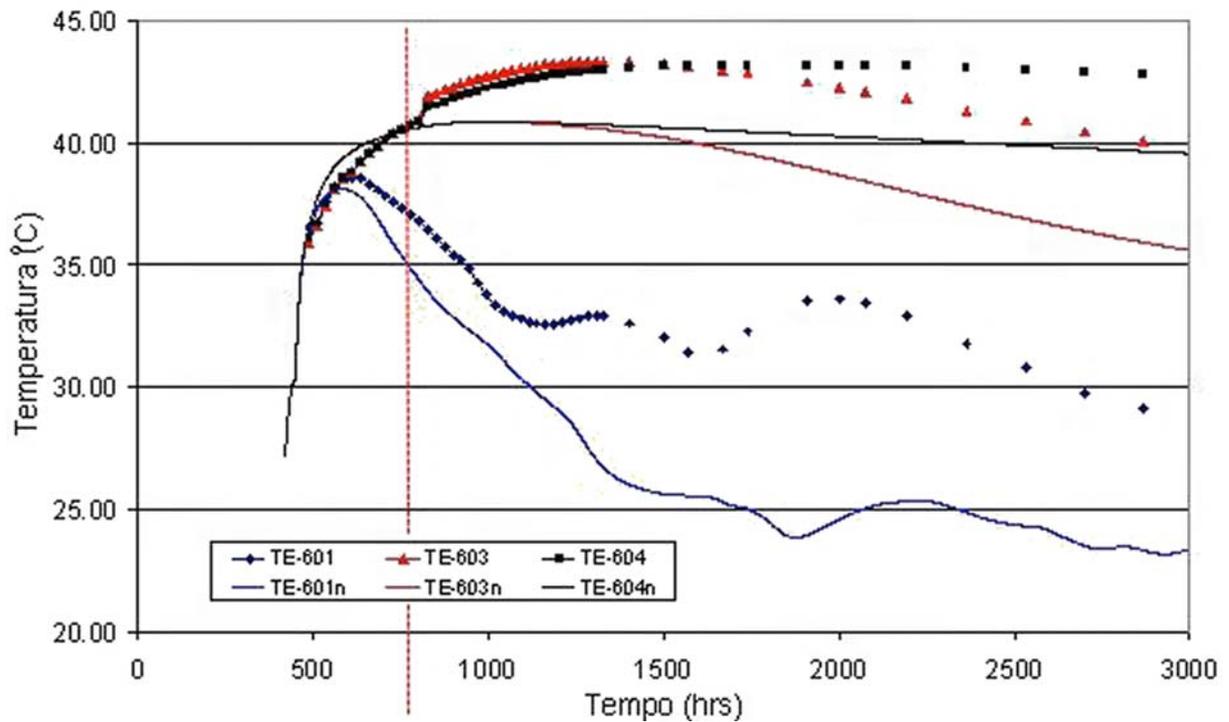
Nota: Os valores apresentados no gráfico são valores médios para intervalos de tempo de 12 horas.

Figura 41: Detalhe da localização dos sensores instalados



monitorados, apesar da diferença ser crescente a medida que o tempo passa. Tal diferença pode ser explicada através das hipóteses simplificadoras do modelo, já discutidas nesta seção. Possivelmente com o ajuste do modelo para parâmetros dinâmicos como o coeficiente de filme, e considerando influências como insolação e as amplitudes térmicas diárias

Figura 42: Comparação com as temperaturas monitoradas



Nota: Adaptado de (LACERDA et al., 2005).

pode-se diminuir consideravelmente esta diferença.

Acredita-se, portanto, que, pelos resultados obtidos, a metodologia é capaz de reproduzir os resultados de metodologias como as de KRÜGER (2001) e de estruturas monitoradas como os da seção da barragem de Salto Caxias mesmo após a fase de lançamento de camadas. Permitindo desta forma fazer avaliações mais detalhadas dos parâmetros que predominam nos resultados das análises térmicas mesmo considerando-se as simplificações adotadas para se obter os resultados.

5 Análises e Resultados da Metodologia por Camadas

Após a verificação da metodologia através da comparação com resultados de outros trabalhos de transferência de calor, este capítulo faz uma análise para se determinar quais os fatores que influenciam e predominam na distribuição do campo de temperaturas; e suas conseqüências na distribuição de tensões com os carregamentos térmicos obtidos.

Este estudo é fundamentado na seção parcial do bloco B-08 da barragem de Salto Caxias, correspondentes às fase construtivas I e II, com geometria simplificada (sem considerar as galerias na geometria da seção, e com lançamento de camadas contínuas em toda a extensão transversal da seção); é subdividido nas seguintes partes:

- Seção 5.1 - envolve a caracterização das propriedades do concreto de Salto Caxias, incluindo-se a geração de calor e a apresentação das condições iniciais e de contorno;
- Seção 5.2 - é feita uma comparação entre a metodologia tradicional (bloco único) e a proposta por este trabalho, em camadas, para a análise térmica;
- Seção 5.3 - apresenta-se a análise térmica paramétrica;
- Seção 5.4 - apresenta-se a análise dos resultados estruturais derivados das análises térmicas da seção anterior.

5.1 Modelo da Seção Parcial do bloco B-08 de Salto Caxias

As características do concreto utilizado foram levantadas sobre várias amostras moldadas com o concreto de mesma composição utilizada na obra e testadas para determinar as principais características térmicas e mecânicas. A Tabela 3 apresenta um resumo dos valores médios das propriedades utilizadas neste estudo; e na Tabela 4, a elevação adiabática da temperatura e geração de calor observado nos corpos de prova.

Tabela 3: Propriedades termo-mecânica do concreto compactado com rolo.

Grandeza	Valor	Unidade
Densidade	2388	kg/m ³
Calor específico	1105	J/kg°C
Condutividade térmica	6445.93	J/mh°C
Coefficiente de dilatação térmica	7.07e-6	1/°C
Coefficiente de convecção <i>concreto/ar</i>	50232	J/m ² h°C
Coefficiente de Poisson	0.2	
Módulo de Elasticidade	6.0	GPa
Resistência característica do concreto (28 dias)	10.2	MPa

Fonte: (LACERDA et al., 2003).

Nas análises numéricas considerou-se um modelo bi-dimensional da barragem com a geometria definida pelas fases I e II (vide Figura 3, p.6) da construção dos blocos 5 a 11 (vide Figura 5, p.9). A elevação máxima nessa configuração atingiu a cota de 280.6 m acima do nível médio do mar, com a fundação locada a 262.0 m acima do nível médio do mar. Para essas análises iniciais a galeria de drenagem foi omitida e as camadas foram lançadas continuamente, independentemente da descontinuidade da geometria entre as duas fases.

Tabela 4: Elevação adiabática da temperatura e calor gerado.

Tempo		T	Q
(dias)	(horas)	(°C)	J/(m ³ h)
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

Fonte:(LACERDA et al., 2003).

5.2 Comparação das Metodologias através dos Resultados Térmicos

A análise tradicional considerou a construção da barragem até que a elevação 280.6 m fosse atingida, dentro de um período de 720 horas. Adotaram-se passos de tempo de 5 horas e um máximo de 2 subintervalos em cada passo de tempo na análise transiente. Considerou-se ainda uma temperatura média do ar de 20 °C e temperatura de lançamento do concreto de 25 °C, constantes em todo o processo de análise. Uma malha mapeada de elementos finitos foi empregada na discretização onde a dimensão máxima dos elementos foi limitada a 22.5 cm nas direções vertical e horizontal.

Apenas para se caracterizar numericamente a existência de uma diferença no campo de temperaturas entre as modelagens tradicional (bloco único) e a modelagem proposta (em camadas) foram empregados: um modelo computacional com a metodologia proposta e com os parâmetros construtivos com camadas de concreto com altura de 30 cm e com intervalos entre lançamentos de 12 h, e com valores de temperatura do concreto lançado e do ar ambiente no entorno variando segundo as curvas do gráfico da Figura 40 apresentada no capítulo anterior (pág. 91).

A geometria analisada de parte do bloco está ilustrada na Figura 43. Nos pontos indicados as temperaturas (T), deslocamentos (u_{xx} e u_{yy}) e tensões (S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} , S_1 , S_2 , S_3) são calculados durante todo o período de análise. As tensões S_1 correspondem às maiores tensões de tração, enquanto que S_3 correspondem às maiores de compressão.

Para isso foram definidos 24 pontos sendo 5 pontos em cada um dos 4 primeiros níveis e 4 pontos no quinto e último nível(cota) (cf Figura: 43) para que se possa comparar os resultados analiticamente.

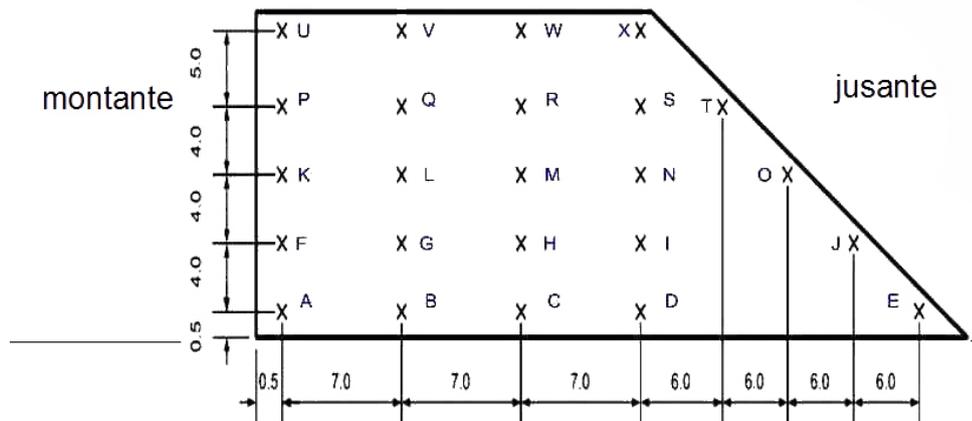


Figura 43: Esquema da geometria analisada e localização dos pontos em estudo

Nota: esta geometria barragem não está em sua escala.

Durante a avaliação dos gráficos dos resultados percebeu-se a grande semelhança entre os resultados nos pontos de monitoração em uma mesma cota. Isto é, os resultados nos seguintes grupos: (B, C, D), (G, H, I), (L, M, N), (Q, R, S) e (V, W) são equivalentes e com o objetivo de facilitar a compreensão e análise dos resultados gráficos, apenas três pontos foram considerados: dois pontos próximos de cada face (jusante e montante) e um no interno a seção.

Para facilitar a comparação da evolução da temperatura, optou-se por agrupá-las em um grupo de 6 gráficos: o gráfico com os resultados em todos os pontos em estudo (a

esquerda superior) e os gráficos com resultados para cada cota de pontos.

Vale a pena salientar que as escalas de temperatura dos gráficos foram ajustadas para evidenciar a diferença dos resultados entre os pontos de uma mesma cota e que a abcissa (escala do tempo) foi adaptada para cada nível, isto é, os valores são apresentados a partir do momento em que o elemento do respectivo nó esteja ativado.

A Figura 44 apresenta graficamente a evolução das temperaturas nos pontos da estrutura modelada de forma tradicional, isto é em bloco único, com temperaturas do ar no entorno e do concreto no lançamento fixas em 25 °C e 20 °C, respectivamente.

A Figura 45 apresenta a evolução das temperaturas para a hipótese de uma estrutura de 60 camadas de 30 cm de altura, lançadas a cada 12 horas, com temperatura de lançamento e ambiente variáveis para toda a análise feita em pela metodologia em camadas (modelagem proposta).

A partir de uma primeira observação nos gráficos nota-se que há um comportamento mais oscilante das temperaturas nos pontos mais próximos a superfície da estrutura (jusante e montante). Observa-se que há diferenças significativas nos resultados observados nas duas formas de análise, acredita-se que isso se deve a posição do ponto avaliado ser um local de forte gradiente térmico (pois as temperaturas do ar e do concreto no lançamento são atualizadas a cada camada depositada).

Uma das possíveis causas para ter diferenças nos resultados das análises é que a área da superfície da estrutura que troca calor com o ar no entorno é distinta nas duas metodologias aplicadas. Enquanto na metodologia com bloco único a área da superfície para troca de calor é fixa e constante, na modelagem em camadas as áreas variam de extensão e forma.

Para se investigar estas diferenças é que os resultados das análises foram divididos em três grupos:

- Resultados térmicos: onde se compara o efeito isolado dos parâmetros de análise nos valores das temperaturas nos pontos monitorados;
- Resultados estruturais termo-mecânico: onde se verifica o efeito isolado dos parâmetros de análise na distribuição de tensões nos pontos monitorados;
- Resultados estruturais da análise termo-mecânica comparados com a resistência a compressão do concreto levantado por ANDRADE (1997).

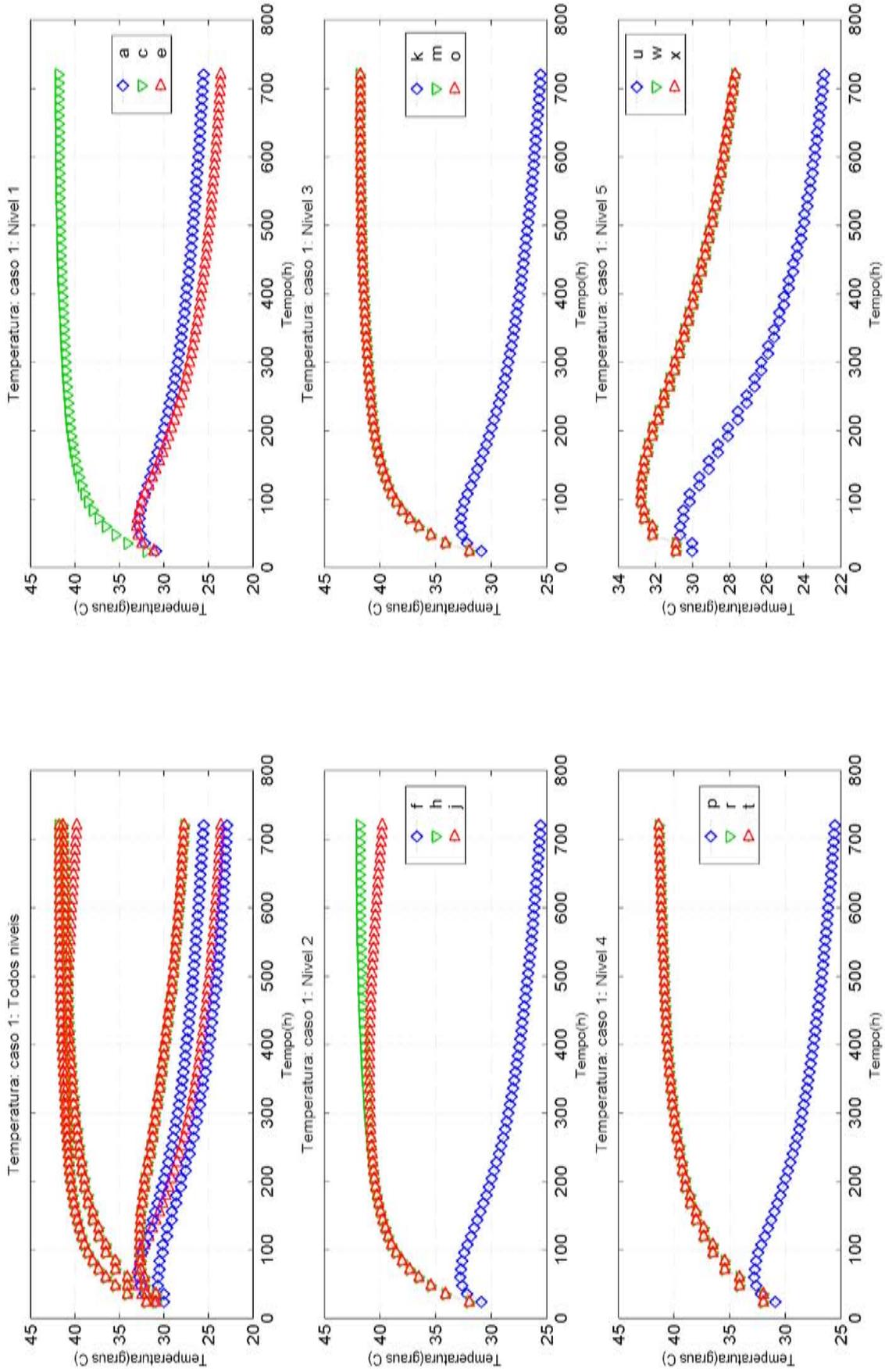


Figura 44: Distribuição de temperaturas: caso 01 - Bloco único

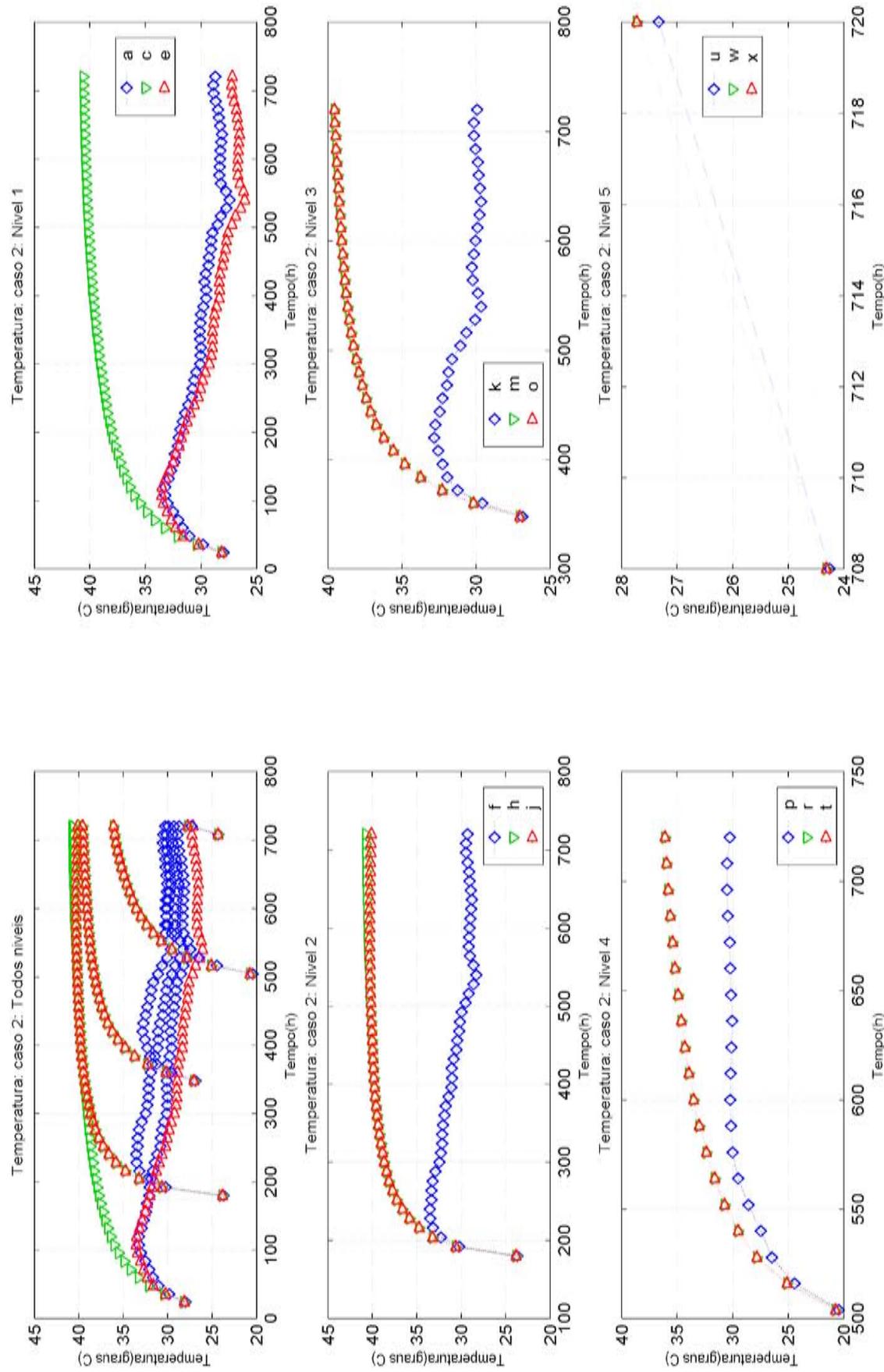


Figura 45: Distribução de temperaturas: caso 02 - Deposição em camadas com parâmetros variantes e 30cm de altura de camada

5.3 Resultados Térmicos da Análise Paramétrica

Com os resultados destas análises é possível se verificar quais os parâmetros que influenciam na distribuição de temperaturas na seção da barragem, levando-se em conta os aspectos construtivos e as condições iniciais e de contorno.

Devido à complexidade do problema, são avaliados os seguintes aspectos construtivos, pois neles se pode ter alguma forma de controle:

- Efeito da altura das camadas;
- Efeito do intervalo de tempo entre lançamento de camadas;

Comparar os parâmetros construtivos e outras grandezas físicas da construção:

- Comparar os resultados variando-se a espessura das camadas e o intervalo de lançamento das mesmas;
- Comparar os resultados variando-se as temperaturas ambiente e de lançamento das camadas;
- Comparar os resultados verificando o efeito do peso próprio da estrutura;
- Comparar os resultados variando-se as propriedades do material ("cura") do concreto lançado em camadas.

Há inúmeras análises comparativas possíveis de serem efetuadas pela metodologia proposta por este trabalho. E como a análise paramétrica é a que emprega o maior número de recursos desenvolvidos optou-se por apresentar a flexibilidade do programa a partir de alguns de seus resultados.

Novamente, os resultados da análise paramétrica se restringem apenas aos da seção parcial do bloco B-08 da barragem de Salto Caxias, na qual considerou-se apenas a primeira fase de construção. Isto se deve ao tempo computacional de máquina e a capacidade do equipamento disponível no CESEC para se efetuar as análises. O que não invalida a metodologia implementada.

Os valores considerados para os parâmetros das análises efetuadas estão relacionadas na Tabela 5. Os valores de altura da camada foram estabelecidas em acordo com os

processos usuais de construção de barragens com CCR; os valores de temperatura ambiente e de lançamento do concreto e os intervalos de lançamento foram estipulados a partir de valores médios das leituras efetuadas em campo.

A tabela apresenta as grandezas consideradas para fins de análise de sua influência isolada na distribuição do campo de temperaturas e de tensões. Nas células em que aparece a palavra 'varia' considera-se os valores coletados em campo na construção da barragem de Salto Caxias.¹

Tabela 5: Grandezas monitoradas nos pontos selecionados

Caso	Características					
	Camadas		Temperaturas		Intervalo de lançamentos	E
	Altura	Número	Ambiente	Lançamento		
	(cm)	(unidades)	(°C)	(°C)	(h)	(GPa)
1	1800	1	20	25	720	6
2	30	60	varia	varia	varia	varia
3	30	60	20	25	12	6
4	30	60	20	25	24	6
5	30	60	20	25	48	6
6	45	40	20	25	12	6
7	60	30	20	25	12	6

Os casos selecionados para se avaliar os efeitos isolados de cada parâmetro estão apresentados na Tabela 6. O caso 3, no qual se mantem todos os parâmetros constantes, é considerado como referência nas análises comparativas nas quais se avalia a influência isolada de um dos parâmetros considerados.

Tabela 6: Casos comparados na análise termo-estrutural

Casos	avaliar o efeito
3 4 5	do aumento do intervalo de lançamento com 30cm de camada
3 6 7	do aumento da altura da camada

5.3.1 Efeito da altura das camadas

Para se avaliar a influência da altura das camadas, foi suposto que todas as camadas da seção analisada possuem alturas idênticas, com o intervalo de tempo entre

¹A variação é a mesma ocorrida na construção de Salto Caxias conforme indicado na Figura 39) para as temperaturas; intervalos entre lançamentos; e o módulo de elasticidade segundo levantamento de (ANDRADE, 1997) sobre composição de amostras de concreto (vide Figura 50, pág. 105).

lançamento de camadas constante. As alturas consideradas foram de 30 cm, 45 cm e 60 cm.

Observando os gráficos da Figura 46, que apresentam a comparação entre o modelo com camadas de 30 cm e 45 cm, nota-se uma defasagem das curvas dos resultados das duas análises. Esta diferença é causada pelo fato do intervalo entre lançamentos ser o mesmo para todos os casos e por terem alturas diferentes, conseqüentemente a execução da construção e da análise é mais rápida para o modelo com camadas mais altas.

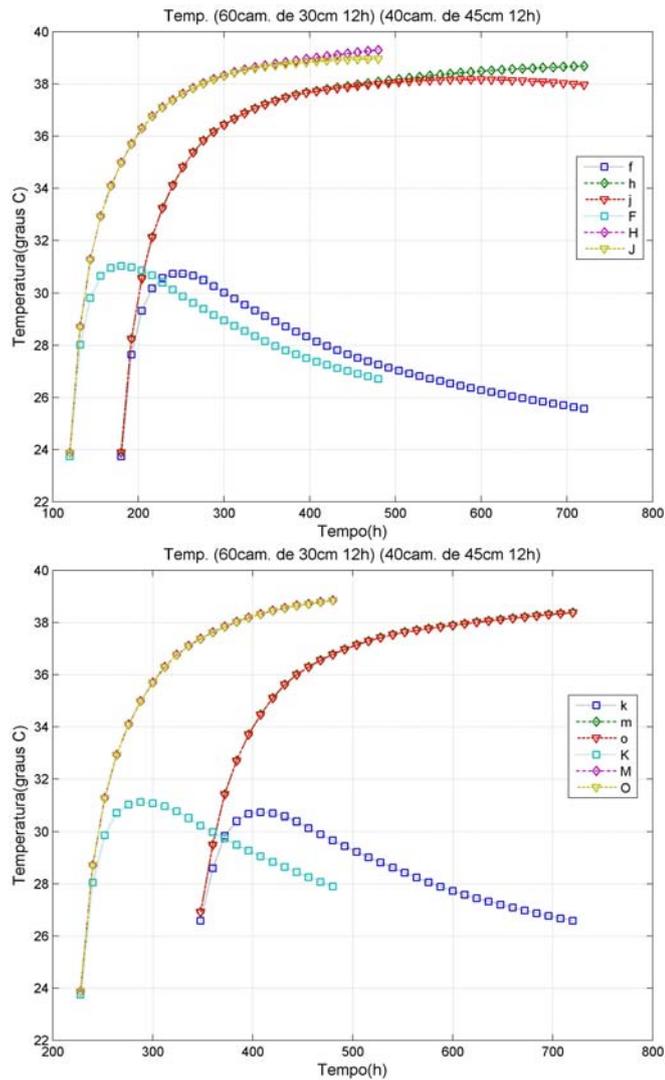


Figura 46: Distribuição de temperaturas: casos 03 e 06

Nota:

caso 03 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos; indicados com letras minúsculas.

caso 06 - todos parâmetros constantes e 45 cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos. indicados com letras maiúsculas.

Ainda é observado que as temperaturas alcançam valores maiores quanto maior a altura das camadas, apesar de ocorrerem em momentos distintos, ou seja ao término do lançamento das camadas para a estrutura analisada.

Mesmo para os resultados da análise do modelo com camadas com 60 cm de altura (mostrados na Figura 47), percebe-se que os valores máximos atingidos pelas temperaturas nos pontos monitorados são maiores que os valores do modelo com camadas de 30 cm de altura.

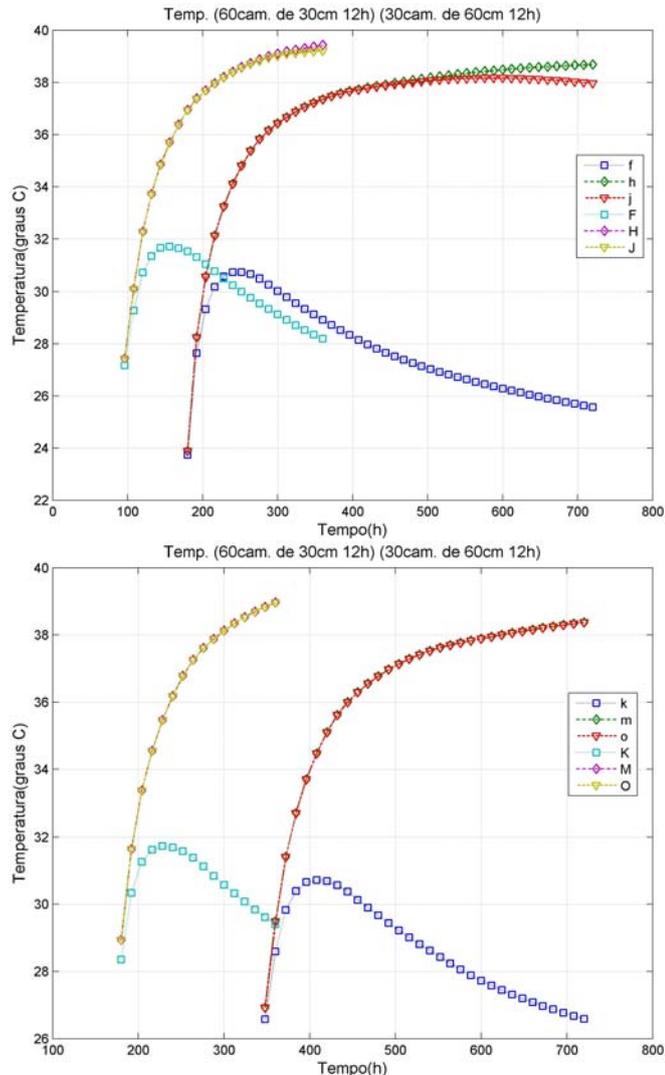


Figura 47: Distribuição de temperaturas: casos 03 e 07

Nota:

caso 03 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos;
caso 07 - todos parâmetros constantes e 60cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos.

5.3.2 Efeito do intervalo entre lançamentos 30 cm

O intervalo de tempo entre lançamentos é um fator que é observado e planejado nas construções em CCR, mas no qual não se tem um controle quanto a sua influência na geração de calor e tensões. Este tópico é abordado para se avaliar qual a relevância desse fator na distribuição de temperaturas na estrutura. Para que se possa isolar o

efeito apenas deste fator foi considerado que as condições iniciais e de contorno sejam aplicadas nos respectivos instantes cronológicos das análises, isto é, como se as seções fossem construídas no mesmo período, lado a lado, mas com intervalos de deposição de material diferentes.

Observando os gráficos da Figuras 48, nota-se que as temperaturas atingidas nos pontos monitorados são menores nas estruturas executadas mais lentamente, com 24 h de intervalo entre lançamentos. Da mesma forma, quando comparadas com as de intervalo de 48 h (como apresentada na Figura 49) percebe-se que as temperaturas são menores.

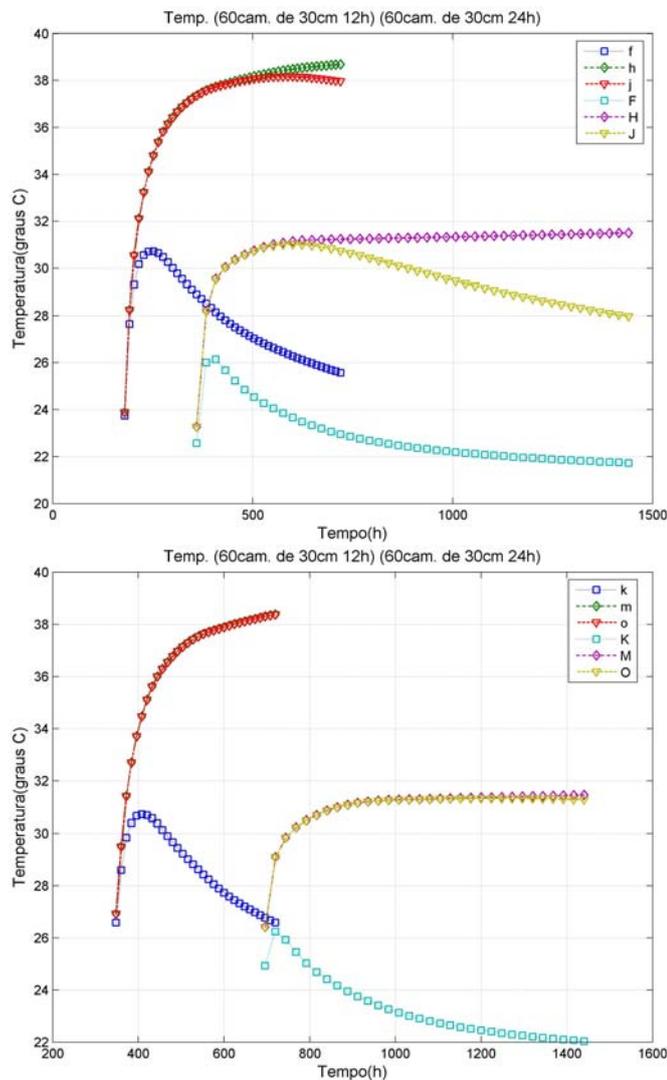


Figura 48: Distribuição de temperaturas: casos 03 e 04

Nota:

caso 03 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos;
caso 04 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 24 h entre lançamentos.

A maior diferença é de 10 °C no ponto *J* e para os pontos *F* e *J* a diferença máxima fica em torno de 6.5 a 7.5 °C. Para os intervalos de 24 h e de 48 h não se nota uma diferença significativa de temperaturas máximas, a diferença está apenas no momento

em que estas são alcançadas, em torno de 1200 h e 2700 h após o início da construção.

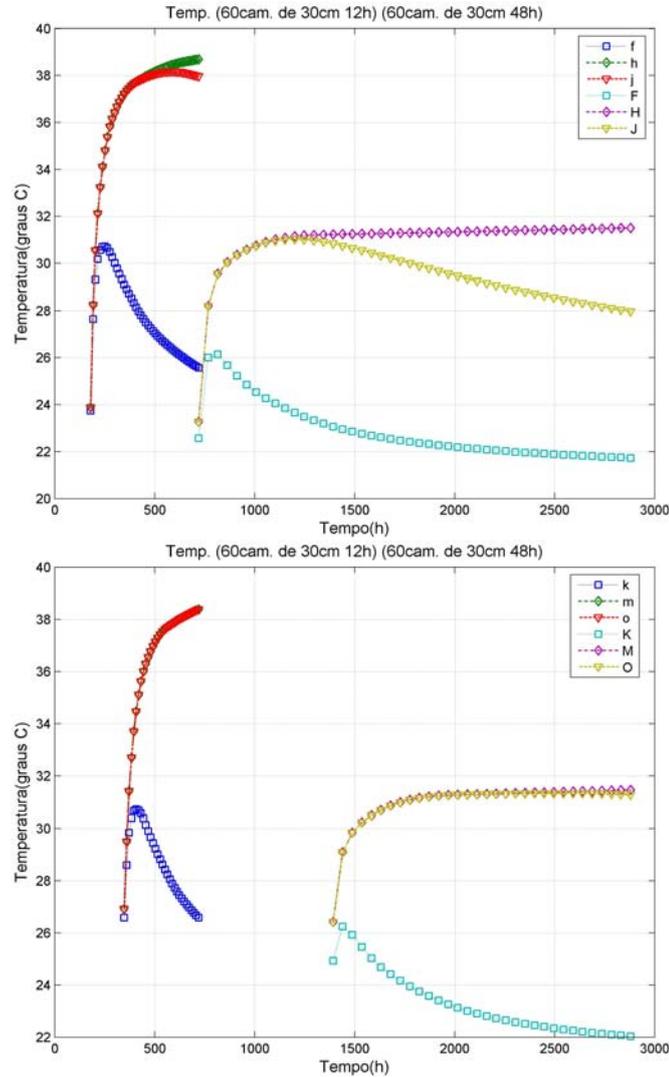


Figura 49: Distribuição de temperaturas: casos 03 e 05

Nota:

caso 03 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos;
caso 05 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 48 h entre lançamentos.

5.4 Resultados Termomecânicos da Análise Paramétrica

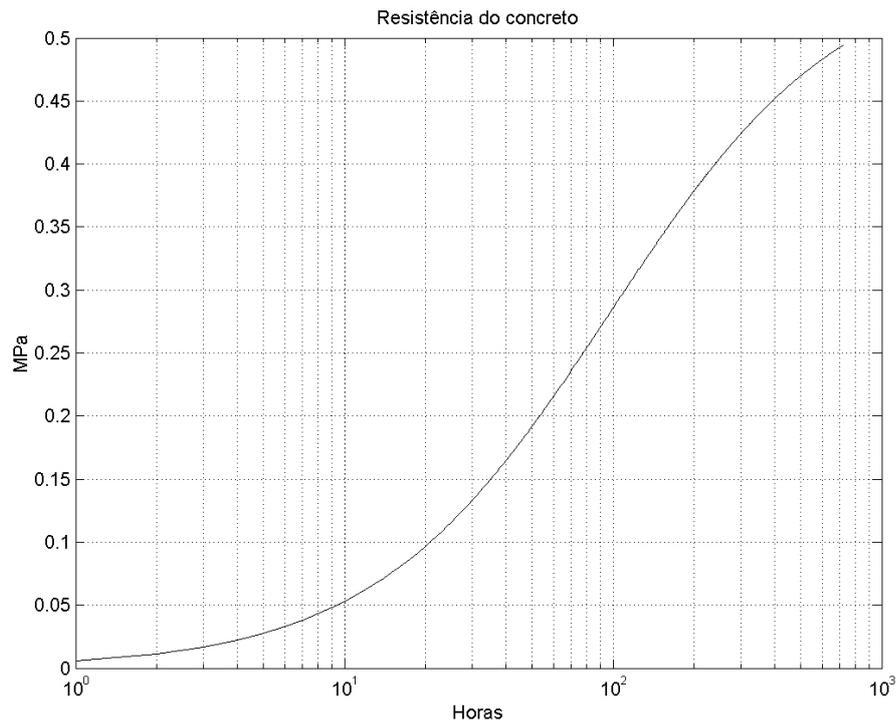
Esta seção avalia os valores das tensões S_1 e S_3 para diferentes valores de altura de camadas de concreto e também para diferentes intervalos de tempo entre lançamentos das camadas de 30 cm. Em particular são avaliados três pontos do nível 2: F, H e J. Juntamente com os gráficos de tensões são colocados os respectivos gráficos da diferença entre as tensões obtidas no modelo das tensões de resistência a tração do concreto S_{fct} , para se avaliar em que instante para os pontos monitorados possa ocorrer fissuras.

Foram efetuadas análises comparativas com a resistência do concreto segundo a

equação retirada de (ANDRADE, 1997). Ela está bem correlacionada com os ensaios de tração realizados nos testemunhos extraídos da barragem:

$$S_{fct}(z) = \frac{z}{(7.133 + 1.7857z)} \quad , \quad z \text{ em dias e } S_{fct} \text{ em MPa} \quad (5.1)$$

Figura 50: Resistência do concreto



Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 1997).

5.4.1 Efeito da altura das camadas

Os gráficos da Figura 51 representam os valores das tensões S_1 para os pontos do nível 2, nos casos 03, 06 e 07 (camadas de concreto com 30, 45 e 60 cm de altura). Os gráficos da Figura 52 as respectivas diferenças das tensões S_1 de S_{fct} , resistência do concreto a tração, determinada pela expressão de ANDRADE (1997).

Observando-se os gráficos da Figura 51 nota-se que as tensões no ponto j avaliados nos três casos são muito semelhantes em termos de tendência; apresentam um valor de pico, e tensões finais acima da tensão inicial. Estas tensões ocorrem, respectivamente, em 350, 240 e 180 h após o início da construção. A medida que se aumenta a altura das camadas percebe-se que a tensão final diminui de valor 0.90 MPa, 0.01 MPa e um

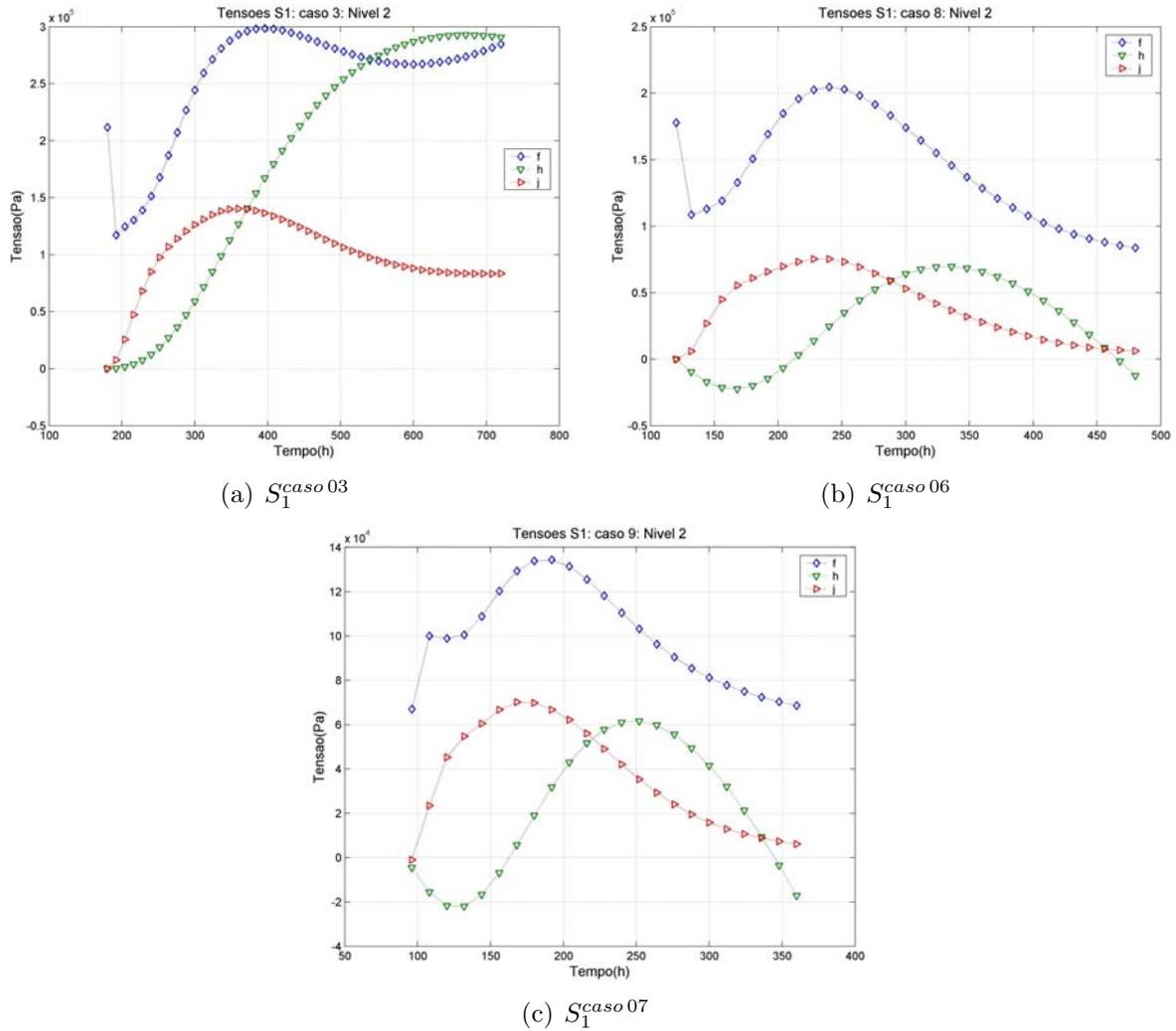


Figura 51: Distribuição de tensões S_1 : casos 03, 06 e 07

Nota:

caso 03 - todos parâmetros constantes, 30cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos

caso 06 - todos parâmetros constantes, 45cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos

caso 07 - todos parâmetros constantes e 60cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos

pouco abaixo de 0.01 MPa; os valores de pico 0.14 MPa para camadas de 30 cm de altura, e 0.07 MPa para modelos com camadas de 45 e 60 cm de altura. Para uma análise simplificada como a que este trabalho se propõe (estática multi-linear) esta informação não é relevante, mas para estudos do comportamento visco-plástico do concreto certamente é imprescindível.

O ponto interno h apresenta a mesma tendência: iniciam-se com praticamente sem nenhuma tensão, evoluem até atingirem um valor de pico (0.3MPa, 0.07 MPa e 0.06MPa para as camadas de 30, 45 e 60 cm de altura) e depois decrescem até atingirem valores de tensão de 2.9 MPa para camadas de 30 cm de altura e valores em torno de -0.02 MPa para as camadas de 45 e 60 cm de altura. Nota-se que as tensões nos pontos internos possuem uma amplitude maior para as camadas mais esbeltas (2.9 MPa para as camadas

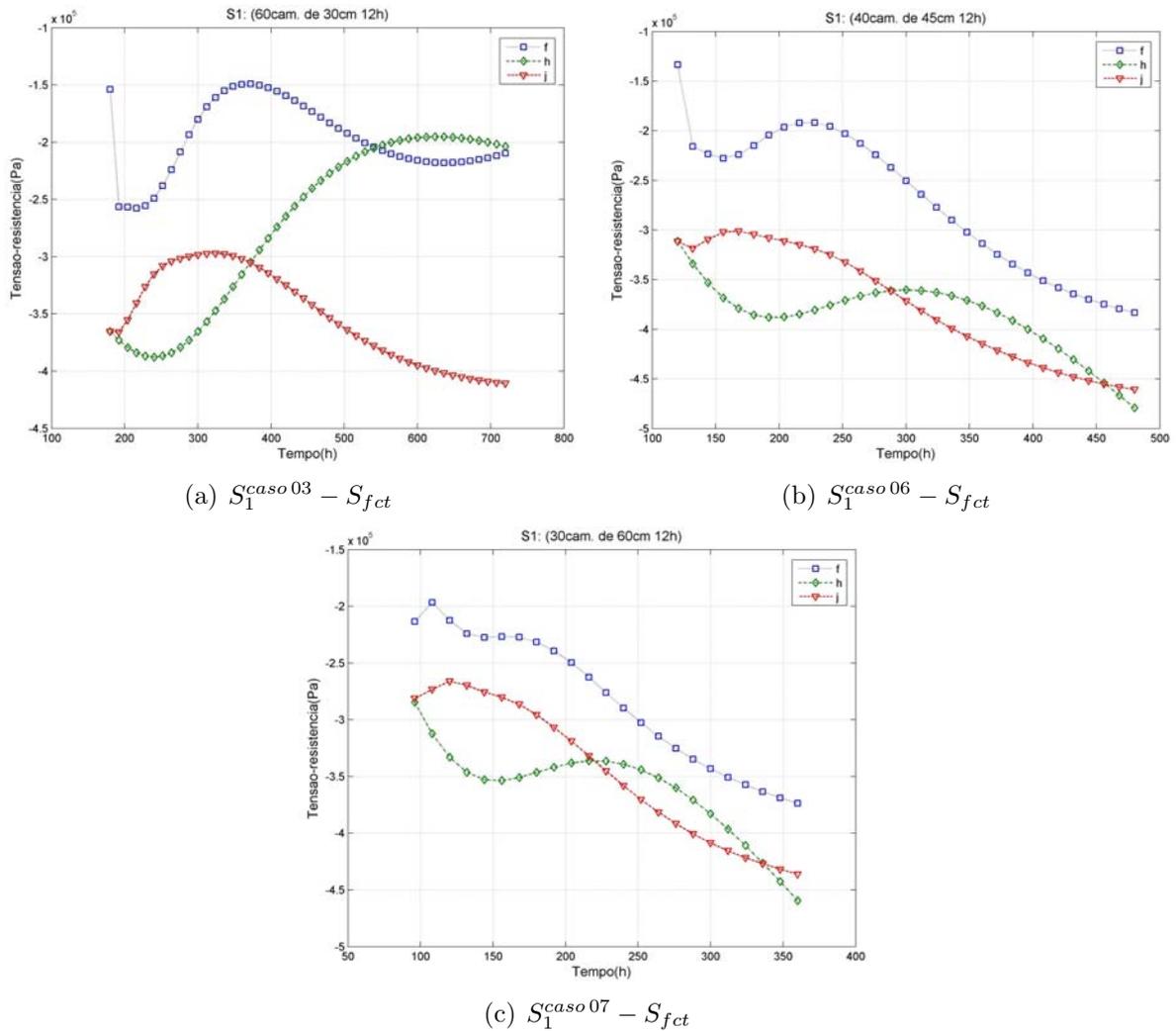


Figura 52: Distribuição de tensões S_1 : casos 03, 06 e 07

Nota:

caso 03 - todos parâmetros constantes, 30cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos

caso 06 - todos parâmetros constantes, 45cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos

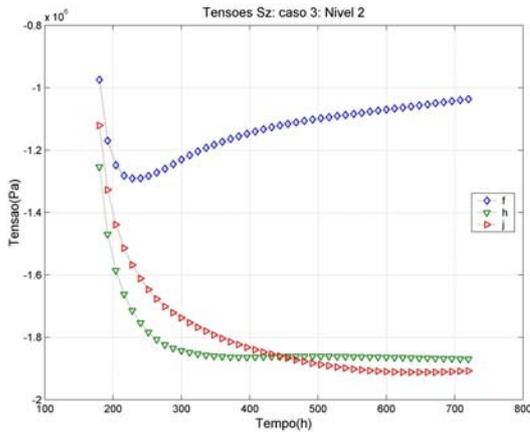
caso 07 - todos parâmetros constantes e 60cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos

com 30 cm de altura e 0.08 MPa para as camadas de 60 cm de altura). Novamente, cabe lembrar que este modelo analisa o modelo multi linear, o que não leva em consideração a dinâmica do carregamento a que a estrutura é submetida no decorrer do tempo.

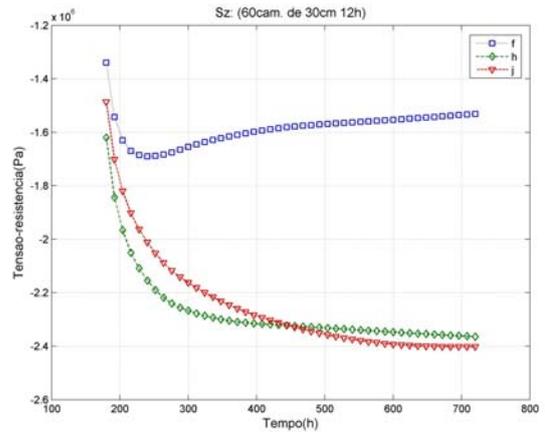
O ponto f , apresenta valores de pico de 0.30, 0.20 e 0.13 MPa, para as alturas de camadas de 30, 45 e 60 cm respectivamente e finalizam com 0.29, 0.09 e 0.07 MPa.

O comportamento apresentado pela tensão S_1 nestes pontos avaliados, que não necessariamente são os pontos críticos do projeto de barragem, indica que modelos de camadas mais espessas tendem a ter tensões de tração menores que os modelos de camadas esbeltas.

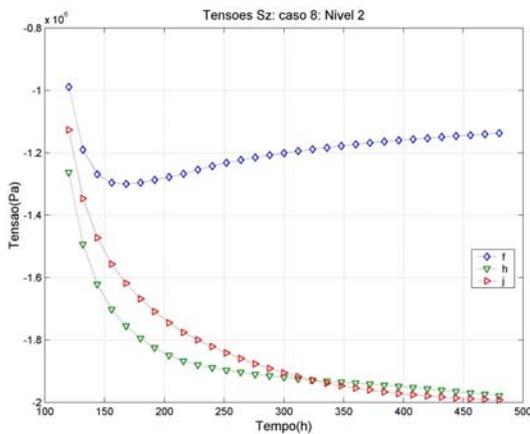
Observando-se os gráficos (b), (d) e (f) da Figura 53 percebe-se que os valores



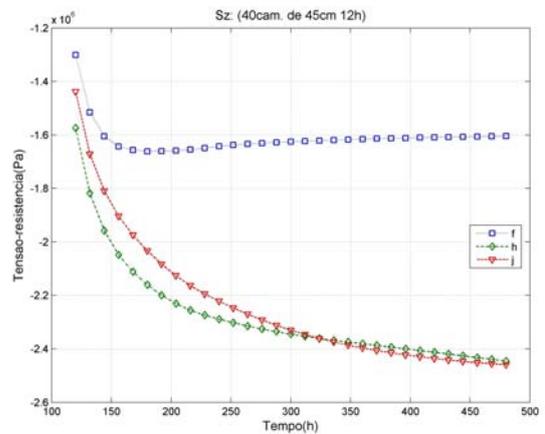
(a) S_z^{caso03}



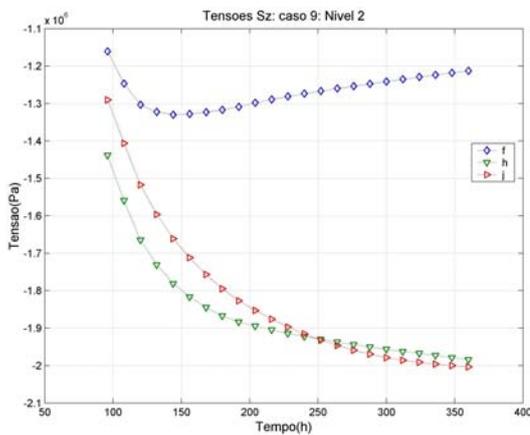
(b) $S_z^{caso03} - S_{fct}$



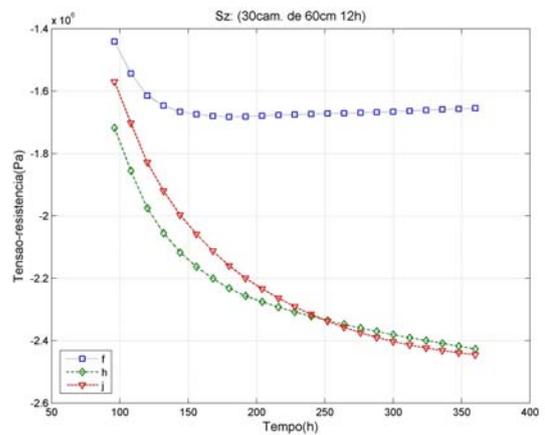
(c) S_z^{caso06}



(d) $S_z^{caso06} - S_{fct}$



(e) S_z^{caso07}



(f) $S_z^{caso07} - S_{fct}$

Figura 53: Distribuição de tensões S_z : casos 03, 06 e 07

Nota:

- caso 03 - todos parâmetros constantes, 30cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos
- caso 06 - todos parâmetros constantes, 45cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos
- caso 07 - todos parâmetros constantes e 60cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos

das tensões obtidas de $S_z - S_{fct}$ nos pontos monitorados apresentaram diferenças com a variação da altura das camadas de concreto. As tensões trativas são um pouco mais acentuadas em camadas delgadas, o que pode ser notado na diferença de 0.2 MPa entre

as estruturas com camadas de 30cm e 60cm .

5.4.2 Efeito do intervalo entre lançamentos 30cm

Verifica-se nas curvas dos gráficos da Figura 54 que quanto mais espessa as camadas depositadas menores são as tensões S_1 obtidas nas análises do modelo.

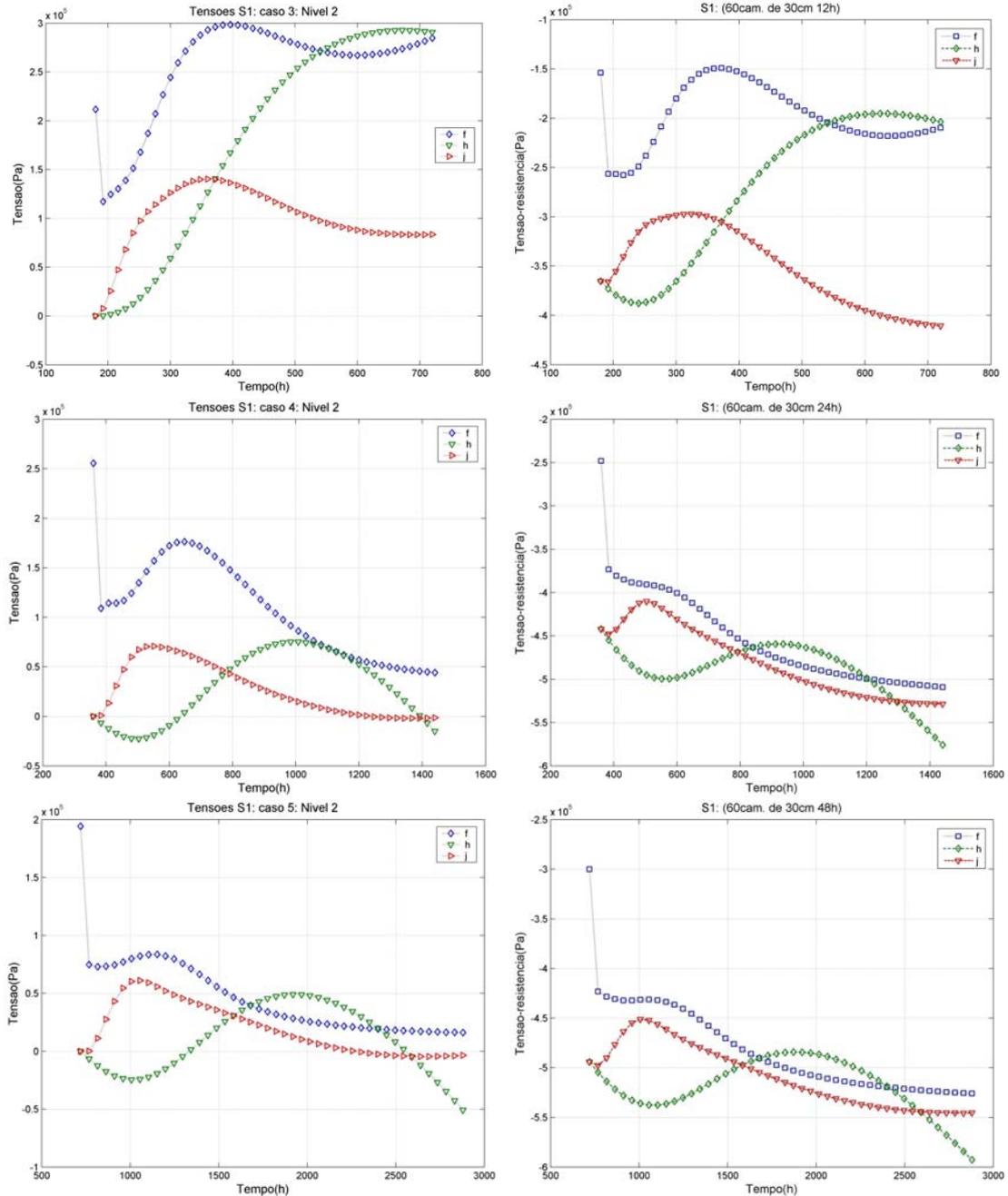


Figura 54: Distribuição tensões S_1 : casos 03, 04 e 05

Nota:

- caso 03 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos
- caso 04 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 24 h entre lançamentos
- caso 05 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 48 h entre lançamentos

Observando-se os gráficos (a),(c) e (e) da Figura 54, que mostram a evolução das tensões S_1 nos pontos monitorados, percebe-se que os valores das tensões tendem a ter uma característica mais compressiva a medida que o intervalo entre lançamentos de camadas é estendido. Além de que os pontos apresentam um variação de tensão dentro de intervalos cada vez menores quanto maior o intervalo de tempo entre lançamentos. Para o intervalo de 12 h a escala de variação da tensão é de praticamente 3.0 MPa, para 24 h algo em torno de 2.0 MPa e para 48 h em torno de 1.5 MPa, desconsiderando-se o valor inicial do ponto f . Este comportamento também é observado nos gráficos (b), (d) e (f) da Figura 54.

Observando-se os gráficos (a),(c) e (e) da Figura 55, que mostram a evolução das tensões S_z nos pontos monitorados, percebe-se que os valores das tensões possuem, praticamente, as mesmas tendências de valores. As tensões são mais trativas (cerca de 0.05 MPa de diferença entre as camadas lançadas em intervalos de 12 e 48 h) para as camadas mais espessas.

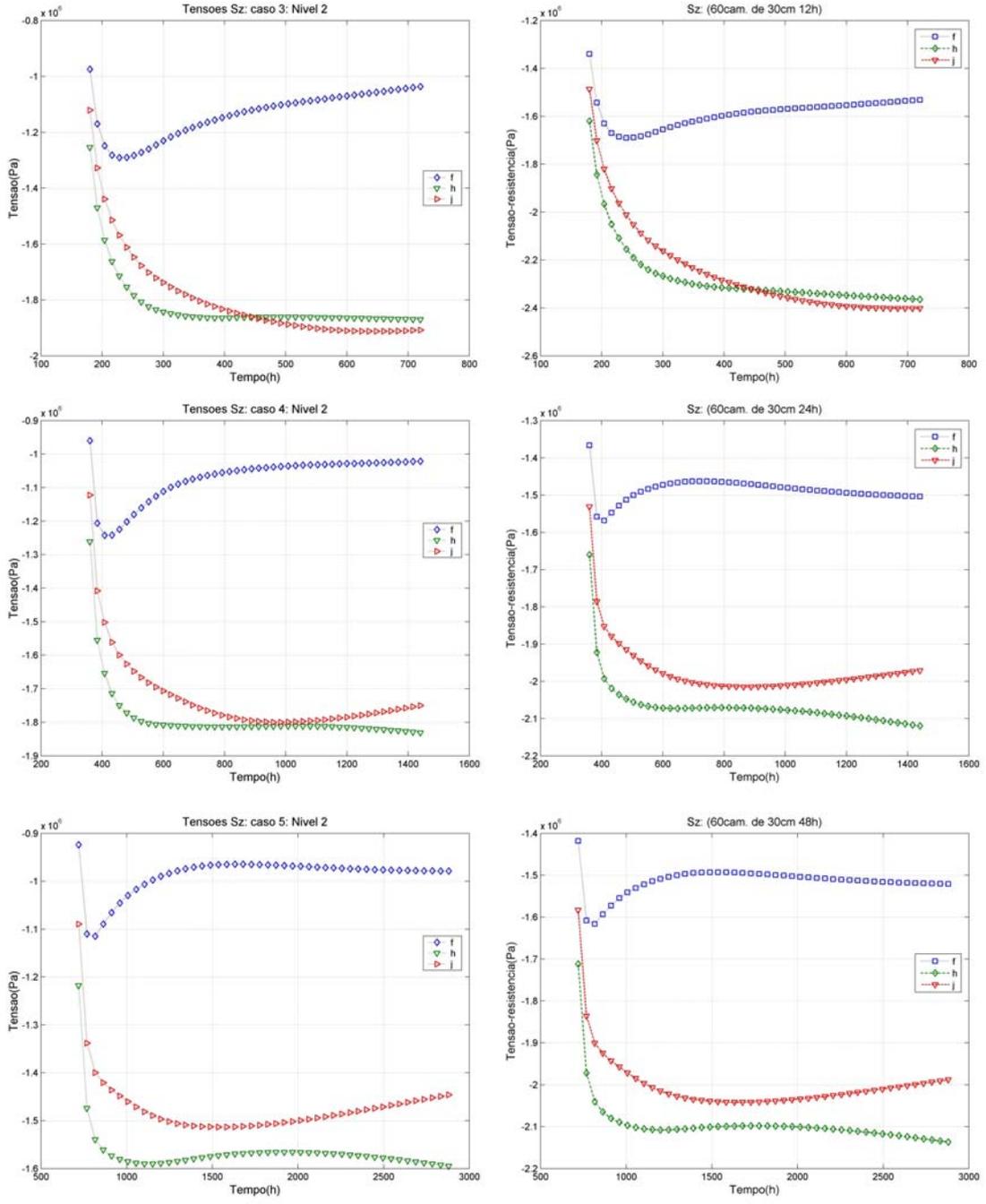


Figura 55: Distribuição tensões S_z : casos 03, 04 e 05

Nota:
 caso 03 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 12 h entre lançamentos
 caso 04 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 24 h entre lançamentos
 caso 05 - todos parâmetros constantes e 30 cm de altura de camada e com 48 h entre lançamentos

6 Conclusões

Observando os resultados obtidos nas Seções 4.1 a 4.3 conclui-se que a proposta de uma metodologia de avaliação em camadas:

- apresenta diferenças se comparadas às formas de análise tradicional em "bloco único"; como constatado por KRÜGER (2001) que emprega a técnica do *Birth & Death* para análises térmicas, SILVOSO (2003) que utiliza recursos de *Data Mining* para se elaborar regras ou diretrizes para construção de barragens com CCR, e nos trabalhos de (KRÜGER; MACHADO; MARINO, 2003) , (LACERDA et al., 2003), (KRÜGER et al., 2003b) , (KRÜGER et al., 2003a), (KRÜGER et al., 2004) , (KAVAMURA et al., 2004) , (LACERDA et al., 2005) e (KRÜGER et al., 2005), que são resultados obtidos das análises parciais ou de comparação de casos particulares de construção de barragens utilizando a metodologia proposta com a técnica convencional denominada *bloco único*;
- se equipara e reproduz os resultados de análises efetuadas com metodologias semelhantes, como o de KRÜGER (2001), que aplica passos de carga e não passos de tempo (*timestep*), como na técnica apresentada neste trabalho;
- consegue avaliar a tendência de comportamento térmico de estruturas monitoradas, desde que se possua dados disponíveis para se efetuar as análises;
- obtém os resultados em um tempo relativamente curto se comparados com a metodologia de (SILVOSO, 2003);
- permite efetuar outras análises parametrizadas que não foram apresentadas neste trabalho, como por exemplo os efeitos isolados:
 - da temperatura ambiente, para as diversas alturas de camadas de concreto;
 - da temperatura de lançamento do concreto;
 - da taxa de geração de calor;

- da sazonalidade da temperatura ambiente;
- da radiação sobre as faces da estrutura;
- do vento sobre a estrutura;
- da composição da massa de concreto;
- da variação da seqüência de deposição das camadas;
- da variação da geometria na deposição das camadas;
- do uso de camadas com alturas diferenciadas;
- do lançamento de camadas sem uma periodicidade;
- do peso próprio da estrutura frente as cargas térmicas desenvolvidas pelo calor de hidratação do cimento;
- do uso de elementos estruturais que possam representar com maior exatidão o comportamento do concreto nas primeiras idades; Pois o elemento de concreto do ANSYS, SOLID65, é tridimensional, desenvolvido para concreto reforçado, e não aceita o método *birth & death*;

Algumas das análises propostas acima já foram implementadas e publicadas nos seguintes trabalhos: (KRÜGER; MACHADO; MARINO, 2003) (LACERDA et al., 2003) (KRÜGER et al., 2003b) (KRÜGER et al., 2003a) (KRÜGER et al., 2004) (KAVAMURA et al., 2004) (LACERDA et al., 2005) (KRÜGER et al., 2005)

Recordando os resultados das Seções 5.1 e 5.4 percebe-se que é possível se fazer um acompanhamento do comportamento da estrutura da seção parcial da barragem em vários pontos nos instantes desejados. Como este trabalho apresenta a metodologia termo-estrutural acoplada a uma técnica de modelagem, *birth & death*, não se pode chegar a uma conclusão com respeito aos aspectos construtivos de uma barragem pelos seguintes motivos:

- o modelo estrutural é estático-linear; apesar das propriedades estruturais serem corrigidas a cada lançamento de camada;
- o modelo não considera o comportamento visco-plástico do concreto nas primeiras idades;
- os pontos utilizados para a confecção dos gráficos não representam necessariamente pontos críticos da estrutura;

- não foi estabelecido um critério de falha e de escoamento que representem o comportamento do concreto nos períodos avaliados para se inferir alguma conclusão; Foi fornecido apenas a resistência do concreto para as primeiras idades, a partir de 24h do lançamento do material na praça de construção (a curva elaborada por ANDRADE (1997)).
- não se pode obter resultados que permitissem avaliar os efeitos das variações das tensões, sua dinâmica, no comportamento estrutural. Pois saber as tensões extremas, os instantes em que elas ocorrem, e a taxa de variação das tensões são informações que podem ser obtidas em uma análise estático-multi-linear, mas falta ferramentas e aplicação de modelos mais exatos para se obter conclusões mais precisas sobre os resultados.

Avaliando-se os resultados, sob a óptica dos fatores anteriormente levantados, denota-se que quanto maior o intervalo entre lançamento das camadas, menores são os efeitos das tensões; o aumento da altura as camadas apenas afeta as tensões transitórias nos pontos próximos às superfícies em contato com o ar, mas os valores finais atingidos são muito próximos. Os valores resultantes das diferenças com a resistência ao concreto também se encaminham com a mesma tendência.

Referências

- ADINA R & D, I. *ADINA*. 2005. [Http://www.adina.com](http://www.adina.com).
- AGULLO, L.; MIRAMBELLAND, E.; AGUADO, A. A model for the analysis of concrete dams due to environmental thermal effects. *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow*, v. 6, n. 4, p. 25–36, 1996.
- ANDRADE, W. *Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e propriedades*. São Paulo: Ed. Pini, 1997. Equipe de FURNAS – Laboratório de Concreto.
- ANSYS. *ANSYS Help - Advanced Analysis Techniques Guide*. [S.l.], 2001.
- BADR, S. A. E. *NUMERICAL ANALYSIS OF COAL YIELD PILLARS AT DEEP LONGWALL MINES*. Tese (PhD, Engenharia de Minas e da Terra) — Universidade do Colorado, Golden, Colorado, 2004.
- BATHE, K. *Finite element procedures*. 1st. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- BECKER, E. B.; CAREY, G. F.; ODEN, J. T. *Finite Elements - An Introduction - volume I*. New York: Prentice-Hall, 1981.
- BERNARD, O.; ULM, F.-J.; LMARCHAND, E. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 9, p. 1293–1309, Setembro 2003.
- BOYCE, W.; DIPRIMA, R. C. *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. 5. ed. New York: Wiley & Sons, 1992.
- CARRAZEDO, R. *Modelagem numérica do comportamento estrutural de uma barragem sob efeitos da reação álcali-agregado*. 157 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- CERVERA, M.; FARIA, R.; PRATO, T. Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena. *Computers & Structures*, v. 80, n. 18-19, p. 1511–1521, 2002.
- COMPANHIALÉTRICA - CEEE. *Dona Francisca*. 2003.
- COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. *Concepts and applications of finite element analysis*. 3rd. ed. New York: John Wiley, 1989.
- CRICHTON, A. Kinta rcc dam - are over-simplified thermal-structural analyses valid? In: AUSTRALIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS. [S.l.]: GHD, 2001. p. 655–665. 311.

- FAIRBAIRN, E. M. R. et al. Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms. *Computers & Structures*, v. 82, n. 2-3, p. 281–299, Janeiro 2004.
- HAN, B.-P. et al. The thermal structure of sau reservoir (ne: Spain): a simulation approach. *Ecological Modelling*, v. 125, n. 2-3, p. 109–122, 2000.
- HANSEN, K.; REINHARDT, W. *Roller-Compacted Concrete Dams*. 1st. ed. Columbus: McGraw-Hill Professional, 2000.
- INTERTECHNE. *Projetos*. 2003. Disponível em: <<http://www.intertechne.com.br/projetos.html>>. Acesso em: 26 janeiro 2004.
- ISHIKAWA, M. Thermal stress analysis of a concrete dam. *Computers & Structures*, v. 40, n. 2, p. 347–352, 1991.
- KAVAMURA, E. E. et al. Análise termo-mecânica bidimensional de estruturas executadas em camadas. congresso de métodos computacionais em engenharia, 2004. In: . Lisboa: Anais do CMCE-2004, 2004. p. 1–15.
- KIM, J. K.; KIM, K. H.; YANG, J. K. Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system. *Computers & Structures*, v. 79, n. 2, p. 163–171, 2001.
- KRÜGER, D. A. V. *ANÁLISE TÉRMICA TRANSIENTE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO EXECUTADAS POR CAMADAS*. 153 p. Dissertação (Mestre em Ciências) — Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- KRÜGER, D. A. V. et al. Análise termo mecânica bidimensional de barragens de concreto executadas por camadas. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2004. Porto de Galinhas - PE: Anais do IV Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, 2004.
- _____. *Análise de Tensões de Origem Térmica em Estruturas de Concreto Executadas em Camadas*. Curitiba, PR, 2003.
- _____. Thermo-mechanical analysis of roller compacted concrete dams. In: FOURTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) DAMS, 2003. Madrid, Spain: Swets and Zeitlinger, 2003. p. 625–632. Kruger-a.
- _____. Efeito das tensões de origem térmica no comportamento tridimensional de barragens executadas em camadas. In: XVIII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2005. Curitiba: Anais do XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005. v. 1, p. 1–15.
- KRÜGER, D. A. V.; MACHADO, R. D.; MARINO, M. A. Análise térmica de estruturas executadas por camadas - aplicação a barragens em CCR. In: 22ND. IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Energia, 2001. 245.

_____. Thermal analysis of layered concrete dams. In: COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES. Montreal, Canada: ICOLD-2003, 2003. p. 1–24.

LACERDA, L. A. de et al. *Aplicação de Métodos Numéricos para o Estudo do Comportamento Termo-estrutural de Barragens de Concreto e Conjugação com Instrumentação - Relatório final ciclo 2001-2002*. Curitiba, PR, 2003.

_____. *Aplicação de Métodos Numéricos para o Estudo do Comportamento Termo-estrutural de Barragens de Concreto e Conjugação com Instrumentação - Relatório final ciclo 2004*. Curitiba, PR, 2005.

LAI, W. M.; RUBIN, D.; KREMPL, E. *Introduction to Continuum Mechanics*. 1st. ed. New Jersey: Pergamon Press, 1993.

LEME ENGENHARIA. *index.html*. 2003. Disponível em: <<http://www.leme.com.br/UnidadesNegocios/Hidroenergia/Obras/index.html?urlcontent=obra0005&urlltitle=UHE%20Salto%20Caxias>>. Acesso em: 26 janeiro 2004.

LEWIS, R. W. et al. *The Finite Element Method in Heat Transfer analysis*. West Sussex: John Wiley & Sons, 1996. Reprinted October 1996, April 1997.

LÉGER, P.; CÔTÉ, P.; TINAWI, R. Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams. *Computers & Structures*, v. 60, n. 4, p. 601–611, 1996.

LÉGER, P.; VENTURELLI, J. Seasonal temperature and stress distribution in concrete gravity dams. *Can. J. Civ. Eng.*, v. 20, n. 0, p. 999–1017, 1993.

LIENHARD IV, J. H.; LIENHARD V, J. H. *A Heat Transfer Textbook*. 3. ed. Cambridge: Phlogiston Press, 2004.

MABRUK, R.; ISHIDA, T.; MAEKAWA, K. A unified solidification model of hardening concrete composite for predicting the young age behavior of concrete. *Cement and Concrete Research*, xx, p. xxx–xxx, 2004.

Malcolm Dunstan & Associates CONSULTING AND ENGINEERING. *index.htm*. 2003. Disponível em: <http://www.rccdams.co.uk/rcc_dams_projects/upperstillwater/>.

METHA, P.; MONTEIRO, P. *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balanco energético nacional 2003*. Brasília, DF, 2003.

_____. *Energia Brasil*. Brasília, DF, 2003.

MOURET, M.; BASCOUL, A. Microstructural features of concrete in relation to initial temperature - sem and esem characterization. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 3, p. 369–375, 1999.

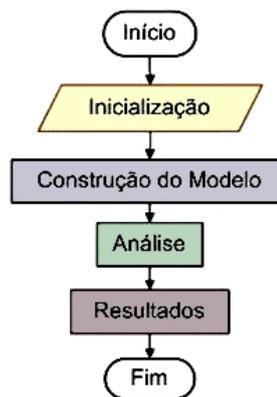
ODEN, J. T.; CAREY, G. F.; BECKER, E. B. *Finite elements: an introduction, v.1*. 1st. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1981.

- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 4. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 2003.
- PARKUS, H. *Thermoelasticity*. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1976.
- P. INCROPERA, F.; DEWITT, D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 5. ed. New York: Wiley & Sons, 2002.
- SAETTA, A.; SCOTTA, R.; VITALIANI, R. Stress analysis of concrete structures subjected to a variable thermal loads. *Journal of Structural Engineering*, v. 121, n. 3, p. 446–457, 1995.
- SARACIBAR, C. A. D.; CERVERA, M.; CHIUMENTI, M. On the constitutive modeling of coupled thermomechanical phase-change problems. *International Journal of Plasticity*, v. 17, n. 12, p. 1565–1622, 2001.
- SCHUTTER, G. D. Finite element simulation of thermal cracking in massive hardening concrete elements using degree of hydration based material laws. *Computers & Structures*, v. 80, n. 27-30, p. 2035–2042, 2002.
- SIEGAL, R.; HOWELL, J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 2. ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1981. In: ANSYS. ANSYS Help - Advanced Analysis Techniques Guide. [S.l.], 2001.
- SILVA, M. T. Q. S. da. *Análise Térmica Transiente e de Tensões em Estruturas Executadas em Camadas*. Dissertação (Mestre em Ciências) — Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Agosto 2003.
- SILVOSO, M. M. *Modelagem numérica do concreto a poucas idades*. Dissertação (Mestre em Ciências) — COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Abril 2002.
- SILVOSO, M. M. *OTIMIZAÇÃO DA FASE CONSTRUTIVA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO EM FACE DOS EFEITOS DA HIDRATAÇÃO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS*. Tese (Doutor em Ciências) — COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março 2003.
- TAMMA, K. K.; NAMBURU, R. R. Recent advances, trends and new perspectives via enthalpy-based finite element formulations for applications to solidification problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 30, p. 803–820, 1990. In: ANSYS. ANSYS Help - Advanced Analysis Techniques Guide. [S.l.], 2001.
- ULM, F.-J.; COUSSY, O. Couplings in early-age concrete: From material modeling to structural design. *DIANA World 2/99*, v. 35, n. 31-32, p. 4295–4311, Novembro 1998.
- WU, Y.; LUNA, R. Numerical implementation of temperature and creep in mass concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 37, n. 2, p. 97–106, 2001.
- ZHU, X. K.; CHAO, Y. J. Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation. *Computers & Structures*, v. 80, n. 11, p. 967–976, 2002.
- ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. *The finite element method, v.1, 2, 3*. 1st. ed. London: McGraw-Hill, 1977.

APÊNDICE A – Fluxograma comentado

Este capítulo descreve as etapas do processo de modelagem e análise no ANSYS apresentadas na Figura 22 na Secção 3.1.

Figura 56: Elementos obtidos na geração da malha mapeada.



Cada secção descreve as etapas da modelagem empregadas neste trabalho.

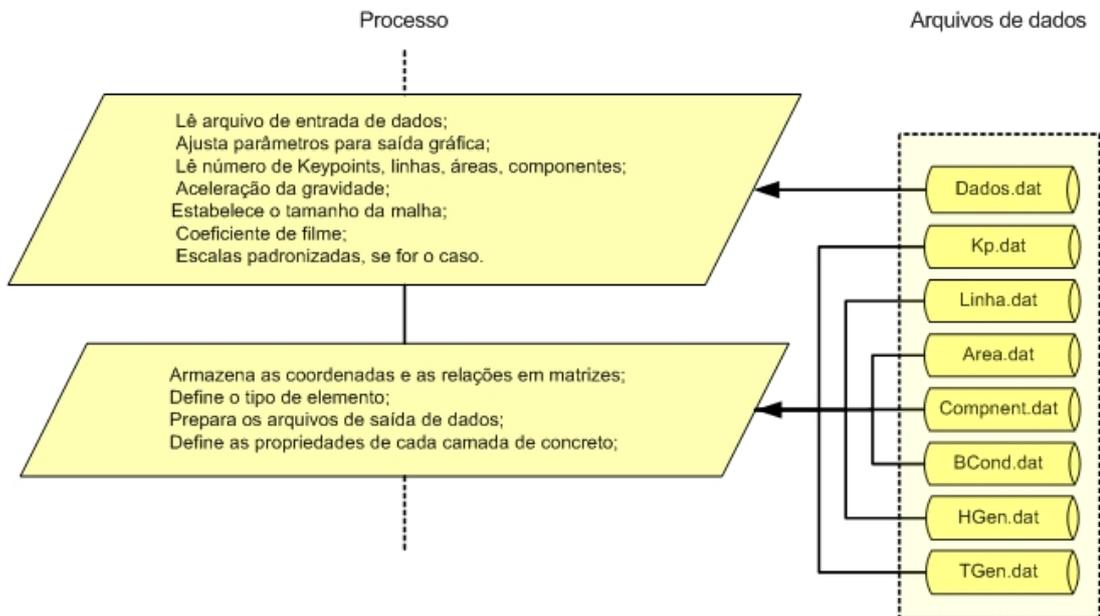
A.1 Inicialização

A inicialização do modelo é a mais importante, pois é a partir dela que se define a geometria, o tamanho da malha, as características dos materiais, as condições de contorno, as taxas de geração de calor, e escolhidos os nós mais próximos dos pontos monitorados durante a análise. É onde se escolhe o tipo de elemento a ser empregado e suas características.

Nesta etapa também são preparadas as pastas que recebem os resultados gráficos e tabulados. Para os gráficos são estabelecidos a forma de geração das escalas padronizadas ou não, e para as tabelas são colocadas no cabeçalho as coordenadas dos pontos monitorados.

O conteúdo de cada um dos arquivos é citado abaixo:

Figura 57: Inicialização



dados.dat: arquivo com a quantidade de camadas, áreas, linhas, *keypoints*, aceleração da gravidade, coeficiente de filme, propriedade dos materiais, padronização das escalas dos resultados gráficos, seleção dos nós mais próximos dos pontos monitorados;

kp.dat: arquivo com as coordenadas dos *Keypoints*;

linha.dat: arquivo com a relação de *Keypoints* e linhas;

area.dat: arquivo com a relação de linhas e áreas;

bcond.dat: arquivo com a relação de linhas e condições de contorno;

compnent.dat: arquivo com a relação entre camadas e áreas;

hgen.dat: quantidade de calor da hidratação do concreto;

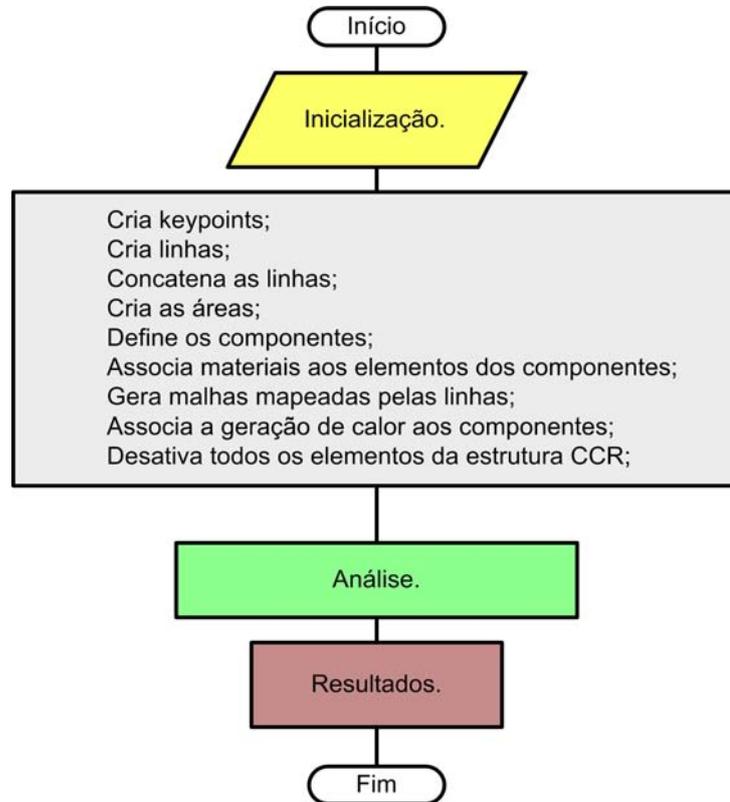
tgen.dat: instantes em que quantidade de calor da hidratação do concreto são considerados;

A.2 Construção do modelo

A necessidade de se criar o modelo geométrico desta forma é para garantir um programa de forma modular e estruturada. A especificação das entidades geométricas que compõem o modelo permite posteriormente a colocação de condições de contorno e

de carga de forma ordenada, dispensando a necessidade de se percorrer o modelo para se verificar em quais linhas ou áreas devem ser atualizadas as especificações de análise.

Figura 58: Geração da geometria



O uso de componentes, permite a seleção de um conjunto de áreas que representem camadas depositadas em instantes diferentes ou com condições de contorno diferenciados. Nas análises simplificadas não há necessidade de se utilizar este recurso, foi colocado para implementar modelos mais complexos.

A.3 Análise

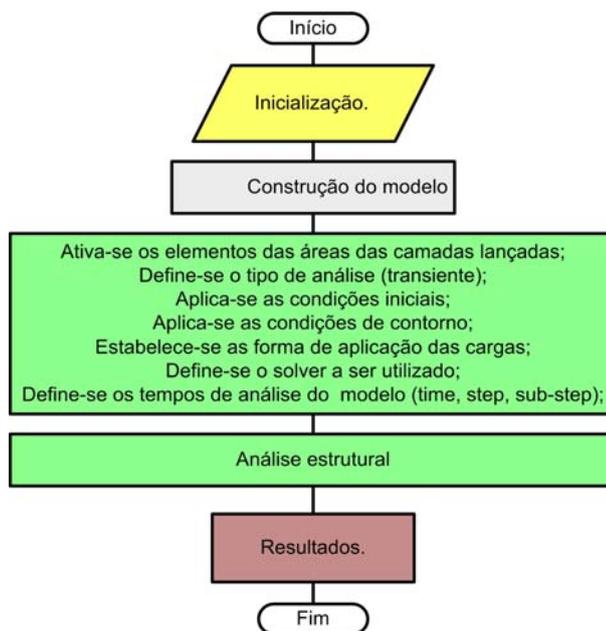
Neste trecho do programa, como pode ser acompanhado no fluxograma da Figura 59, após a ativação dos elementos da área associados a camada de concreto recém lançada, redefine-se as condições iniciais e as de contorno, estabelece-se a forma de aplicação das cargas e ajusta-se a curva de geração de calor de todos os elementos ativos da estrutura CCR.

Na análise térmica há possibilidade de se escolher o solver, e este é feito de acordo com a configuração do equipamento utilizado para se fazer a solução das equações

do modelo.

Nas análises feitas neste trabalho foi utilizado o PCGOUT, pois de acordo com ANSYS (2001) seria o melhor a ser empregado. No Anexo B.2 se encontra a descrição do equipamento empregado neste trabalho.

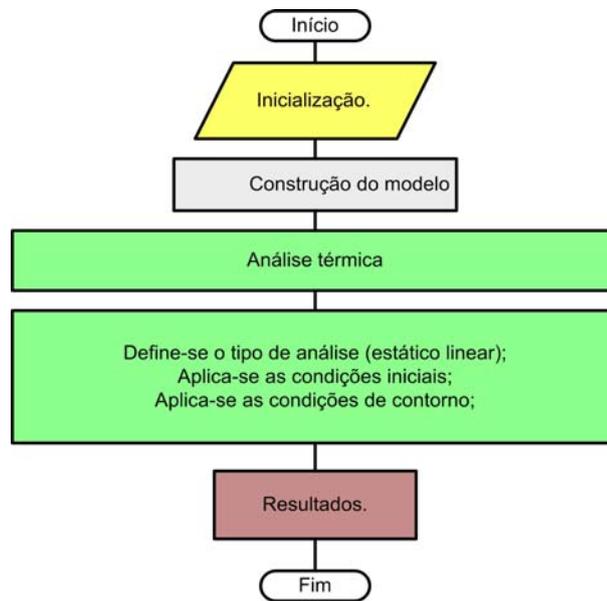
Figura 59: Análise térmica do modelo



Conforme seqüência apresentada no fluxograma da Figura 60 Para a análise estrutural o campo de temperatura nos resultados da análise térmica são aplicados como carregamento estático.

As condições de contorno são re-ajustadas para a nova camada ativa e o modelo é resolvido estatica-linearmente.

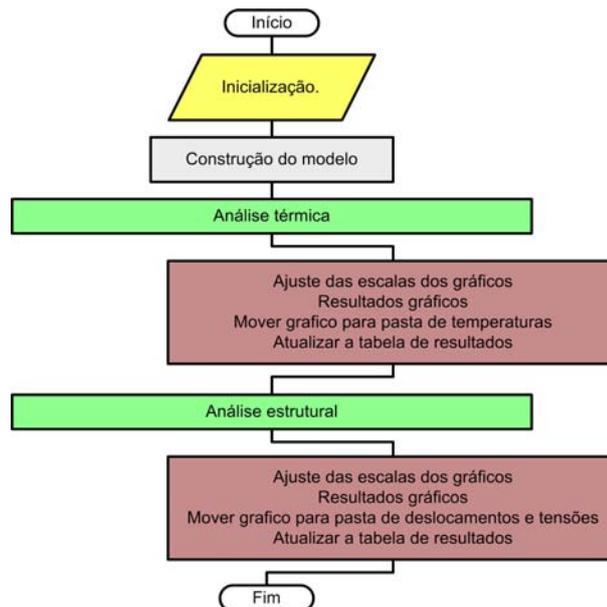
Figura 60: Análise estrutural do modelo



A.4 Resultados

Os resultados são armazenados e atualizados em gráficos e tabelas colocados em sub-pastas a medida que são gerados.

Figura 61: Resultados das análises



APÊNDICE B - *Birth Death*

Para se desativar os elementos numa análise estrutural os termos da matriz de rigidez são multiplicados por um termo redutor [*ESTIF*], desta forma as cargas associadas a esses elementos tem seus valores bastante atenuados. Um valor usual e por *default* para este parâmetro é 10^{-6} , mas outros valores podem ser atribuídos conforme as características da modelagem.

Para se reativar um elemento, isto é, fazer com que os elementos da matriz de rigidez, massa e cargas de elementos sejam considerados na análise, basta retirar o efeito do *ESTIF*. Para isso é utilizado o comando *EALIVE*.

É importante salientar que os elementos reativados não terão valores em seus graus de liberdade, entretanto os valores iniciais a eles estabelecidos não serão afetados. As deformações térmicas são computados nos elementos recém ativados na passo corrente e de acordo com a temperatura de referência. Isto quer dizer que os elementos ativados e com carga térmica podem estar com uma valor de tensão.(ANSYS, 2001)

Análises de outras naturezas também admitem esta técnica desde que os elementos aplicados ao modelo a suportem, segue abaixo uma relação de alguns desses elementos na tabela B:

Tabela 7: Alguns dos elementos estruturais que admitem Birth and Death

MASS21	SOLID45	SOLID70	SOLID98	PLANE121	PLANE182
PLANE2	BEAM23	PLANE53	PLANE75	SOLID122	PLANE183
BEAM4	PLANE25	PLANE55	PLANE77	SOLID123	SOLID185
SOLID5	MATRIX27	SOLID95	PLANE78	SOLID90	SOLID186
PLANE82	SOLID87	PLANE13	PLANE35	SOLID64	SOLID187
PLANE83	PLANE67	COMBIN14	SOLID97	SOLID92	TARGE170
SOLID62	PLANE42	SOLID96	SOLID65	TARGE169	SOLID69

B.1 Utilizando os recursos do *Birth and Death*

Este recurso pode ser utilizado na maioria das análises estáticas, e transientes não-lineares.

O processo para uso do *Birth and Death* não causa modificações profundas em sua estrutura de modelagem, sendo necessários apenas algumas etapas que são transcritas resumidamente:

- Confeccionar o modelo geométrico no ambiente *PREP7*, gerar a malha e avaliar as condições de formação de todos os elementos. Lembre-se que no *Ansys* não é possível se adicionar elementos ao modelo fora do ambiente *PREP7*.
- Aplicar o carregamento desejado e seguir os seguintes passos para a busca da solução:
- Define o tipo e a forma de carregamento e a forma de análise do modelo.

Para todas as análises *Birth and Death* deve-se ajustar o *solver* para trabalhar preferencialmente com o método de Newton-Raphson, caso contrário o programa não permite a desativação dos elementos.

Os elementos são desativados (ou ativados) no primeiro sub-passo do passo seguinte, e mantém o *status* ao longo do passo de resolução. É importante lembrar que o valor por pré-definido para o valor do *ESTIF* pode não ser suficiente para atender os propósitos das análises em determinados casos. Portanto é importante se considerar a possibilidade de se ratificar o valor deste parâmetro.

Os nós que não estão vinculados a elementos ativados podem sofrer pequenas variações nos valores de seus graus de liberdade. Em alguns casos é interessante restringir os graus de liberdade dos nós pertencentes a elementos inativos para se reduzir o número e o tamanho das equações manipuladas, diminuindo assim a possibilidade do sistema se mal condicionar. É interessante se restringir os graus de liberdade destes nós para garantir que os elementos ao serem reativados tenham o mesmo valor atribuído inicialmente. Da mesma forma ao se ativar elementos com carregamento pré-estabelecido é necessário recolocar os carregamentos desejados.

B.2 Visualizando os resultados

Para se visualizar a solução é necessário se desconsiderar os valores obtidos para os elementos desativados. Uma forma elegante de se realizar isto é necessário se selecionar os elementos ativados para que apenas estes estejam presentes no pós processamento. Desta forma é possível se selecionar regiões de interesse com um detalhamento mais apropriado para análise.

B.2.1 *Birth-Death*

A técnica do *birth-death* desativa e ativa elementos conforme as necessidades do desenvolvimento de um modelo. Como o *ANSYS* não permite criar elementos durante a fase de cálculo (*SOLUTION*) é necessário se criar todos os elementos na modelagem (*PREP7*) e então desativar(desabilitar) aqueles nos quais não há interesse durante uma determinada fase da análise. Desativar um conjunto de elementos significa diminuir os efeitos da participação destes durante as fases do processo analisado. Observe que os elementos estão presentes no modelo, apenas terão seus efeitos abrandados o suficiente para pouco influenciarem os demais elementos.

ANEXO A – Crise do setor elétrico em 2001

Texto parcialmente retirado de (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2003b).

A.1 Setor Elétrico

O Brasil ¹ dispõe da maior bacia hidrográfica do mundo, com um incomparável potencial de geração de energia elétrica. Daí a natural e histórica opção dos brasileiros por esta matriz energética. As usinas hidrelétricas proliferaram a partir da década de 50, dando sustentação ao forte impulso do país rumo à industrialização e ao desenvolvimento. Hoje o Brasil dispõe de um dos maiores parques hidrelétricos do mundo, respondendo por quase 90% do total da energia gerada no país.

O sistema elétrico brasileiro foi planejado a partir de uma das piores secas enfrentadas pelo país neste século, entre os anos de 1951 e 1956. Para fazer face à eventualidade de um novo episódio como este, o sistema foi concebido de modo a funcionar a plena carga mesmo na ausência continuada de chuvas, o que é possível com a manutenção de excedentes permanentes, em grandes reservatórios, da matéria prima energética que é a água. Levando em conta os diferentes regimes pluviométricos característicos das diversas regiões brasileiras, instalou-se também, progressivamente, um regime de vasos comunicantes, que permite o aproveitamento de sobras de energia de determinadas regiões em outras onde ela eventualmente se mostre escassa.

Por muitos anos o Brasil conviveu com a impressão de que suas fontes energéticas hidrológicas eram inesgotáveis. De fato, teoricamente seria ainda

1

As informações contidas no site ENERGIA BRASIL são relativas ao período de junho de 2001 a dezembro de 2002, e referem-se ao racionamento de energia ocorrido no país.

O conteúdo exposto é de responsabilidade da extinta Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica (GCE), criada pelo governo anterior por meio da medida provisória nº 2.198-3, de 29 de maio de 2001. energiabrasil.htm

Assessoria de Comunicação do Ministério de Minas e Energia

possível dobrar, em alguns anos, o número de hidrelétricas instaladas no país sem provocar danos intoleráveis ao meio ambiente.

Também é fato, no entanto, que a população brasileira mais do que triplicou nos últimos 40 anos invertendo, paralelamente, a sua condição predominantemente agrária e rural para urbana e industrial, hoje na proporção de 80%. A demanda por energia elétrica, naturalmente, cresceu de forma exponencial, sendo atendida por meio de pesados investimentos que resultaram, entre outras, na Hidrelétrica de Itaipu, ainda a maior usina do planeta.

Em meados dos anos 90, contudo, o sistema hidrelétrico instalado começou a dar sinais de esgotamento. Os excedentes de água que davam garantia de abastecimento para os cinco anos seguintes passaram a ser consumidos sem a compensação proporcional que deveria ser assegurada pelos períodos chuvosos.

Em 1995, o Brasil alcançou a estabilização da sua moeda e o fim da galopante inflação que castigou a economia e a população nas mais de duas décadas anteriores. O saldo deixado pelo regime inflacionário, no entanto, foi perverso, resultando na incapacidade física do Estado de realizar os elevadíssimos investimentos necessários a uma atualização do parque energético nacional.

Ainda assim, das 23 hidrelétricas cujas obras encontravam-se paralisadas em 95, 15 foram concluídas até 2000, com acréscimo de cerca de 16 mil megawatts ao total da capacidade geradora e a instalação de mais de sete mil km em linhas de transmissão. De 1996 a 2000, houve aumento anual médio da oferta de energia no país de 2.900 megawatts/ano, em contrapartida a menos da metade disso entre 1986 e 1995.

Paralelamente, abriu-se o mercado energético à iniciativa privada, para que investimentos complementares viessem a assegurar o atendimento de uma demanda em constante crescimento - inclusive em função dos milhões de consumidores incorporados ao mercado a partir do Plano Real. Os desequilíbrios provocados por sucessivas crises internacionais (russa, mexicana, asiática, argentina), no entanto, frustraram esta expectativa, provocando um recuo temporário dos investidores internacionais.

Finalmente, em 2001, o Brasil foi submetido a um dos piores regimes pluviométricos das últimas décadas, resultando, somado todo o conjunto de fatores mencionados, no problema ora enfrentado por toda a população brasileira.

Previa-se, ao final de dezembro de 2000, que as perspectivas de atendimento

para o ano de 2001 eram positivas, uma vez que as afluências verificadas ao longo do ano em 2000 situaram-se em torno da média histórica nas principais bacias do País. Além do mais, os reservatórios encontravam-se, no final de 2000, mais cheios que no final de 1999.

As chuvas no início de abril de 2001, no entanto, concentraram-se no sul, até São Paulo, com o deslocamento das frentes frias para o oceano. Disso resultaram escassas precipitações em Minas Gerais e Leste de Goiás, áreas onde estão situados os grandes reservatórios do Sudeste/Centro-Oeste e as nascentes dos rios São Francisco e Tocantins, onde, por sua vez, situam-se as usinas que atendem ao Norte e ao Nordeste.

Nos meses de março e abril houve um agravamento acentuado da situação. O armazenamento verificado no final do período úmido, em relação ao nível mínimo de segurança (que era de 49% nas regiões Sudeste e Centro-Oeste e de 50% na região Nordeste), configurou um quadro crítico para o atendimento à carga no restante do ano.

No histórico de Energia Natural Afluente (ENA), que abrange um período de 70 anos, no subsistema Sudeste/Centro-Oeste, o valor alcançado de 70% das Medições de Longo Termo (MLT) é o 11º pior, contando com 86% de ocorrência de valores superiores. Na bacia do Rio Grande, o valor de 48% da MLT é o 2º pior, com 99% de ocorrência de valores superiores. Na bacia do Rio Paranaíba, o valor de 60% da MLT é o 7º pior, com 91% de ocorrência de valores superiores. No subsistema Nordeste, o valor verificado, de 37% da MLT realizado em março/abril é o mais crítico do histórico.

É evidente, portanto, que a causa primeira da presente crise energética é a baixa ocorrência de chuvas, o que acarretou reduzido nível de acumulação de reservas para enfrentar o período seco.

A.2 Recursos Hidrelétricos

Por ocasião da elaboração do Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010, que apontou a existência de recursos hidrelétricos passíveis de utilização econômica suficientes para as necessidades energéticas do país, a avaliação de nosso potencial era de 213 mil MW.

O Brasil dispõe de um potencial hídrico não utilizado a um custo competitivo com todas as alternativas de geração, mesmo incluindo-se os custos de transmissão. A utilização desse potencial não é simples: impactos am-

bientais e sociais e concentração do potencial a ser utilizado em uma região extremamente sensível que é a Amazônia.

O inventário hidrelétrico brasileiro teve grande evolução nos últimos anos, não somente do ponto de vista do potencial identificado, mas também no que concerne à metodologia de trabalho. E moldou toda uma geração de engenheiros no Brasil, que ocuparam importantes posições no setor elétrico e no cenário nacional, recomendando sempre aproveitar esse patrimônio da melhor forma possível.

Hoje em dia é necessário considerar também o custo ambiental, aspecto que leva a análise de outros benefícios para a sociedade brasileira, com relação aos usos múltiplos que se possa fazer da água que será represada ou eventualmente desviada de um determinado rio para a produção de eletricidade. Nas alternativas que temos, os grandes aproveitamentos de potencial hidrelétrico estão na Amazônia.

ANEXO B – Dados levantados no projeto

B.1 Barragens citadas

Tabela 8: Projetos de barragens

Nome	Beni	New Victoria	Platanovryssi	Upper Still Water
Rio	El Kabir	Mundy Brook	Nestos	Rock Creek
Dimensões (m)				
Altura	118	52	95	91
Comprimento	714	285	305	815
Volume (m^3)				
de CCR	1 690 000	121 000	420 000	1 125 000
da barragem	1 900 000	135 000	440 000	1 281 000
do reservatório	963M	10M	84M	37M
Projeto				
Início	01/01/1993	23/08/1990	30/01/1989	01/12/1983
Término	31/12/2000	16/11/1991	30/06/1999	31/12/1987
CCR				
Início	18/10/1998	11/03/1991	18/10/1995	01/09/1985
Término	07/07/2000	18/08/1991	10/03/1997	10/08/1987

Observações:

- Beni: projeto com início contratual;
- Platanovryssi: 5 meses parados devido ao verão; projeto com início com a construção do desvio.
- Utah: para o término do CCR tem de se levar em conta os 2 períodos, com 7 meses em cada um, parados devido ao inverno.

B.2 Equipamento utilizado para as análises

Processador	Pentim IV 3.2GHz
Placa mãe	Intel
Memória	3Gb RAM 400MHz
Disco rígido	SERIAL ATA 80Gb 7200RPM
Placa de video	XFX GForce 128Mb
Monitor	17" Tela Semi plana
Sistema operacional	Windows XP SP2 - Português
Anti-vírus	McFee 2004 com Firewall

Tabela 9: Descrição do equipamento

B.3 Método de Resolução - *Solvers*

Tabela 10: Seleção do Método de Resolução - *Solver*

Método	Aplicações Típicas	tamanho do modelo (1000 DOF)	uso de memória	uso de disco
Frontal (eliminação direta)	Quando a robustez é necessária (análise não linear) ou a memória é limitada.	< 50	Baixo	Alto
Sparse Direct (eliminação direta)	Quando a robustez e a velocidade são necessárias (não linear); para análises lineares onde os métodos iterativos são de convergência lenta (especialmente para matrizes mal condicionadas).	10 a 500 (mais para cascas e vigas)	Médio	Alto
JCG (iterativo)	Quando a velocidade é crucial problemas de uma única área (térmicos, magnéticos, acústicos, e multifísicos)	50 a 1000+	Médio	Baixo
ICCG (iterativo)	Quando a velocidade é crucial em aplicações multifísicos. Lida com modelos com difícil convergência com outros métodos iterativos.	50 a 1000+	Alto	Baixo
PCG (iterativo)	Quando a velocidade é crucial (análise linear de grandes modelos). Desenvolvido especificamente para grandes modelos com elementos sólidos.	50 a 1000+	Alto	Baixo
AMG (iterativo)	Similar ao PCG, só que permite trabalhar com processamento escalonado (com até 8 processadores) com compartilhamento de memória em máquinas em paralelo.	50 a 1000+	Alto	Baixo
DDS	Este método é escalonável até algumas dúzias de processadores em sistemas de múltiplo processamento em rede.	1000 a 10000	Alto	Baixo

Fonte: Retirado de (ANSYS, 2001).

Nota: O AMG e DDS são partes de um sistema *Parallel Performance for ANSYS*, o qual é um produto de licença própria e a parte da licença do ANSYS. Para informações detalhadas em métodos multiprocessados veja o capítulo 13: *Improving ANSYS Performance and Parallel Performance for ANSYS* encontrado no guia das técnicas avançadas de análise no ANSYS. (ANSYS, 2001)

B.4 Fluxo de Calor por Radiação

A troca radiante de energia entre superfícies próximas de uma região ou entre uma região e seus arredores pode produzir efeitos no conto do problema de transferência de calor. Embora os efeitos da radiação estejam incorporados, geralmente, no problema de transferência de calor somente com condições de contorno, o acoplamento é importante devido à dependência não-linear da radiação na temperatura da superfície.

Estendendo a lei de Stefan-Stefan-Boltzmann para um sistema de N regiões, o balanço de energia para cada superfície na região, para um corpo difuso cinza é dado por SIEGAL e HOWELL (1981), que relaciona estas perdas de energia às temperaturas de superfície:

$$\sum_0^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i^e} - F_{ji} \frac{1 - \varepsilon_i^e}{\varepsilon_i^e} \right) \frac{1}{A_i} \aleph_r = \sum_0^N (\delta_{ji} - F_{ji}) h_{SB} \Theta_i^4 \quad (\text{B.1})$$

onde:

N - número de superfícies radiantes;

δ_{ij} - delta de Kronecker;

ε_i^e - emissividade eficaz da superfície i ;

F_{ij} - Fatores da vista da radiação entre as superfícies i e j . Indica a parcela de radiação que é emitida de uma superfície e alcança a outra;

A_i - área da superfície i ;

\aleph_r^i - perda de energia por radiação na superfície i ;

h_{SB} - constante de Stefan-Stefan-Boltzmann;

Θ_i - temperatura absoluta da superfície i ;

Para um sistema de duas superfícies que se irradiam, a Equação B.1 pode ser simplificada para dar à taxa de transferência do calor entre superfícies i e j como:

$$\aleph_r = h_s \varepsilon_i^e F_{ij} A_i (\Theta_i^4 - \Theta_j^4) \quad (\text{B.2})$$

onde: Θ_i , Θ_j = são as temperatura absolutas nas superfícies i e j , respectivamente.

ANEXO C – Influência do tamanho dos passos de tempo (*timesteps*)

Um dos aspectos importantes durante a execução de uma análise com o software ANSYS, que envolva geração de calor adiabático, é o tamanho do passo de tempo (*timestep*) utilizado e/ou da subdivisão do mesmo (*substeps*). A subdivisão do passo de tempo está diretamente relacionada (proporção inversa) à quantidade de calor gerado, conforme pode ser observado no exemplo a seguir - bloco hipotético.

Um bloco hipotético com 60m de altura e 40m de largura foi analisado sob duas condições dentro de um período de tempo pré-estabelecido. A análise térmica transiente foi conduzida utilizando-se o ANSYS. O objetivo foi verificar a importância na definição do tamanho do substep ou número de substeps dentro de cada *timestep*, que por sua vez está associado a cada lançamento de camada na metodologia desenvolvida.

Em uma primeira situação o bloco foi lançado em uma única camada (um *timestep*) enquanto que na segunda situação a mesma geometria final foi atingida com o lançamento dividido em cinco camadas (cinco *timesteps*). O número total de *substeps* foi variado entre 1 e 400 para a avaliação da temperatura máxima final atingida em cada situação de análise.

Os seguintes dados foram utilizados:

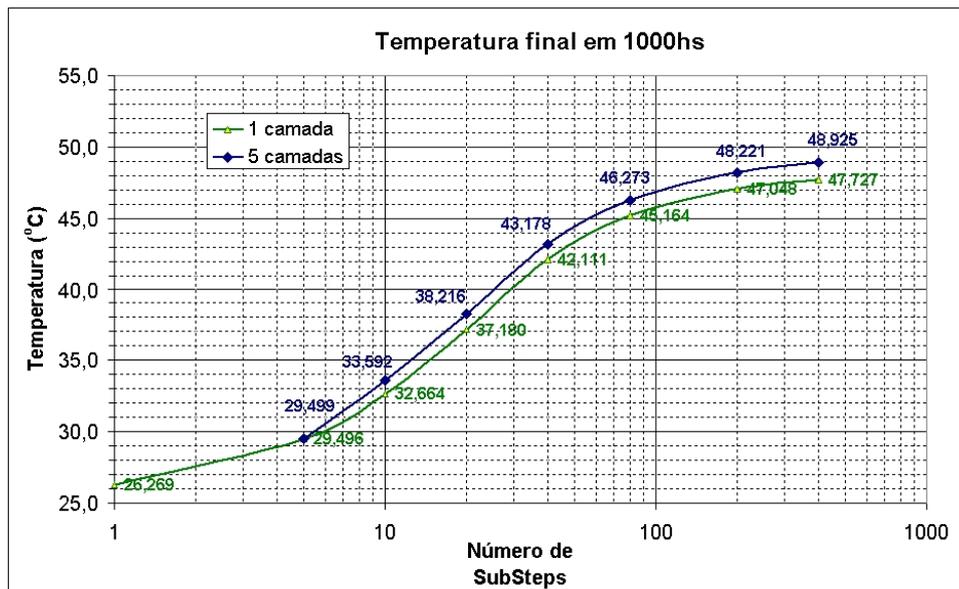
- Temperatura de lançamento do concreto constante e igual a 26°C;
- Temperatura ambiente e da fundação constantes e iguais a 25°C;
- Curva de geração de calor conforme os dados dos ensaios de FURNAS (PACELLI DE ANDRADE, 1996), incrementada em 20
- Coeficiente de convecção concreto-ar aplicado ao topo e laterais do bloco com valor de 50.232 J/m²h°C;
- Calor específico de 0,24 cal/g.°C;

- Condutividade térmica de 6.445,93 J/m.h.°C;
- Densidade do concreto de 2.388 kg/m³;
- Propriedades térmicas semelhantes a do concreto foram adotadas para a rocha de fundação (basalto).

As análises foram conduzidas até o tempo de 1000 horas que é superior ao período de geração de calor. Na primeira situação de análise, toda a geração de calor está confinada dentro de um único *timestep* ou passo de tempo (e da única camada). Na situação de análise em cinco camadas, somente as duas primeiras camadas não estarão gerando calor ao final de 1000 horas.

A figura 62 mostra a comparação da temperatura final atingida entre as duas situações para diferentes números de substeps.

Figura 62: Influência do número de *substeps* na temperatura máxima



Fonte: (LACERDA et al., 2005)

Os seguintes aspectos podem ser observados na figura 7:

- O número de substeps deve ser suficientemente grande de tal forma a "captar" toda a influência da curva de geração de calor, especialmente no seu início onde a maior quantidade de calor é gerada. Para se compreender essa afirmação considere a situação de uma única camada com um único substep. A figura 7 indica que a temperatura atingida em 1000 horas é apenas levemente superior à temperatura de lançamento. Isso ocorre porque como se tem apenas um substep no intervalo de 1000 horas,

o ANSYS considera para a análise a quantidade de calor correspondente a 500 horas (metade do intervalo) distribuída sobre todo o intervalo. Como a quantidade de calor gerada em 500 horas é muito baixa, a temperatura do bloco não sofre a elevação esperada. Em outras palavras, é preciso um número de substeps grande o suficiente para que a geração de calor das primeiras horas possa ser captada;

- As curvas da figura 7 tendem a um valor assintótico com o crescimento do número de substeps. Esse fato corresponde a uma boa "discretização" do passo de tempo com os substeps;
- Aparentemente, a elevação da estrutura em camadas sugere que temperaturas mais altas são atingidas. Esse fenômeno pode ser explicado uma vez que a estrutura em camada única, ao longo de 1000 horas, possui um maior perímetro de troca de calor. Entretanto, o modelo estudado é uma situação hipotética que não poderia ser executada na prática e para se afirmar algo nesse sentido é essencial a comparação de modelos factíveis. Novamente, cabe salientar que a proposta do teste acima é apenas explicar a importância do número de substeps;
- Quanto menor o intervalo de lançamento entre camadas, menor será o número necessário de substeps para o respectivo passo de tempo.

(LACERDA et al., 2005)