

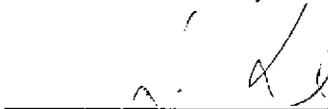
EFEITOS TÉRMICOS EM ESTRUTURAS
MACIÇAS DE CONCRETO

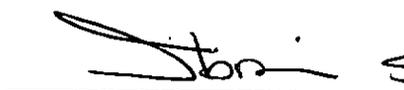
Geraldo Luiz de Carvalho Pereira

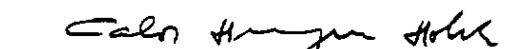
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:


Prof. Eduardo Moraes Rego Fairbairn


Prof. Luiz Landau


Prof. Ibrahim Shehata


Prof. Carlos Henrique Holck

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Março de 1986

PEREIRA, GERALDO LUIZ DE CARVALHO

Efeitos Térmicos em Estruturas Maciças de Concreto (Rio de Janeiro, 1986).

, p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1986).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro

1. Estruturas maciças I. COPPE/UFRJ II. Título (Série)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que tornaram possível a realização deste trabalho, principalmente:

Gostaria de destacar duas pessoas que muito contribuíram para a conclusão deste trabalho e se empenharam na perspectiva de dar continuidade ao mesmo. Ao Eduardo Fairbairn e Luiz Landau, pela orientação, estímulo, amizade e confiança demonstrada, os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Luis Carlos Wrobel a simpática e valiosa atenção dispensada no início deste estudo.

A todos os colegas pelo carinho dedicado.

Aos companheiros Eliane e Magluta pelo apoio, amizade e compreensão.

A todo pessoal do laboratório de estruturas da COPPE, na pessoa da professora Lídia Shehata.

Ao pessoal do Núcleo de Computação Eletrônica da UFRJ, principalmente Lucia Bruno e Iris.

Aos meus pais, agradeço o incentivo constante.

Aos engenheiros Roberto Diniz e Quintiliano Mascarenhas Guedes pela amizade e profissionalismo demonstrados.

À Sondotécnica pela posição favorável à divulgação de resultados dos meus trabalhos de consultoria.

Ao engenheiro Carlos Henrique Holck pelas orientações fornecidas.

A Fátima pela elaboração dos desenhos.

À Daisy pelo excelente trabalho de datilografia.

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

EFEITOS TÉRMICOS EM ESTRUTURAS
MACIÇAS DE CONCRETO

Geraldo Luiz de Carvalho Pereira

Março de 1986

ORIENTADOR: Eduardo Moraes Rego Fairbairn

PROGRAMA: Engenharia Civil

Este trabalho estuda os efeitos térmicos em estruturas maciças de concreto, considerando-se a construção incremental da estrutura. É dada ênfase ao problema das tensões térmicas que se instalam em barragens de gravidade de concreto causados, principalmente, pela súbita elevação da temperatura e posterior resfriamento gradual, durante a fase inicial de endurecimento do concreto, em decorrência da quantidade de calor gerado nas reações de hidratação do concreto. A distribuição de temperatura é determinada através da análise linear transiente da transferência de calor pelo método dos elementos finitos num domínio bidimensional. Para cálculo das tensões de origem térmica supõe-se, inicialmente, o concreto como um material elástico linear, fazendo-se a análise linear, convencional, pelo método dos elementos finitos. Apresenta-se a formulação da análise visco-elástica linear aplicada a materiais com envelhecimento, que traduz com maior precisão o comportamento do concreto, e resolve-se o problema elasticamente pelo método de campo de temperaturas equivalentes. Finalmente são mostrados exemplos acadêmicos a título de comparação de resultados e um exemplo de aplicação real da análise térmica a um muro de transição de uma usina hidrelétrica.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL FULLFIL-
MENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
(M. Sc.)

THERMAL EFFECTS ON MASS CONCRETE STRUCTURES

Geraldo Luiz de Carvalho Pereira

March 1986

CHAIRMAN: Eduardo Moraes Rego Fairbairn

DEPARTMENT: Engineering Civil

This work studies thermal effects on mass concrete structures, considering the incremental construction of the structure. Particular attention is given to problem of thermal stress which are find in gravity concrete dams, caused, mainly, by high increases of temperature and following gradual cooling, during the inicial phasis of hardening of concrete, dued the quantity of heat generated by the reactions of cement hidration. The temperature distribution is evaluated by transient linear analysis of heat transfer using the finite elements method on a bidimensional field. In order to calculated the thermal stress, concrete is supposed to be a linear elastic material, and conventional linear analysis with the finite element method is applied. The formulation of the aging material viscoelastic linear analysis is presented. This method reflects more sharply the concrete behavior and the problem is solved elastically through the method of equivalent temperature field. Finally, simple examples, are presented as well as a actual application in the thermal analysis of a gravity dams.

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO II - TRANSFERÊNCIA DE CALOR</u>	15
II.1 - Introdução.....	15
II.2 - Processos de Transferência de Calor.....	16
II.2.1 - Condução.....	16
II.2.2 - Radiação.....	17
II.2.3 - Convecção.....	18
II.3 - Equação da Transferência de Calor.....	19
II.3.1 - Equação de Fourier.....	19
II.4 - Condições Iniciais e de Contorno.....	23
II.5 - O Método dos Elementos Finitos Aplicado a Proble- mas de Transferência de Calor.....	26
II.5.1 - Introdução.....	26
II.5.2 - Formulação Básica.....	26
II.5.3 - Regras de Recorrência.....	31
<u>CAPÍTULO III - ANÁLISE DE TENSÕES</u>	34
III.1 - Introdução.....	34

	<u>Pág.</u>
III.2 - Teoria Básica.....	41
III.3 - Viscoelasticidade.....	47
III.4 - O Método dos Elementos Finitos.....	55
<u>CAPÍTULO IV - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA.....</u>	<u>60</u>
IV.1 - Introdução.....	60
IV.2 - Descrição do Programa.....	61
IV.3 - Identificação dos Dados de Entrada.....	61
<u>CAPÍTULO V - EXEMPLOS.....</u>	<u>66</u>
V.1 - Determinação da Distribuição de Temperaturas em uma Construção Incremental Considerando-se o Fluxo de Calor Unidirecional.....	66
V.2 - Anel de Concreto Submetido à Variação Lenta de Temperatura.....	66
V.3 - Placa Quadrada Submetida a um Carregamento Unifor- memente Distribuído.....	70
V.4 - Análise do Estado Térmico Durante a Construção do Muro de Transição Esquerdo MRE da Usina de Samuel.	71
<u>CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO.....</u>	<u>85</u>
<u>BIBLIOGRAFIA.....</u>	<u>87</u>

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda o problema da análise térmica em estruturas de concreto e é particularmente orientado às aplicações no estudo das variações de temperatura em barragens de gravidade de concreto.

De um modo geral, a análise térmica de um corpo sólido elástico envolve conceitos da mecânica dos sólidos e da termodinâmica conduzindo a uma formulação acoplada. Em problemas de Engenharia Civil pode-se desprezar a dissipação termo-elástica e os efeitos da inércia. Assim, o problema térmico fica dividido em dois problemas diferentes que são resolvidos separadamente e consecutivamente. O primeiro problema é o da transferência de calor que permite achar a distribuição de temperaturas; o segundo consiste na determinação do campo de tensões térmicas.

As estruturas de concreto são muito sensíveis às variações de temperatura em virtude da pequena capacidade do concreto de suportar tensões de tração.

As barragens de concreto são submetidas a uma contínua troca de calor com os meios circundantes e, por conseguinte, os fatores climáticos que condicionam as variações de temperatura constituem elementos fundamentais na análise térmica da estrutura. Além disso, a idealização estrutural das barragens de gravi-

dade, como o próprio nome sugere, exige grandes volumes de concreto e a construção destas estruturas vem apresentar um problema térmico peculiar, pois uma considerável quantidade de calor é liberada pelas reações exotérmicas de hidratação dos componentes do cimento, durante o processo de endurecimento do concreto. Devido às elevadas dimensões que estas estruturas geralmente necessitam, o calor gerado encontra dificuldade de dissipação para o meio ambiente, trazendo, como consequência, uma súbita elevação da temperatura e posterior resfriamento gradual.

A análise de tensões térmicas apresenta algumas particularidades no âmbito da análise estrutural. Uma inspeção das equações da teoria da termoelasticidade mostra que, nos corpos sem restrições a deslocamentos, às variações de temperatura uniformes ou lineares com as coordenadas não introduzem esforços na estrutura. As barragens apresentam em sua concepção estrutural ligações razoavelmente rígidas com a fundação e verifica-se que os campos térmicos que se formam, principalmente aqueles gerados pelo calor de hidratação do cimento, são fortemente curvos. Constatado o estado de tensões que se instalam durante a fase de construção, é de interesse ressaltar que os problemas de dimensionamento, no que concerne a projeto de estruturas submetidas a efeitos térmicos, normalmente não encontram solução convencional. Os parâmetros que determinam a grandeza das tensões são, fundamentalmente, o gradiente térmico, o módulo de elasticidade e o coeficiente de dilatação térmica do material, sendo o parâmetro resistente, basicamente, a resistência do material. Por exemplo, uma solução que imponha uma maior resistência ao concreto, acar

retaria um aumento do consumo de cimento e do módulo de elasticidade e, conseqüentemente, causaria um acréscimo das tensões térmicas (construtores de plataformas de petróleo no mar do Norte pesquisam soluções baseadas em concreto leve cujas características térmicas e relação entre módulo de elasticidade e resistência seriam mais favoráveis).

No atual estágio do conhecimento, a solução que vem sendo empregada consiste no controle da elevação da temperatura a partir da análise dos fatores que influenciam as variações de temperatura. Estes fatores podem ser tratados em três grupos distintos: (a) fatores climáticos; (b) calor de hidratação dos cimentos; (c) condições de dissipação de calor da estrutura.

São vários os fatores climáticos que vêm influenciar as variações de temperatura. Dentre eles pode-se citar: a radiação solar, velocidade dos ventos, a temperatura da água do reservatório, a variação da temperatura do ar diário, mensal e anual e etc... A avaliação precisa de todos estes fatores é impraticável, buscando-se algumas simplificações de acordo com o clima da região a partir de experiências anteriores. Um estudo detalhado sobre o assunto pode ser encontrado na referência [45].

A Figura 1.1 indica a penetração das ondas diárias, mensais e anuais no corpo de uma barragem e pode-se verificar que a influência mais significativa é da variação anual da temperatura. No Brasil, com o clima predominantemente tropical, a variação anual da temperatura não é muito acentuada, ao contrário

de outros países. A título de exemplo, a Figura 1.2 mostra as isotérmicas de uma barragem na URSS, podendo-se constatar as variações de temperaturas no verão e no inverno.

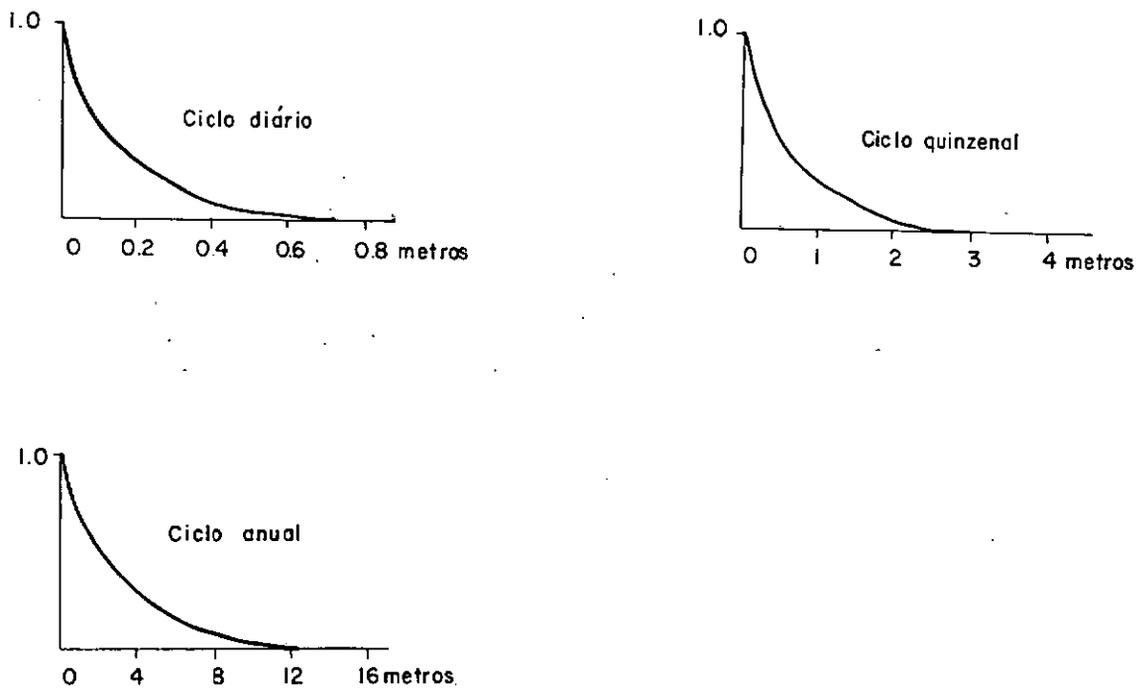


FIG. 1.1—MANIFESTAÇÕES TÉRMICAS DEVIDO AOS CICLOS DE TEMPERATURA DIÁRIA, QUINZENAL E ANUAL

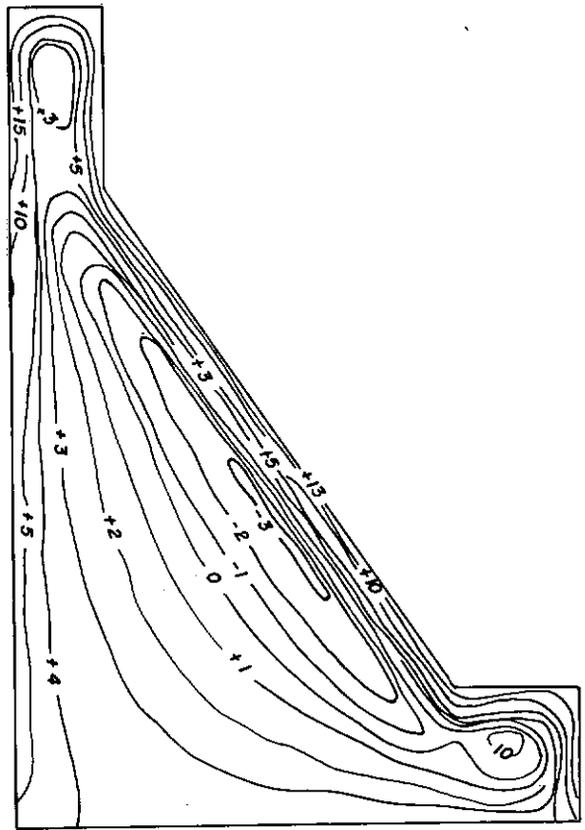
O aglomerante mais utilizado na fabricação dos concretos das barragens é o cimento portland. Em virtude do alto calor de hidratação detectado nos cimentos comuns opta-se, em alguns casos, pela utilização de cimentos com baixo calor de hidratação. Um outro recurso também consagrado nas construções de barragens é a substituição de parte do cimento por material pozolânico. As pozolanas são materiais silíceos ou silíceos-aluminosos, que possuem pouca ou nenhuma característica aglomerante quando

misturados à água. Quando finalmente moídos e adicionados aos cimentos, reagem com a cal livre do cimento, produzindo um material resistente.

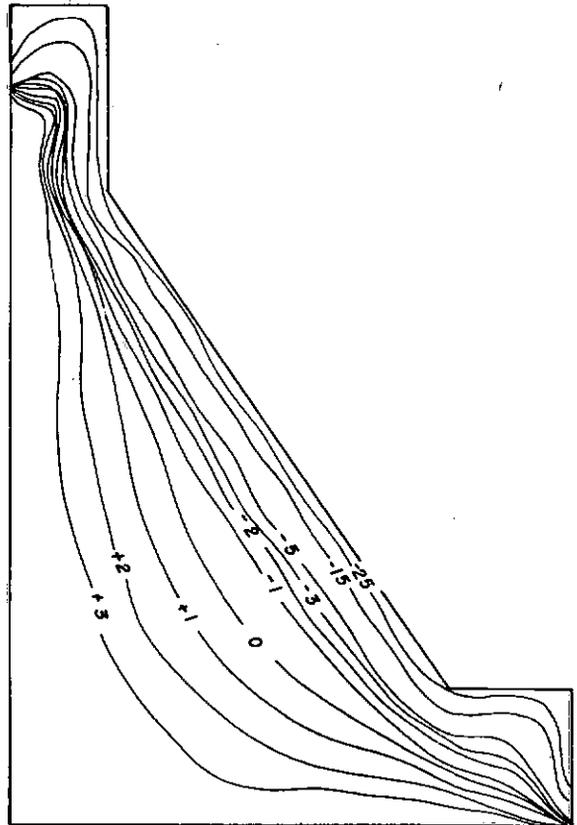
A avaliação do calor gerado pelo concreto é feita através da determinação das curvas de calor adiabáticas dos aglomerantes em laboratório. Em geral os resultados são expressos pelas curvas de elevação adiabática da temperatura obtidas com auxílio das propriedades térmicas do concreto de barragens são pobres, utilizando-se um concreto de melhor qualidade na periferia da estrutura. A Figura 1.3 apresenta as curvas de elevação adiabática da temperatura para alguns concretos utilizados em barragens brasileiras, mostrando também alguns traços com adição de pozolana.

Os fatores que influenciam a dissipação de calor da estrutura se destacam dos demais pois são justamente estes que permitem maior flexibilidade de manipulação, com intuito de favorecer a dissipação de calor, diminuindo-se o gradiente térmico. Estes são, basicamente, as propriedades térmicas dos materiais e das formas e o ritmo de construção.

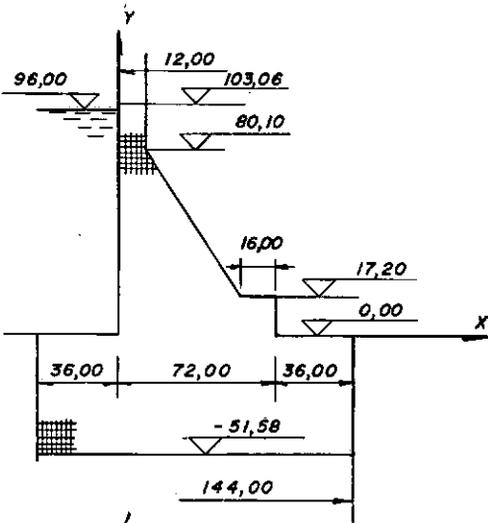
As propriedades térmicas dos materiais são de suma importância por virem a definir as propriedades térmicas dos concretos e que por sua vez determina a capacidade da estrutura de reter o calor ou dissipá-lo no meio ambiente. Estudos detalhados dos materiais empregados nas barragens brasileiras podem ser encontrados nas referências [4, 4⁵] e constituem uma área especifi



(A)

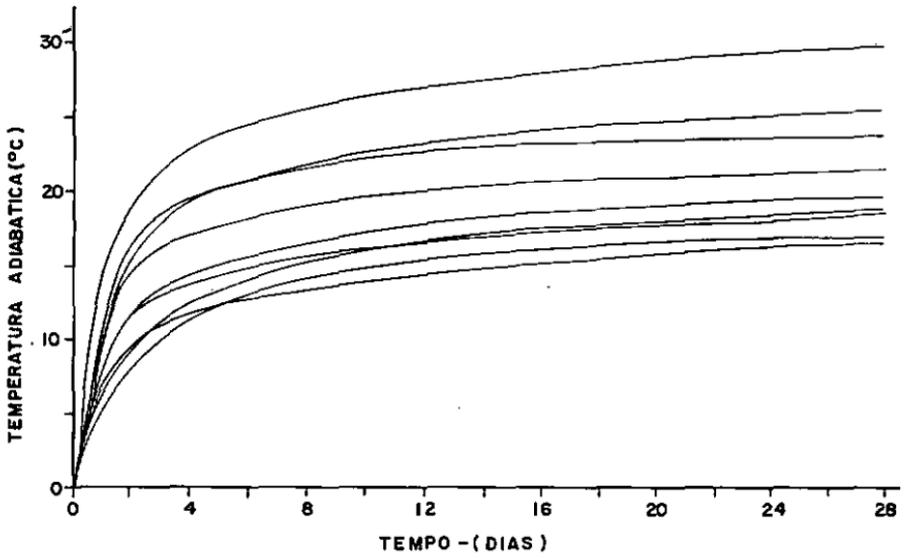


(B)

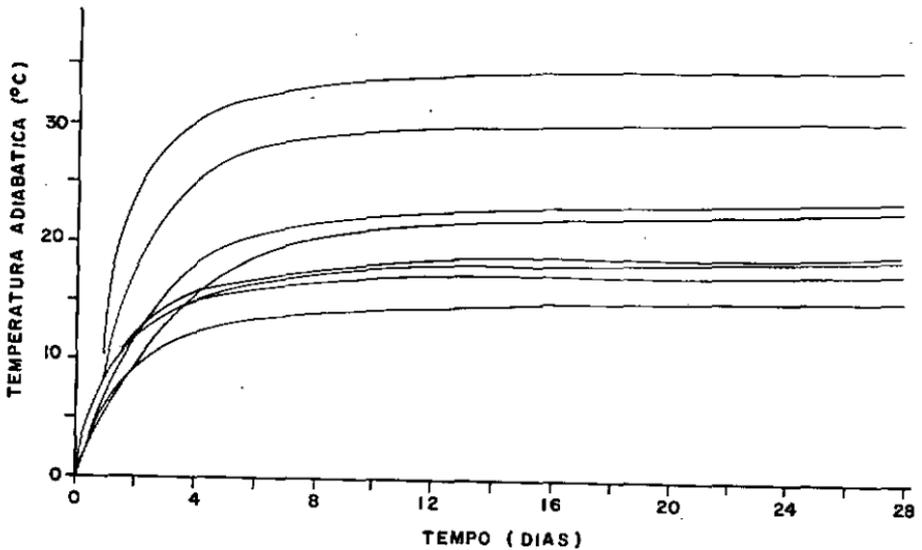


(C)

FIG. 1.2 — ISOTERMAS DE UMA BARRAGEM NA URSS
 (A) verão (B) inverno (C) seção transversal



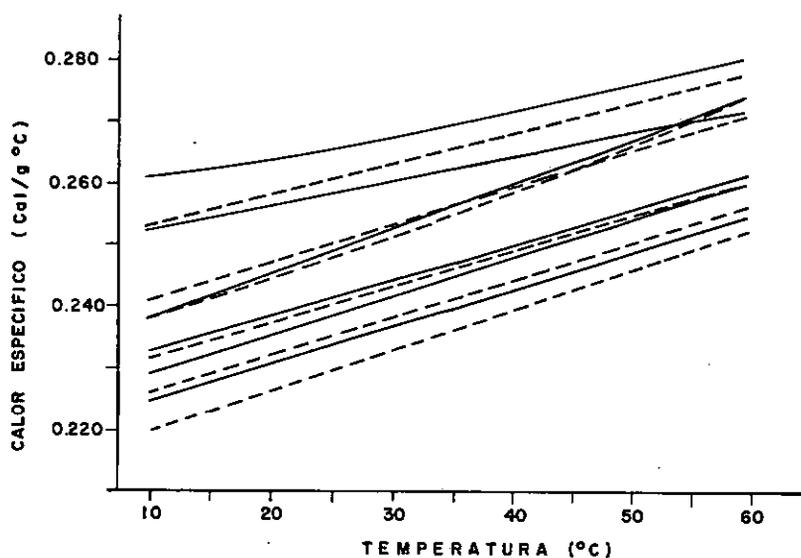
(A)



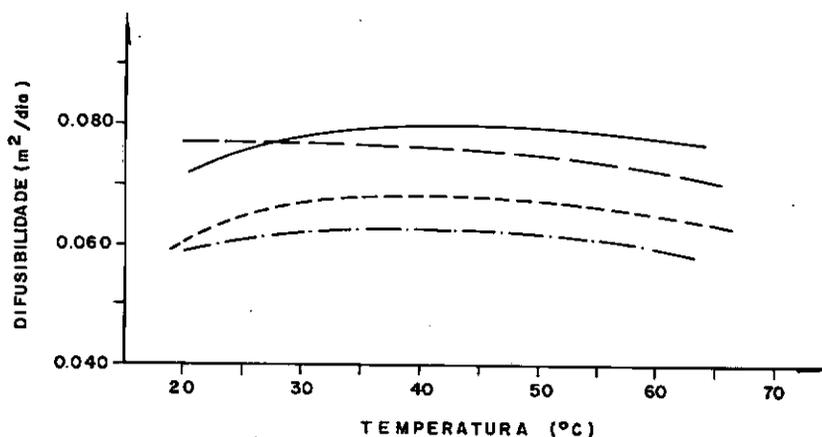
(B)

FIG. 1.3 — ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA PARA OS
CONCRETOS UTILIZADOS EM
(A) ITAIPU E (B) TUCURUI

ca da engenharia de barragens denominada "Tecnologia dos Materiais". A título de ilustração a Figura 1.4 mostra algumas das propriedades térmicas dos concretos das barragens de Tucuruí e Itaipu. Na Figura 1.5 pode-se observar a influência da variação da difusibilidade na elevação de temperatura numa estrutura concretada por camadas.



(A)



(B)

FIG. 1.4 — PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS CONCRETOS UTILIZADOS EM TUCURUÍ E ITAIPU

(A) calor específico (B) difusibilidade térmica

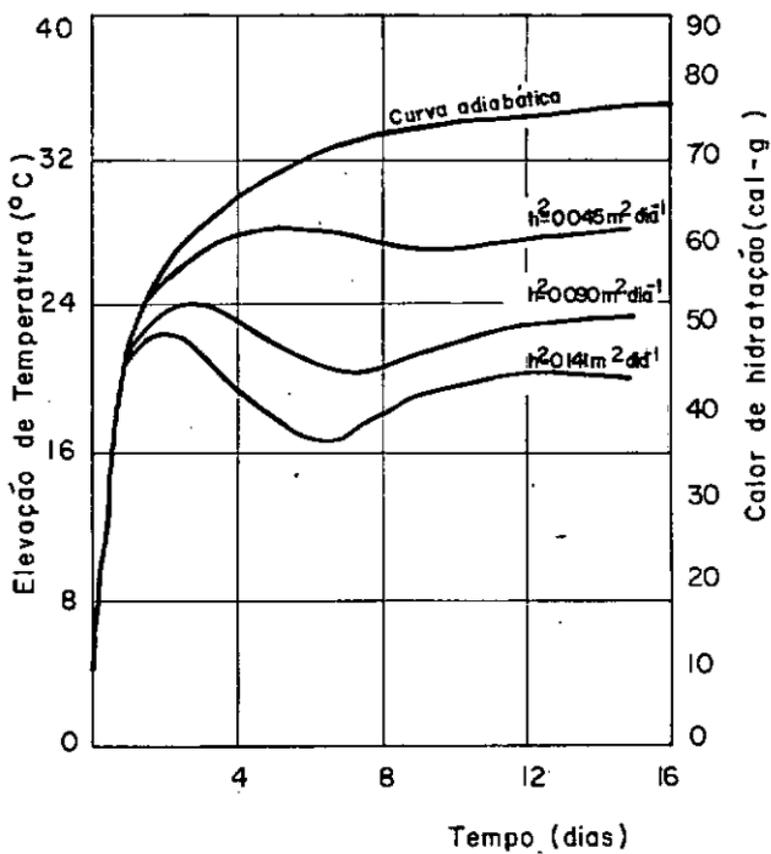
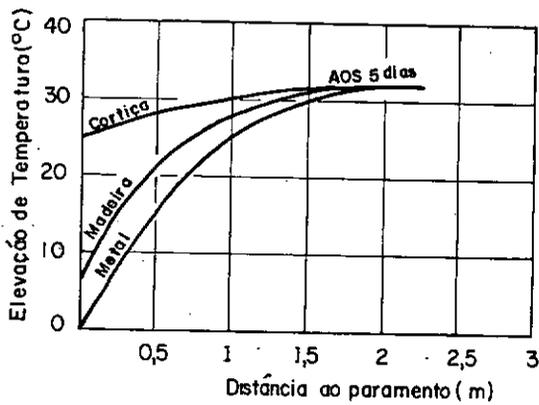


FIG.1.5— INFLUÊNCIA DA DIFUSIBILIDADE TÉRMICA SOBRE A ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

A opção adequada do tipo de formas a empregar exerce significativa influência na dissipação de calor do corpo da barragem. A Figura 1.6 ilustra a diferença verificada quando da utilização de formas metálicas e de madeira.



Fl. 6

FIG. 1.6 — COMPARAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA COM FORMAS DE MADEIRA, DE METAL E DE CORTIÇA

Com o objetivo de tornar viável a construção de grandes barragens e mesmo, em função da tecnologia disponível, a engenharia de barragens vem então, utilizando soluções como a técnica de construção em camadas de pequena altura (se comparada com a altura total), concretadas com intervalos de tempo entre uma e outra, obtendo-se uma elevação da temperatura que seja compatível com a capacidade resistente da estrutura, vindo a proporcionar ainda, o resfriamento parcial, antes do início da colocação da camada seguinte. Estes parâmetros, altura das camadas e intervalo de tempo entre camadas, juntamente com as temperaturas de lançamento dos concretos, recebem a denominação de ritmo de concretagem ou velocidade de construção.

Em vista do desenvolvimento atual da tecnologia de construção de barragens ou construtores têm alcançado um ritmo de concretagem bastante veloz, o que vem exigir a busca de novas soluções. A alternativa que se dispõe, a fim de permitir uma velocidade de construção maior, é o emprego das técnicas de pré ou pós-refrigeração do concreto. A primeira importa em diminuir a temperatura de lançamento do concreto fresco a partir da adição de gelo em cubos ou em escamas em substituição de uma parte de água. Tal procedimento implica na diminuição do pico de elevação da temperatura em virtude da absorção pelo próprio concreto, do calor por ele gerado, necessário à estabilização da temperatura, próximo à temperatura média anual do ar. Esta técnica vem sendo empregada na construção de algumas barragens brasileiras. O pós-resfriamento do concreto é um método de refrigeração artificial do concreto por meio de serpentinas imersas na massa do concre-

to. Não se tem notícia de aplicação deste processo em barragens brasileiras.

A Figura 1.7 ilustra as elevações de temperatura características de um maciço de concreto executado com diferentes ritmos de concretagens.

A avaliação e a definição dos elementos considerados anteriormente constituem os dados a serem fornecidos ao programa de computador de transferência de calor. Este programa simula a construção incremental num domínio bi-dimensional e em regime transiente linear. É baseado no método dos elementos finitos e a sua formulação é objeto do Capítulo II deste trabalho. O programa determina, a cada instante a distribuição de temperatura na seção transversal da barragem. O Capítulo III se ocupa da determinação das tensões térmicas a partir da distribuição de temperaturas já calculadas em cada instante. São apresentados alguns procedimentos sugeridos pela literatura especializada bem como as teorias básicas da termoelasticidade e da viscoelasticidade linear considerando-se o envelhecimento do concreto. O procedimento proposto para cálculo das tensões térmicas consiste na determinação de um campo de temperaturas equivalentes através da função de relaxação do concretos empregados e a solução é obtida resolvendo-se o problema elasticamente pelo método dos elementos finitos. É suposta a validade das hipóteses do estado plano de deformações e são utilizados elementos finitos isoparamétricos de quatro nós.

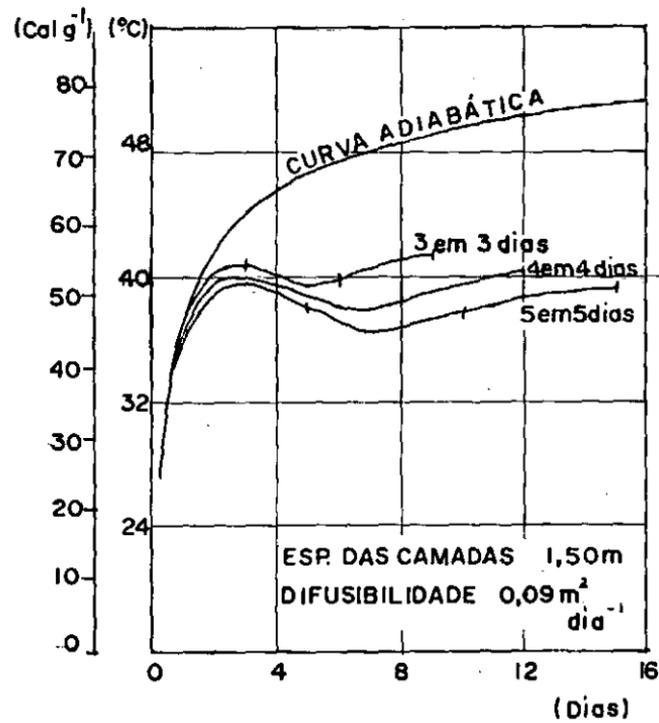
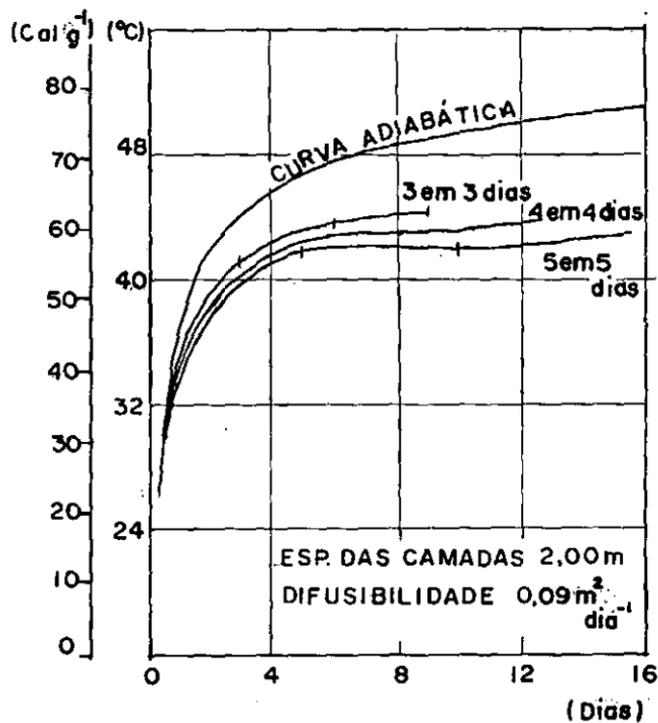


FIG. 1.7 — INFLUÊNCIA DA ALTURA DAS CAMADAS SOBRE A ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA

A descrição do programa e alguns detalhes relevantes da simulação da construção incremental são relatados no Capítulo IV.

No Capítulo V são apresentados alguns exemplos acadêmicos onde as soluções obtidas são comparadas com resultados analíticos ou experimentais e outras fontes de consulta. É apresentado um problema real de cálculo de temperaturas durante a construção de um muro de transição de uma barragem brasileira.

Finalmente, no Capítulo VI são discutidos os resultados e assinalados alguns pontos julgados importantes com a perspectiva de orientar e incentivar futuras pesquisas nestes assuntos.

CAPÍTULO II

TRANSFERÊNCIA DE CALOR

II.1 - INTRODUÇÃO

Num corpo no estado sólido, líquido ou gasoso com temperaturas diferentes em pontos diferentes, estabelece-se um fluxo de calor das regiões mais quentes para as partes mais frias. A análise da transferência de calor tem por objetivo a determinação da distribuição de temperaturas e dos fluxos de calor, no corpo, ao longo do tempo. Quando o campo de temperaturas não mais varia com o tempo, diz-se que o fluxo de calor é estacionário ou permanente. Caso contrário diz-se que é transiente ou não permanente.

Existem três formas básicas de transferência de calor: a condução, quando o calor passa através do corpo molécula por molécula; a convecção quando o calor é transferido pelo movimento relativo das partes do corpo aquecido e a radiação, quando o calor é transferido de um corpo para outro afastado, pela radiação eletromagnética. Nos itens a seguir são mostradas, resumidamente, as equações matemáticas que regem estas formas de transmissão de calor.

II.2 - PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

II.2.1 - Côndução

A condução é o processo pelo qual a transmissão de calor se dá através de um meio material sem movimentos internos expressivos e sem intervenção da radiação. É o processo de transmissão de calor característico dos corpos sólidos podendo também ocorrer em fluídos em espessuras muito pequenas.

A relação básica para a transmissão de calor por condução é dada pela lei de Fourier:

$$q_x = - k A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

em que

q_x - quantidade de calor que atravessa a área A na unidade de tempo

A - área considerada

$\frac{dT}{dx}$ - gradiente térmico

k - fator de proporcionalidade - coeficiente de condutibilidade térmica do material

II.2.2 - Radiação

A radiação é um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo a alta temperatura para um de mais baixa, quando tais corpos estão separados no espaço, mesmo que exista vácuo entre eles. O termo radiação é geralmente aplicado a todas as espécies de fenômenos que resultam do transporte de energia através de um meio transparente ou através do espaço. A energia transmitida dessa maneira é chamada de calor radiante.

A lei que rege a transmissão de calor radiante é expressa pela relação de Stefam-Boltzman

$$q_r = h_r(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.2)$$

onde:

T_1 - temperatura da superfície

T_2 - temperatura do meio em que se encontra a superfície

h_r - coeficiente de transmissão de calor por radiação

q_r - calor radiante

Em problemas de engenharia civil tal como o estudo de barragens tem grande importância o estudo da radiação solar sobre o corpo da barragem. A referência [45] trata o assunto detalhadamente sob o ponto de vista teórico e experimental.

II.2.3 - Convecção

Dã-se o nome de convecção ao processo de transmissão do calor por intermédio do movimento de um fluído. É o processo principal de troca de calor entre sólidos e fluídos, embora ocorra condução em uma pequena camada próxima a superfície sólida chamado camada de passagem.

Diz-se que a convecção é natural, se o movimento do fluído for devido somente às diferenças de densidade causadas pelas diferenças de temperaturas. Se o movimento do fluído for devido a outras causas diz-se que a convecção é forçada.

O calor transmitido por convecção entre uma superfície e um meio é dado pela lei de Newton cuja expressão analítica é:

$$q_c = h_c(T - T_e) \quad (2.3)$$

em que,

q_c - quantidade de calor transmitida

h_c - coeficiente de transmissão superficial por convecção

$T = T(x,y,z,t)$ - temperatura do corpo na fronteira com o fluído

$T_e = T_e(t)$ - temperatura do meio em que se encontra o corpo

h_c é um coeficiente que pode variar com o tempo e espaço de maneira prescrita, isto é, $h_c = h_c(x,y,z,t)$.

Se $h_c = h_c(x,y,z,t,T)$ onde T é a temperatura, o problema é não-linear.

II.3 - EQUAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

II.3.1 - Equação de Fourier

A Figura 2.1 representa um elemento infinitesimal de um corpo sólido. Lembrando a relação expressa pela equação (2.1) o fluxo que entra no elemento é:

$$q_x = -k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) dy dz \quad (2.4.a)$$

$$q_y = -k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dz \quad (2.4.b)$$

$$q_z = -k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy \quad (2.4.c)$$

o calor que sai do elemento será

$$q_{x+dx} = \left| -k_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right| dy dz \quad (2.5)$$

mais as duas equações análogas.

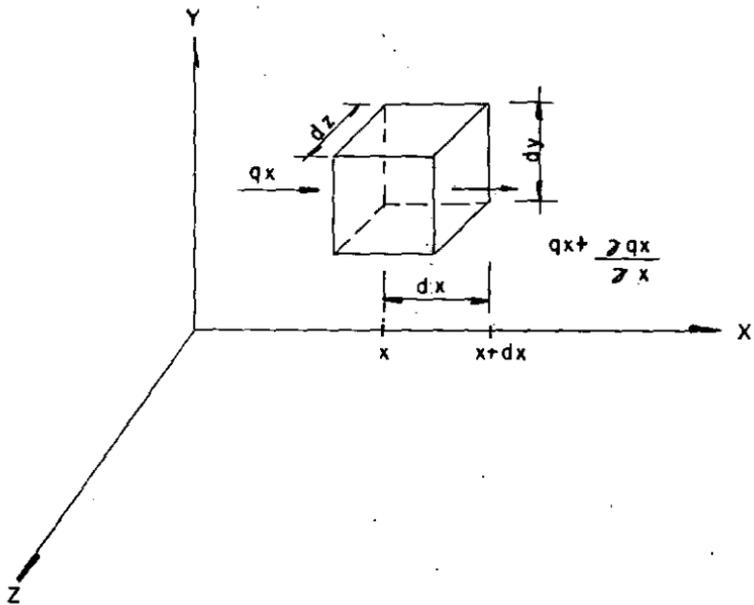


FIG. 2.1 — ELEMENTO INFINITESIMAL

A diferença entre o calor que sai e calor que entra no elemento \bar{e} :

$$\Delta q_x = q_x - q_{x+dx} = - \frac{\partial(q_x)}{\partial x} dx dy dz \quad (2.6)$$

sendo as expressões semelhantes para as outras duas direções.

Fazendo o balanço interno de energia, ou seja, o calor armazenado no elemento mais o calor gerado deverá ser igual à variação da energia interna do elemento, teremos:

$$\Delta q + \frac{\partial q_g}{\partial t} = c \gamma \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

onde:

$$\Delta q = \Delta q_x + \Delta q_y + \Delta q_z \quad (2.8)$$

c - calor específico

γ - peso específico

$\frac{\partial T}{\partial t}$ - variação de temperatura

$\frac{\partial q_g}{\partial t}$ - taxa de calor gerado

Substituindo as equações (2.7) em (2.9) e esta na equação (2.8) obtemos:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{dq_g}{dt} = c \gamma \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

Esta equação mais as condições de contorno resolvem o problema da transferência de calor.

Analisando a equação 2.10 observamos que se os coeficientes de condutibilidade térmica k_x , k_y , k_z forem dependentes da temperatura o problema não é linear. Reescrevendo a equação (2.10) sob a forma compacta usando a notação inicial obtemos

$$(k_{ij} \dot{T}_{,j})_{,i} + \dot{q}_g = \gamma c \dot{T} \quad (2.10.a)$$

onde o super índice (.) indica derivação em relação ao tempo.

Se o material é ortotrópico e os eixos de referência coincidem com os eixos de ortotropia a equação (2.10.b) reduz-se a:

$$(k_{ii} T_{i,j})_{,i} + \dot{q}_g = \gamma c \dot{T} \quad (2.10.b)$$

se os coeficientes k_{ij} não variarem no espaço obteremos

$$k_{ii} T_{i,i} + \dot{q}_g = \gamma c \dot{T} \quad (2.10.c)$$

e ainda, suponho que o material é isotrópico vem

$$k T_{ii} + \dot{q}_g = \gamma c \dot{T} \quad (2.10.d)$$

Esta é a forma (eq. 2.10.e) da equação de Fourier de transmissão de calor adotada para a análise térmica de estruturas maciças de concreto.

II.4 - CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Seja o corpo sólido mostrado na Figura 2.2.

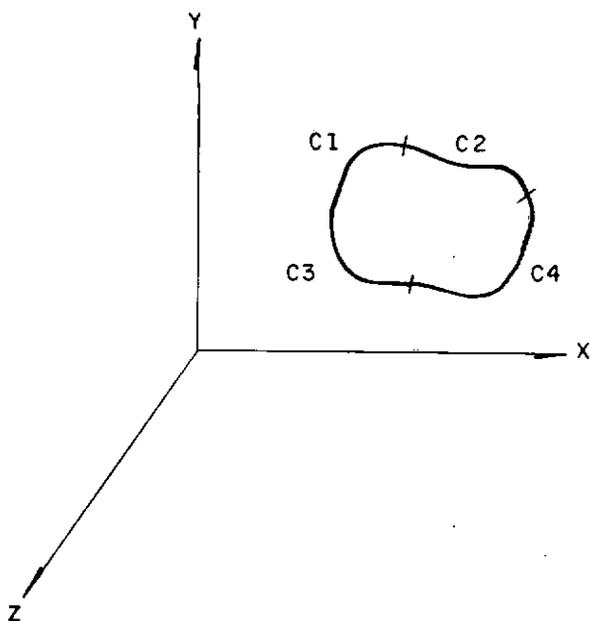


FIG. 2.2 - CORPO SÓLIDO

A distribuição da temperatura inicial no corpo é uma função das coordenadas e pode ser escrita

$$T(x,y,z,0) = T(x,y,z) \quad (2.11)$$

ou ainda, usando a notação indicial

$$T(x_i, 0) = \bar{T}(x_i) \quad (2.11.a)$$

Segundo a referência [7] as condições de contorno podem ser generalizadas pela expressão

$$n_i q_i = n_i k_{ij} T_{,j} = h(T^m - T_e^m) + \bar{q} \quad (2.12)$$

sendo n_i , $i = 1, 2, 3$ - cossenos diretores da normal ao contorno

\bar{q} - fluxo prescrito

A partir desta generalização das condições de contorno, podemos encontrar os seguintes casos particulares:

(a) Temperatura prescrita na superfície

$$\text{Fazendo } h = \infty; m = 1 \text{ e } \bar{q} = 0$$

obtemos:

$$T_e(x_i, t) = F(x_i, t) \text{ em } C1 \quad (2.13)$$

sendo $F(x_i, t)$ uma função prescrita.

(b) Fluxo prescrito

Assumindo que $h = 0$ a equação (2.12) se escreve

$$n_i k_{ij} T_{,j} = \bar{q}(x_i, t) \text{ em } C_2 \quad (2.14)$$

onde $\bar{q}(x_i, t)$ é uma função prescrita. A ocorrência de $\bar{q}(x_i, t) = 0$, indica que o contorno é uma superfície adiabática, isto é, não há troca de calor através dela.

(c) Convecção

Fazendo $\bar{q} = 0$, $m = 1$ e $h = h_c$, verã

$$n_i k_{ij} T_{,j} = h_c(T_e - T) \text{ em } c_3 \quad (2.15)$$

(d) Radiação

Quando $h = h_r$, $\bar{q} = 0$ e $m = 4$ a equação (2.12) transforma-se em

$$n_i k_{ij} T_{,j} = h_r(T_e^4 - T^4) \quad (2.16)$$

II.5 - O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO A PROBLEMAS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

II.5.1 - Introdução

Os métodos de solução de problemas de transferência de calor podem ser divididos em dois grupos: os métodos analíticos e os métodos numéricos. Os métodos analíticos são limitados a problemas simples e encontramos algumas soluções em [13, 37]. Os métodos numéricos, atualmente, são os mais adotados em virtude das facilidades computacionais. Os métodos numéricos subdividem-se em três grandes grupos, a saber: o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos e o método dos elementos de contorno. O método dos elementos finitos está bastante difundido, aceito e empregado na resolução de problemas de engenharia e particularmente aos problemas de transferência de calor [7, 51, 54]. Na apresentação da formulação do método dos elementos finitos aplicados a problemas de transferência de calor, aborda-se diretamente o caso de regime transiente, que é de interesse neste trabalho.

II.5.2 - Formulação Básica

Os problemas de transferência de calor lineares são governados pela equação de Fourier (2.10.d) com as condições de contorno (2.12) e condições iniciais (2.11).

O desenvolvimento da formulação pode ser obtido pela aplicação do método de Galerkin, que como se sabe, corresponde ao enfoque variacional da equação (2.10.e).

Seja $T = T(x,y,z,t)$ a função incôgnita no domínio do corpo ilustrado na Figura 2.3.

Subdividindo o corpo em elementos finitos teremos, num elemento, as temperaturas aproximadas por

$$T(x,y,z,t) = \sum_1^n N_i(x,y,z) T_i(t) \quad (2.17)$$

Sendo $N_i(x,y,z)$ as funções de forma do elemento com n nós e $T_i(t)$ as temperaturas nodais.

Substituindo a (2.17) na Eq. (2.9) e aplicando o método de Galerkin, vem:

$$\int_R N_i \left\{ \left| \frac{\partial}{\partial n} \left(k_n \frac{\partial}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \right| \sum_1^n N_j \phi_j + \right. \\ \left. + \dot{q}_g - \gamma_c \frac{\partial}{\partial t} N_j \phi_j \right\} du dy dz \quad (2.18)$$

Modificando o lado esquerdo para as correspondentes integrais de volume e superfície, pelo teorema de Green, obtemos:

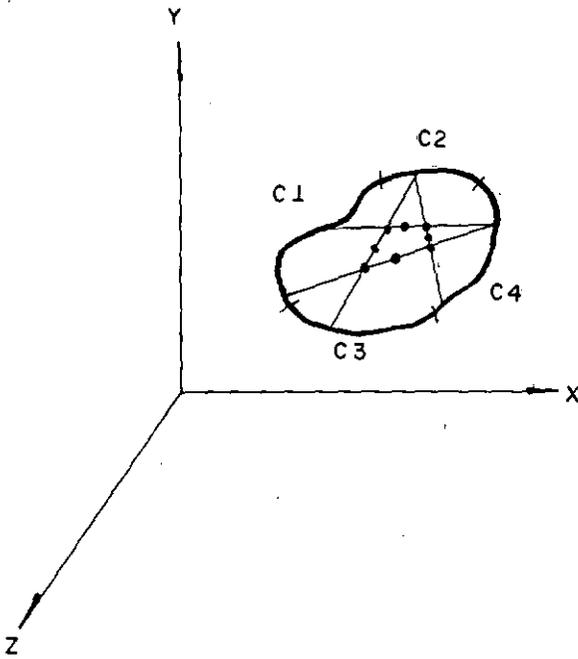


FIG. 2.3 - CORPO SÓLIDO DISCRETIZADO

$$\begin{aligned}
& \int_R \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \sum_1^n k_x \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \sum_1^n k_y \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \sum_1^n k_z \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) \phi_j \, dx \, dy \, dz + \\
& + \int_R N_i \dot{q}_g \, dx \, dy \, dz + \int_R N_i \gamma_c \sum_1^n N_j \phi_j \, dx \, dy \, dz + \\
& + \int_C N_i \left(\sum_1^n k_x \frac{\partial N_j}{\partial x} n_x + \sum_1^n k_y \frac{\partial N_j}{\partial y} n_y + \sum_1^n k_z \frac{\partial N_j}{\partial z} n_z \right) \phi_j \, dx = 0
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Analisando a equação (2.19) podemos fazer

$$K'_{ij} = \sum_1^{NE} \int_E \left(\frac{\partial N_i}{\partial n} k_n \frac{\partial N_j}{\partial n} + \frac{\partial N_i}{\partial y} k_y \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} k_z \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) \, dx \, dy \, dz \tag{2.19}$$

$$M'_{ij} = \sum_1^{NE} \int_E N_i \gamma_c N_j \, du \, dy \, dz \tag{2.20}$$

$$Q'_i = \sum_1^{NE} \int_E N_i q_y \, du \, dy \, dz \tag{2.21}$$

Substituindo (2.17) na (2.12) e levando a equação (2.19) surgem os seguintes casos:

(a) Temperatura prescrita ($h = \infty$, $m = 1$, $\bar{q} = 0$)

$$\int_{c_1} N_i \left| h \left(\bar{T} - \sum_1^n N_j T_j \right) \right| \, dc_1 \tag{2.22}$$

Separando as integrais, virá

$$\int_{c_1} N_i h \bar{T} dc_1 - \int_{c_1} N_i h N_j T_j dc_1 \quad (2.22.a)$$

O primeiro termo é a contribuição do contorno c_1 ao vetor de carga térmica e o segundo contribui para a matriz de condutividade térmica, ou seja

$$Q_i'' = \int_{c_1} N_i h \bar{T} dc_1 \quad (2.23.a)$$

$$K_{ij}'' = \int_{c_1} N_i h N_j T_j dc_1 \quad (2.23.b)$$

Se $h = \infty$ resulta na conhecida regra do número muito grande de introdução das condições de contorno.

(b) Fluxo prescrito ($h = \infty$)

A equação (2.21) com $h = 0$, substituída na equação (2.19) fornece o termo:

$$Q_i''' = \Sigma \int_{c_2} N_i \bar{q} dc_2 \quad (2.24)$$

que contribui para o vetor de carga térmica.

(c) Convecção ($h = h_c$; $m = 1$; $q = 0$)

Seguindo o mesmo procedimento, obtemos:

$$K_{ij}''' = \int_{c_2} N_i h_c N_j T_j dc_2 \text{ (matriz de condutividade térmica)} \quad (2.25)$$

$$Q_i''' = \int_{c_2} N_i h_c T_e dc_2 \text{ (carga térmica)} \quad (2.26)$$

Reescrevendo a equação (2.19), na forma seguinte

$$|K'_{ij} + K''_{ij} + K'''_{ij}| T + |M_{ij}| \dot{T} + |Q'_i + Q''_i + Q'''_i + Q''''_i| = 0 \quad (2.27)$$

ou ainda,

$$|K_{ij}| T + |M_{ij}| \dot{T} + Q_i = 0 \quad (2.28)$$

e então, em todo o domínio a equação (2.28) reduz-se a

$$|\underline{K}| T + |\underline{M}| \dot{T} + Q = 0 \quad (2.29)$$

A matriz $|K|$ é a matriz de condutividade térmica, a matriz $|M|$ é a matriz de capacidade calorífica, e $|Q|$ é o vetor de carga calorífica (térmica). Esta é a equação que governa o problema de transferência de calor pelo método dos elementos finitos.

II.5.3 - Regra de Recorrência

Seguindo o procedimento sugerido na referência $|^{27}|$, para a integração no tempo da expressão (2.29), podemos fazer:

$$t^* = t + \theta \Delta t \quad (2.30)$$

onde t^* é um tempo qualquer como indica a Figura 2.4, e $0 \leq \theta < 1$.

A derivada é aproximada por

$$\bar{T}_{t^*} = \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} \quad (2.31)$$

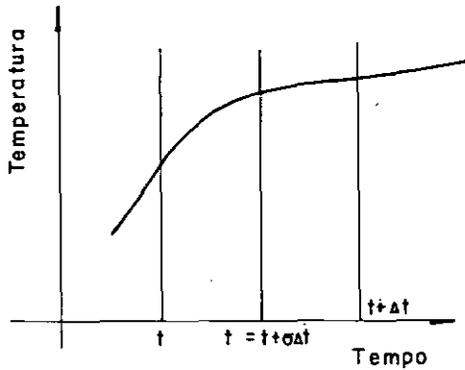


FIG. 2.4— TEMPO GENÉRICO DE INTEGRAÇÃO

e, conseqüentemente Q_{t^*} e T_{t^*} variam linearmente no tempo, isto é,

$$Q_{t^*} = (1 - \theta) Q_t + \theta Q_{t+\Delta t} \quad (2.32)$$

$$\bar{T}_{t^*} = (1 - \theta) T_t + \theta T_{t+\Delta t} \quad (2.33)$$

Substituindo (2.31) a (2.33) em (2.29) resulta a seguinte fórmula de recorrência

$$\left| \frac{\tilde{M}}{\Delta t} + \theta \underline{K} \right| T_{t+\Delta t} = \left| \frac{\tilde{M}}{\Delta t} - (1 - \theta) \underline{K} \right| T_t + (1 - \theta) Q_t + \theta Q_{t+\Delta t} \quad (2.34)$$

Diferentes valores de θ dão origem a uma família de métodos de resolução da equação (2.34). Se $\theta = 0$ o método é denominado explícito; o equilíbrio é obtido no tempo "t" e o esquema de recorrência é condicionalmente estável, isto é, a convergência depende do valor do incremento de tempo Δt . Quando $\theta \neq 0$ o método é dito método implícito: o equilíbrio é considerado no tempo $t + \Delta t$, sendo incondicionalmente estável.

No Capítulo V são apresentados exemplos de construções incrementais comparando-se os resultados obtidos com diferentes valores de θ com soluções analíticas e dados experimentais.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DE TENSÕES

III.1 - INTRODUÇÃO

O procedimento numérico proposto no capítulo anterior fornece as temperaturas nodais dos elementos finitos; são conhecidas as distribuições de temperaturas na seção transversal da barragem ao longo do tempo e esta análise é efetuada até que se obtenha a estabilização aceitável da mesma, o que vem a ocorrer quando a temperatura no interior da barragem se aproxima da temperatura média anual. O tempo necessário para isso depende sobretudo das dimensões da estrutura.

O passo seguinte consistirá na avaliação das tensões térmicas em determinados e espaçados intervalos de tempo durante a construção incremental. Este capítulo é dedicado à análise das tensões enquanto ocorrerem tais manifestações térmicas. Em termos de uma análise global da estabilidade da estrutura, os resultados desta análise deverão ser confrontados e/ou superpostos com os valores resultantes de outras verificações, como por exemplo, carregamento hidrostático, subpressão e peso próprio.

Antes de entrarmos estritamente no problema da análise das tensões térmicas nos deteremos para examinar algumas questões de âmbito geral.

O presente estudo admite algumas simplificações sob dois aspectos fundamentais. O primeiro diz respeito à concepção ou idealização estrutural de barragens de gravidade de concreto e o segundo, refere-se às hipóteses estabelecidas para a simulação numérica da construção por etapas.

No tocante ao primeiro aspecto, as opiniões são unificadas em torno da validade das condições que se pressupõe para o estado plano de deformações. Assim, considera-se as deformações longitudinais nulas em todo o comprimento da estrutura, sendo que os resultados obtidos identificam-se, principalmente, com os valores acusados na seção média. Não se tem notícias de trabalhos que questionem tal suposições ou apresentem outras sugestões, como por exemplo, a ponderação do comportamento tri-dimensional.

O segundo ponto assinalado, diz respeito à variação da geometria da estrutura com o tempo e requer um estudo minucioso quando se dá a transição ou acréscimo de uma nova parte da estrutura. Como se sabe, qualquer procedimento numérico exige a discretização do tempo em pequenos intervalos, e assim se procede na análise de tensões em barragens embora com algumas peculiaridades que ampliam significativamente a complexidade do problema em foco.

O cerne da questão situa-se nas condições de fabricação da estrutura. O concreto é lançado fresco nas formas e são vem

adquirir características de material sólido algumas horas após o fim de pega do cimento. Admite-se que este período esteja compreendido entre 6 e 12 horas, conforme demonstram alguns ensaios realizados em concreto com esta última idade (existe grande dificuldade na execução de ensaios em corpos de prova muito jovens, recém-fabricados).

Assim, fica evidente a dificuldade de modelar o contato entre o concreto velho e o novo, menos pela questão matemática e mais pela exiguidade de dados experimentais.

Por outro lado, cabe uma menção ao trabalho de SABLKAJ |⁴³| que aborda o problema utilizando um elemento de junta e que se encontra desenvolvido na referência |²⁷| e muito comumente empregado em análise de maciços rochosos |¹⁶|.

Este elemento finito de junta simula o contato entre duas superfícies admitindo, através da formulação da sua matriz de rigidez, deformações normais e transversais na interface. Uma outra observação interessante que se pode inferir do citado trabalho consiste no relato de uma comunicação verbal do professor Roy Carlson, membro do comite de concreto massa do ACI. Segundo o professor, a relaxação das tensões no primeiro dia de idade alcança o valor não pouco surpreendente de cerca de 100%; o autor considerou um valor menos nocivo em seus relatórios, em torno de 50%.

A posição adotada neste trabalho, baseia-se em primeiro lugar, na ausência de dados experimentais que venham a nortear o procedimento numérico específico que ora se discute, e em segundo, cabe um tópico prático no que concerne à definição do intervalo do tempo. Este é, frequentemente, limitado pelo consumo de memória de computador, parâmetro inevitável, inerente à resolução destes problemas de grande porte. O intervalo de tempo é geralmente tomado igual a meio dia, ou seja 12 horas. Logo, neste passo inicial, após a colocação de uma nova camada, o concreto já atinge um grau de endurecimento satisfatório e necessário à sua adequação teórica. O problema, é então, contornado, dando-se prosseguimento à análise sem a consideração particular deste efeito de contato, colocando-se indubitavelmente a favor da segurança.

A questão da determinação de um modelo que represente o comportamento estrutural do concreto, desempenha um papel relevante na discussão da capacidade resistente da estrutura em mente. Nas linhas que se seguem, apresenta-se uma breve explanação pretendendo-se despir estes fenômenos das simplificações que lhe foram impostas em virtude da necessidade de realizações objetivas e dos confrontos lógicos com a natureza, próprios destas situações, com intuito de evidenciar os diversos parâmetros que influenciam o comportamento do concreto e apontar a distância ainda existente à saturação científica.

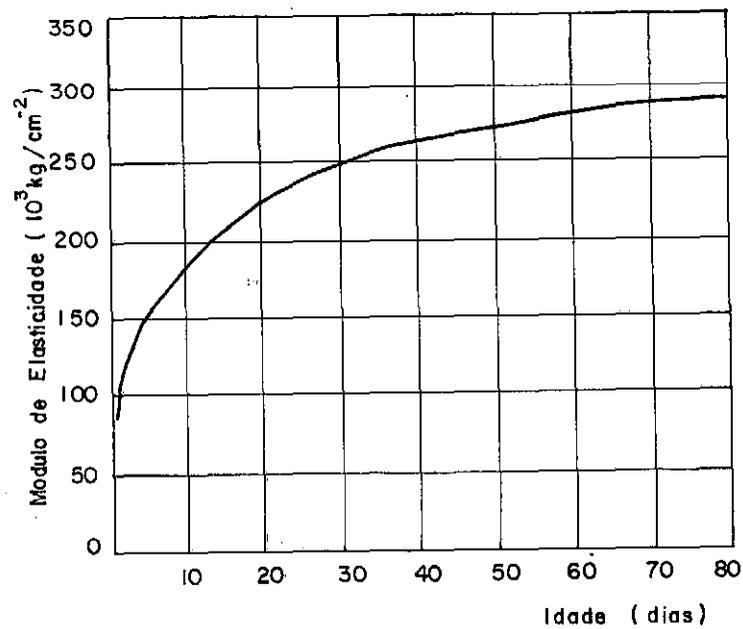
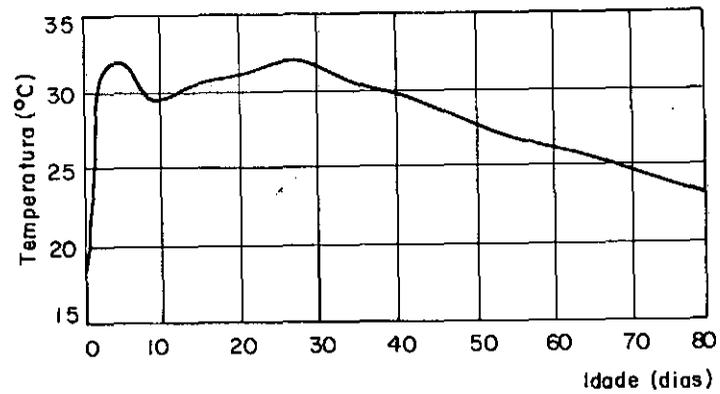
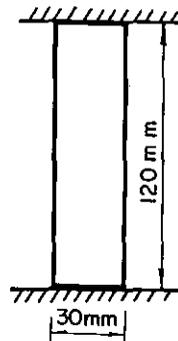
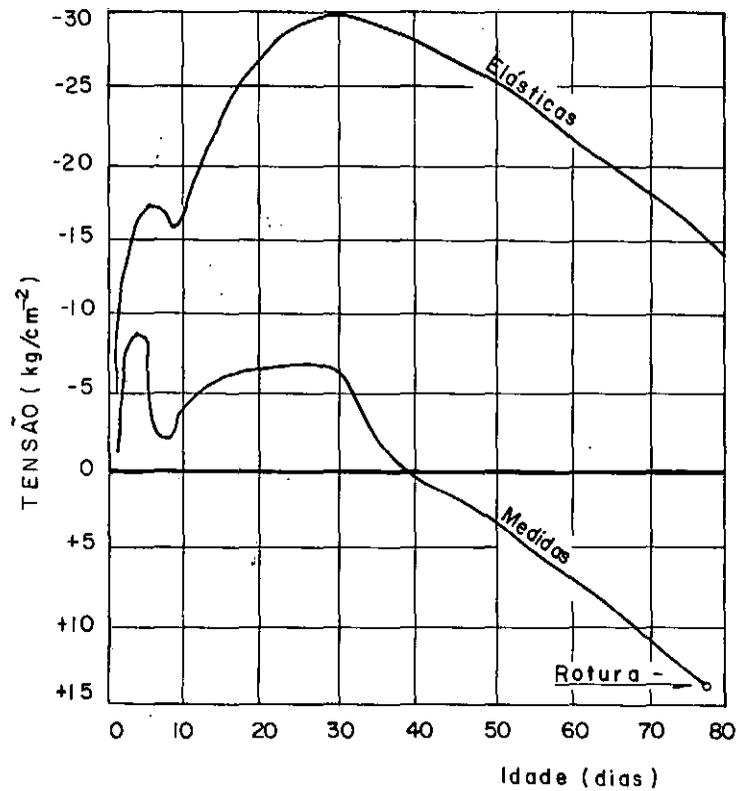
Esta questão pode ser melhor apreciada através do ensaio de laboratório realizado na Universidade de Berkeley e re-

latado por SILVEITA [45]. Trata-se de uma experiência com objetivo de reproduzir em laboratório as solicitações a que o concreto é submetido durante a fase de endurecimento.

Foi utilizado um corpo de prova de 30 centímetros de diâmetro e 120 centímetros de altura confeccionado com um traço igual ao empregado em barragens. A aparelhagem destinada ao experimento permitiu o controle das deformações (com intuito de impedi-las longitudinalmente) e a variação da temperatura do corpo de prova. Foram moldados também, corpos de prova cúbicos com os quais tornou-se possível a avaliação do coeficiente de dilatação térmica, módulo de elasticidade e deformações térmicas do concreto ao longo do tempo de duração dos ensaios.

Ao corpo de prova foi aplicada uma variação de temperatura semelhante à que se verifica em concretagens de grandes volumes de concreto. A partir dos dados extraídos dos espécimens cúbicos e das leituras das cargas manifestadas durante o ensaio foi possível a determinação das tensões elásticas e reais.

As Figuras 3.1 a e b mostram a curva de temperatura a que o corpo de prova foi submetido bem como o esquema estrutural do ensaio. Com os valores obtidos foram traçadas as curvas que indicam a evolução das tensões elásticas e medidas. O confronto do aspecto das curvas de tensões indicam nitidamente (Figura 3.1 a) a modificação do quadro de tensões térmicas durante o endurecimento do concreto. Esta alteração é atribuída à acentuada característica não elástica que o concreto exhibe, principalmente quando jovem.



Pode-se observar que a forte relaxação das tensões de compressão veio a causar a inversão do sinal das tensões num determinado instante durante o resfriamento. O conhecimento deste comportamento assume uma importância substancial já que os efeitos podem ser nocivos ou benéficos à estruturas, e um maior controle permitirá, por um lado, maior segurança à suscetibilidade à fissuração e por outro, maior economia em função de cálculos menos conservadores ³².

Vários trabalhos vêm se ocupando do assunto e as diretrizes sugeridas e adotadas são as mais diversas. Dentre estas, distinguem-se duas tendências: a primeira, mais tradicional, são análises muito simplificadas baseadas em hipóteses extremas quanto à restrição aos deslocamentos e utilizam-se do método do módulo de elasticidade aparente do concreto para simular a resposta viscoelástica da estrutura; a segunda que pode-se admitir mais moderna, procura maior rigor na idealização estrutural aceitando como válidas as hipóteses do estado plano de deformações e discretizando a estrutura em elementos finitos. No entanto, no que concerne a representação estrutural do concreto, ainda não encontram eficácia visto a incapacidade de tais modelos incorporarem a influência da temperatura sobre o comportamento viscoelástico e módulo de elasticidade do concreto; some-se a isto, a possibilidade de violabilidade das hipóteses do princípio da superposição no qual se fundam as teorias e métodos mais correntes atualmente ⁹, como será visto mais adiante.

Neste trabalho, será empregado o método das temperaturas equivalentes tal como proposto por ZIENKIEWICZ ^[53]. Este método é baseado no princípio da superposição e transforma o campo de temperaturas, através das funções de relaxação dos concretos, num campo de temperaturas equivalentes e com esta distribuição de temperaturas a estrutura é resolvido elasticamente pelo método dos elementos finitos. Nos itens que se seguem serão apresentadas as teorias da termoelasticidade linear, teoria da viscoelasticidade linear com envelhecimento e a formulação do método das temperaturas equivalentes, aplicado a problemas tridimensionais. Valendo-se da notação indicial, a exposição abrangerá o caso geral tri-dimensional. A particularização para os problemas planos será omitida, encontrando-se em alguns textos específicos ^[50].

III.2 - TEORIA BÁSICA

Se consideramos um elemento infinitesimal de volume o equilíbrio estático ficará assegurado quando foram satisfeitas as equações

$$\sigma_{ij} + b_i = 0 \quad (3.1)$$

onde as componentes do tensor de tensão são representadas por σ_{ij} e b_i são as componentes das forças de corpo ou de massa.

Sob a ação de forças o corpo sofre um deslocamento em relação a sua configuração original. Se os deslocamentos são

tais que o produto de suas derivadas parciais pode ser desprezado, então as deformações são expressas pelo tensor de Cauchy

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.2)$$

A maior dificuldade consiste em se calcular deslocamentos usando a equação (3.2) e, conseqüentemente necessita-se de estabelecer outras condições. Estas são dadas pelas equações de compatibilidade e encontram-se deduzidas nos textos básicos [50]. Elas se escrevem, resumidamente

$$\varepsilon_{ij,kl} + \varepsilon_{k\ell,ij} - \varepsilon_{ik,j\ell} - \varepsilon_{j\ell,ik} = 0 \quad (3.3)$$

Esta equação é uma condição necessária e suficiente que as deformações têm que cumprir para a obtenção do equilíbrio em corpos simplesmente conexos. Entretanto, para corpos múltiplamente conexos esta condição é geralmente necessária mas não suficiente.

Todas as relações apresentadas são independentes das propriedades dos materiais e, conseqüentemente, elas são válidas para materiais com comportamento elástico e não elástico.

Imaginando-se um material elástico, isotrópico e isotérmico a lei de Hooke que institui as relações tensões-deformações podem ser expressas na forma

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \frac{2Gs}{1-2s} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \quad (3.4.a)$$

ou inversamente,

$$\delta_{ij} = \frac{1}{7G} |\sigma_{ij} - \frac{v}{1+v} \sigma_{kk} \delta_{ij}| \quad (3.4.b)$$

onde v é o coeficiente de poisson e G o módulo de elasticidade transversal. Estes estão relacionados com o módulo de elasticidade através da relação

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \quad (3.5)$$

Concisamente, a equação (3.4.a) pode ser escrita na forma

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (3.6)$$

na qual C_{ijkl} é o tensor de quarta ordem de constantes elásticas dado por

$$C_{ijkl} = \frac{2Gv}{(1-2v)} \delta_{ij} \delta_{kl} + G(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (3.7)$$

As equações (3.1), (3.2) e (3.4) representam um sistema de 15 equações para seis incógnitas de tensão, 6 de deformação e 3 de deslocamentos. Substituindo-se a equação (3.2) na (3.4.a) pode-se obter tensões em termos de deslocamentos e, levando o resultado à equação (3.1) forma-se 3 equações de segunda ordem de derivadas parciais de 3 deslocamentos. O resultado des-

tas equações é conhecido como equação de Navier e se escreve

$$G u_{j,kk} + \frac{G}{1-2\nu} u_{k,kj} + b_j = 0 \quad (3.8)$$

Esta forma é particularmente conveniente quando as condições de contorno em termos de deslocamentos são especificadas. Usando as equações (3.1) e (3.4) e levando a equação de contorno obtemos

$$\frac{2G\nu}{1-\nu\nu} u_{k,k} n_i + G(u_{i,j} + u_{j,i}) u_j = p_i \quad (3.9)$$

Supondo-se agora, que o corpo esteja submetido a uma variação de temperatura, constante no tempo e condicionada às coordenadas na forma

$$T = T(x, y, z) \quad (3.10)$$

As dilatações térmicas são deformações livres, inclusivamente volumétrica e são designadas e avaliadas em

$$\epsilon_{ij}^T = \alpha T \delta_{ij} \quad (3.11)$$

onde α é o coeficiente de dilatação térmica do material.

Estas deformações adicionais somam-se às deformações do corpo e assim as equações 3.4.a e 3.4.b assumem a forma

$$\sigma_{ij} = 2G\epsilon_{ij} + \frac{2Gu}{1-2\nu} (\epsilon_{kk} - \bar{\epsilon}_{kk}) \delta_{ij} \quad (3.12.a)$$

e,

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma_{ij} - \frac{u}{1+u} (\sigma_{kk} \delta_{ij}) + \epsilon_{ij}^T \delta_{il} \quad (3.12.b)$$

Analisando-se as equações acima, é interessante notar que tais deformações são essencialmente solicitações adicionais à estrutura, sob a forma de deformações impostas. Seguindo-se os procedimentos já indicados pode-se chegar a equação,

$$Gu_{j,kk} + \frac{G}{1-u} u_{k,kj} + \frac{ET_{1j}}{1-u} = 0 \quad (3.13.a)$$

Presumindo-se que $b_j = 0$ a equação acima pode ser reescrita na forma

$$Gu_{j,kk} + \frac{G}{1-u} u_{k,kj} + \frac{E_{j,j}}{1-u} \quad (3.13.b)$$

Procedendo-se analogamente com a sequência de equações de contorno, e fazendo $p_j = 0$ chega-se a

$$\frac{2Gu}{1-u} u_{k,k} n_i + G(u_{i,j} + u_{j,i}) u_j = \frac{ET}{1-u} \quad (3.14)$$

Comparando as equações com as correspondentes no estado isotérmico, conclui-se que o problema térmico pode se solucionar com a suposição que o mesmo se encontra no estado isotérmico é solicitado pelas forças de corpo e de superfície dadas pelas expressões abaixo:

$$b'_i = \frac{E}{1-u} T_{ij} \quad (3.15)$$

$$p'_i = \frac{ET}{1-u} \quad (3.16)$$

Este resultado é conhecido como analogia de Duhamel.

Admitindo-se que o campo de temperatura seja transiente, variável no tempo, todos os componentes de tensão, deformação e deslocamento são funções do tempo e para a verificação do equilíbrio exige-se que as equações sejam satisfeitas em cada tempo t .

Na análise de estruturas maciças de concreto durante o período de construção, faz-se necessário, evidentemente, a consideração da variação da geometria da estrutura com o tempo e a variação do módulo de elasticidade do concreto com o tempo e temperatura.

A análise elástica pode ser efetuada em qualquer instante de tempo t segundo a formulação esquematizada abaixo:

$$|\bar{\sigma}(t)|_{GT(t)} \sim |\alpha, t(t), s, E(t), T(t)|_{GT(t)}$$

sendo: $\sigma(t)$ - campo de tensões

$T(t)$ - campo de temperaturas

$GT(t)$ - geometria no tempo t

$E(t)$ - módulo de elasticidade

u - coeficiente de poisson

α - coeficiente de dilatação térmico

III.3 - VISCOELASTICIDADE

Como já se fez menção anteriormente, o problema da determinação das tensões de origem térmica apresenta dois enfoques básicos: a formulação matemática do comportamento estrutural do concreto e o procedimento de resolução da estrutura orientado à vertente numérica.

Neste item optou-se pela manutenção de um texto básico da teoria da viscoelasticidade linear, considerando-se o envelhecimento do concreto, que tem como pressuposto básico o princípio da superposição. Com referência ao método de resolução dos problemas, buscou-se desenvolver formalmente o método das forças ou temperaturas equivalentes pois este encontra muita facilidade para o emprego do computador, já que pode ser utilizado através do método dos elementos finitos aplicado a problemas elástico-linear, como proposto por ZIENKIEWICZ |⁵³|.

O exame de um elemento estrutural de concreto, tendo transcorrido um período de tempo após aplicação da carga a estrutura vem mostrar que a deformação aumenta decrescentemente com o tempo. A ordem de grandeza destas deformações chegam a alcançar duas ou três vezes o valor da deformação inicial o que tem levado pesquisadores a maiores investigações do fenômeno. A classificação e elucidação de todas as formas de deformações percebidas nos corpos constituem objetos de muitas interpretações.

A reologia é a disciplina que se ocupa do estudo das diversas formas de manifestação de deformações nos materiais. A reologia estrutural reconhece três tipos fundamentais de deformação: elástica, plástica e viscosa. Estas formas também podem se manifestar associadas, como por exemplo, elasto-plástica ou viscoelástica e estas combinações estão sujeitas a outros fatores, tais como, envelhecimento, tixotropia ou deformação por endurecimento.

A deformação elástica é compreendida como a deformação inicial, linear e completamente reversível quando retirado o carregamento. Pode-se escrever, então

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.17)$$

A deformação viscosa é característica de fluídos ideais e é definida através da taxa de variação, isto é

$$\frac{d\epsilon}{dt} \equiv \dot{\sigma} \quad (3.18)$$

A deformação plástica é relativa a inversibilidade da deformação o que significa que as distorções são preponderantes em relação às deformações volumétricas, podendo-se escrever de um modo geral

$$\epsilon = F(\sigma, t) \quad (3.19)$$

entretanto, somente para valores de tensão superior a um determinado limite, verificando-se que as deformações não se modificam com a retirada do carregamento.

O princípio da superposição das deformações aproxima de forma razoável o comportamento do concreto, sendo que, este princípio é válido somente em elasticidade ou viscoelasticidade, não sendo aplicável à viscoplasticidade. Observa-se ainda que, o coeficiente da viscoelasticidade para o concreto varia não somente com a idade do concreto mas também com o tempo sob carga.

Para o propósito de cálculo estrutural, o comportamento do concreto é suficientemente representado pela teoria da viscoelasticidade e assim a teoria de elasticidade pode ser ampliada e aplicada. Cargas ou deformações impostas constantes não modificam o estado de sollicitação no corpo. Assim, as sollicitações podem ser determinadas pela teoria da elasticidade. Alguns trabalhos de pesquisas tem separado as deformações inelásticas do concreto em volumétricas e desviantes. Isto supõe que o comportamento do concreto é isotrópico e as duas componentes podem ser simplesmente superpostas. Portanto, é unanimamente aceita a constância do coeficiente na fase elástica e em fluência.

A viscoelasticidade linear considerando-se o envelhecimento reconhece duas formas de manifestação. Denomina-se fluência linear a resposta do concreto à aplicação de uma carga mantida constante; uma deformação inicial elástica seguida de uma deformação lenta decrescente com o tempo e proporcional a deformação inicial, conforme traduz a equação (3.20) e ilustrada pela Figura 3.2.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_i + \varepsilon_f \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_f = \phi \varepsilon_i \quad (3.21)$$

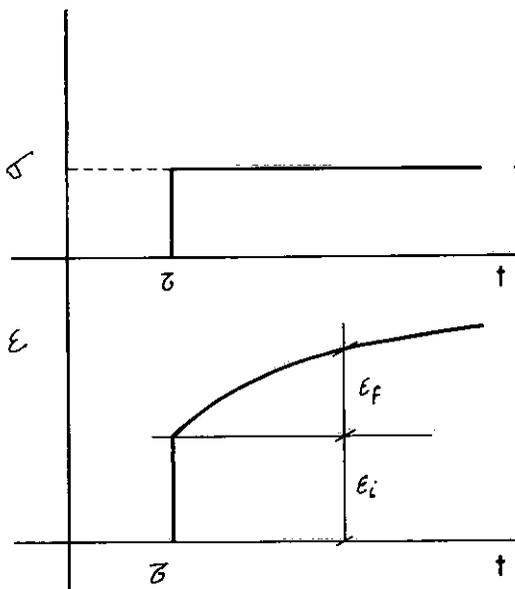


FIG. 3.2 - FLUÊNCIA

O coeficiente de proporcionalidade ϕ depende da idade do concreto quando solicitado e do tempo decorrido após o carregamento, logo

$$\phi = \phi(t-\tau, t) \quad (3.22.a)$$

ou ainda, mais concisamente,

$$\phi = \phi(\tau, t) \quad (3.22.b)$$

sendo: τ - instante de aplicação da carga

t - tempo

e a equação (3.20) passa a ser escrita:

$$\epsilon(t) = \epsilon_i + \phi(\tau, t) \epsilon_i \quad (3.23)$$

Como:

$$\epsilon_i = \frac{\sigma_i}{E(\tau)} \quad (3.24)$$

a equação assume a forma

$$\epsilon(t) = \sigma_i \left| \frac{1 + \phi(\tau, t)}{E(\tau)} \right| \quad (3.25)$$

A função $\phi(\tau, t)$ recebe a denominação de coeficiente de fluência e a expressão entre parenteses da equação (3.25) chama-se de função de fluência, isto é

$$C(\tau, t) = \frac{1 + \phi(\tau, t)}{E(\tau)} \quad (3.26)$$

e a equação (3.20) é reescrita na seguinte forma:

$$\varepsilon(t) = \sigma C(\tau, t) \quad (3.27)$$

Denomina-se relaxação a resposta do concreto a uma deformação imposta instantaneamente e mantida constante: uma tensão inicial elástica seguida de uma relaxação desta tensão decrescente com o tempo e proporcional a tensão inicial.

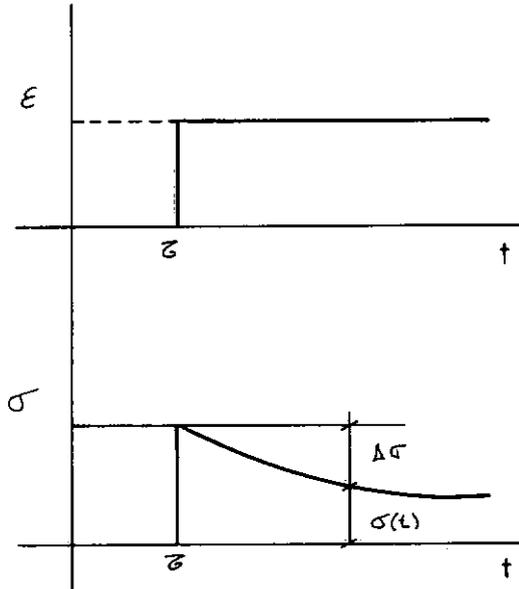


FIG. 3.3 - RELAXAÇÃO

Analogamente, pode-se escrever

$$\sigma(t) = \epsilon R(\tau, t) \quad (3.28)$$

sendo

$$R(\tau, t) = R(t-\tau, t) = \epsilon E |1 - \psi(\tau, t)| \quad (3.29)$$

em que

$\psi(\tau, t)$ - coeficiente de relaxação

Se a tensão ou a deformação é variável com o tempo e aplicadas em parcelas discretas, admite-se válido o princípio de superposição. Este princípio institui que o efeito final seja obtido através a superposição dos efeitos devidos a cada acréscimo atuando separadamente, assim pode-se escrever

$$\epsilon(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i C(\tau_i, t) \quad (3.30)$$

ou

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i R(\tau_i, t) \quad (3.31)$$

Se a valiação é contínua o somatório é substituído por uma integral e as expressões anteriores passam a

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{d\sigma}{d\tau} C(\tau, t) d\tau \quad (3.32)$$

e, analogamente

$$\sigma(t) = \int_0^t \frac{d\varepsilon}{d\tau} R(\tau, t) d\tau \quad (3.33)$$

Sendo τ a variável de integração e t o limite superior de integração (constante dentro da integral). Esta integral recebe a denominação de Integral Heuditêria.

De um modo geral, pode-se escrever

$$\varepsilon(t) C\sigma \quad (3.34)$$

e

$$\sigma(t) = R\varepsilon \quad (3.35)$$

sendo que C e R assumem a forma de operadores, isto é

$$C \equiv \int_0^t \frac{\partial \llbracket \llbracket}{\partial \tau} C(\tau, t) d\tau \quad (3.36)$$

e

$$R \equiv \int_0^t \frac{\partial \llbracket \llbracket}{\partial \tau} R(\tau, t) d\tau \quad (3.37)$$

III.4 - O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Em vista das dimensões, irregularidades e variação da geometria das estruturas de barragens a possibilidade de utilização do método dos elementos finitos assumem uma importância relevante. A análise elástico-linear é bastante facilitada, como foi mostrado no item anterior, em virtude da análise poder ser efetuada em qualquer tempo independentemente dos resultados anteriores. O procedimento adotado é o corrente da prática dos elementos finitos, a partir da formação das retas de carga obtidos das deformações térmicas livres [1].

O comportamento do concreto, principalmente quando jovem, se afasta significativamente da hipótese de material elástico-livre. A teoria da viscoelasticidade linear considerando-se o envelhecimento do concreto vem propiciar uma representação mais próxima da realidade embora ainda não seja a ideal e, neste item pretende-se apresentar o método das forças ou temperaturas equivalentes como um procedimento satisfatório para a consideração do modelo viscoelástico utilizando-se do método dos elementos finitos. O método das forças ou temperaturas equivalentes (MFE, MTE) foi primeiramente aplicado a problemas de tensões térmicas em estruturas de concreto por ZIENKIEWICZ [2]. Baseia-se nas analogias viscoelásticas atribuídos a McHenry e Alfley sendo que a principal vantagem situa-se na redução do problema viscoelástico do problema elástico, conduzindo portanto, a resolução de um problema trivial.

Seja um corpo sólido submetido a um campo de temperaturas

$$T = T(x, y, z, t) \quad (3.38)$$

sendo o módulo de elasticidade função do tempo, isto é

$$E = E(t) \quad (3.39)$$

e ν , coeficiente de poisson constante.

Suponha-se que a função de relaxação do material seja conhecida e, por conseguinte, possa-se instituir o operador R dado por (3.37).

Aplicando-se este operador ao campo de temperaturas obtemos um campo de temperaturas equivalente, dado por

$$T'(x, y, z, t) = R \frac{T(x, y, z, t)}{E(t)} \quad (3.40)$$

e as deformações térmicas serão escritas como

$$\epsilon_{ij}^T = \alpha T'(t) = \frac{\alpha}{E(t)} RT(t) \delta_{ij} \quad (3.41)$$

Levando esta expressão às equações do problema elástico (3.5) e, com auxílio de (3.2), substituindo-se o resultado nas equações de equilíbrio (3.1) chega-se a equação de Navier

$$\frac{R u_{j,kk}}{2(1+v)} + \frac{R u_{k,kj}}{2(1-v)(1-w)} + \frac{ET}{1-w} = 0 \quad (3.42)$$

Por outro lado, a formulação do problema viscoelástico nos leva a instituir a relação-tensão-deformação na forma

$$\sigma_{ij}^* = R \left[\frac{\epsilon_{ij}}{1+w} + \frac{v}{(1-w)(1-2v)} \epsilon_{kk} \delta_{ij} \right] - E \epsilon_{kk}^T \delta_{ij} \quad (3.43)$$

Seguindo o mesmo procedimento anterior recaímos na equação (3.42).

A interpretação deste resultado mostra que é indiferente a resolução do problema termo-viscoelástico da resolução do problema termo-elástico com a utilização de um campo térmico equivalente. É evidente que a resolução deste último problema é mais vantajosa em virtude destes já ser bastante conhecido.

Vale ressaltar que o princípio da superposição é uma aproximação regulada por algumas hipóteses básicas. Estas hipóteses fundamentais são:

- a) as tensões são menores do que 40% da tensão de ruptura do material;
- b) as deformações (tensões) não diminuem de valor nas tensões (deformações) ;

- c) o concreto não exibe perda substancial de
- d) não há grande aumento de tensões (deformações) depois do componente inicial.

Estas hipóteses já evidenciam alguns impedimentos.

Da aplicação da teoria da viscoelasticidade linear principalmente no que diz respeito ao item (b); é do conhecimento geral que há uma reversão no quadro de tensões durante a queda de temperatura. No entanto, sendo o resfriamento contínuo, é válida uma primeira tentativa de se avaliar o efeito da relaxação de tensões durante este quadro térmico.

Neste estudo, não foi enfocada a análise da segurança em relação à ruptura. Alguns critérios, entretanto, poderão ser facilmente implementados com o objetivo de avaliar o grau de segurança à ruptura.

Finalmente, cabem algumas observações a respeito das funções de relaxação e da interpretação dos resultados.

A obtenção da função de relaxação é objeto de estudos experimentais, estando assim, condicionada à viabilidade de tais ensaios. A determinação da curva de fluência é mais simples de ser efetuada, o que vem a contribuir para uma maior precisão e confiabilidade dos dados. No entanto, o ensaio de relaxação embora mais laboroso fornece resultados num espaço de tem

po menor; como é mostrado por CASTRO | |.

Em virtude da fluência e relaxação representarem duas fases de um mesmo fenômeno, uma função pode ser obtida a partir do conhecimento da outra seja por via analítica ou numérica, como sugerido por CARNEIRO | | e BAZANT | |.

Assim, conhecendo-se a função de relaxação do material, o campo de temperaturas equivalentes é calculado mediante uma integração numérica idêntica à mencionada anteriormente.

CAPÍTULO IV

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

IV.1 - INTRODUÇÃO

Com o objetivo de estudar o comportamento das estruturas de concreto sujeitas à ação de gradientes térmicos foi desenvolvido um programa de computador, baseado no método dos elementos finitos, que determina o campo de temperaturas e o campo de tensões térmicas através da análise linear.

Foi dada ênfase particular ao estudo das tensões térmicas que se observam durante a fase de construção das barragens de gravidade de concreto. A liberação de calor das reações de hidratação do cimento em grandes massas de concreto provoca substancial elevação de temperatura nas primeiras idades do concreto, seguido de resfriamento gradual, instalando-se diversos campos de tensões ao longo deste período no corpo da barragem. Com intuito de minimizar esses efeitos, que podem danificar a estrutura, é de praxe a concretagem dessas estruturas por etapas obtendo-se menor elevação de temperatura, e ainda, resfriamento parcial.

O programa elaborado simula a construção incremental seguindo um ritmo de construção fornecido como dado, e a cada passo de integração no tempo determina o campo de temperatura e tensões.

IV.2 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

O programa analisa os efeitos térmicos nas estruturas de concreto sendo que as tensões calculadas somente são válidas até que se dê o gradiente térmico de fissuração.

Em uma primeira etapa o programa efetua a análise linear da transmissão de calor em regime transiente num domínio bi-dimensional utilizando elementos isoparamétricos de oito nós.

Na segunda etapa, é feita a análise estática linear em estados planos e axissimétricos do corpo sólido submetido às deformações iniciais $\epsilon = \epsilon_0(\alpha, T)$, onde " α " é o coeficiente de dilatação térmica e "T" o campo de temperatura determinado na etapa anterior. Considera-se o módulo de elasticidade do concreto crescente com o tempo segundo dados experimentais. É utilizado na análise o elemento finito isoparamétrico de 4 nós.

IV.3 - IDENTIFICAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

a) Identificação do problema

- . Título
- . Definição se a análise é incremental ou não
- . Definição do tipo de análise
- . Definição do elemento finito

b) Geometria da estrutura

- . Número de nós
- . Número de elementos
- . Coordenadas
- . Conetividades

c) Ritmo de construção

- . Número de camadas
- . Espessura das camadas
- . Número total de nós por camadas
- . Número total de elementos por camadas
- . Intervalo de tempo entre uma camada e a seguinte
- . Temperatura de lançamento do concreto das camadas

d) Condições de contorno

- . Deslocamentos prescritos
- . Temperaturas prescritas
- . Temperaturas ambientais
- . Temperatura da água de cura
- . Coeficientes de transmissão superficial
 - . concreto-ar
 - . concreto-água
 - . forma-ar
 - . forma-água
- . Superfície adiabática - não especificar

- . Número de elementos com condições de contorno temporárias
- . Elementos com condições de contorno temporárias

e) Condições iniciais

- . Temperatura da rocha (média anual)
- . Número de elementos de transição
- . Elementos de transição

f) Propriedades térmicas dos materiais

f.1 - Rocha

- . Calor específico
- . Condutibilidade térmica
- . Difusibilidade térmica
- . Peso específico

f.2 - Concretos

- . Calor específico
- . Condutibilidade térmica
- . Difusibilidade térmica
- . Peso específico

f.3 - Formas

- . Calor específico
- . Condutibilidade térmica

- . Difusibilidade térmica
- . Peso específico
- . Data da retirada das formas

f.4 - Curvas de temperatura adiabática dos concretos

- . Por pontos
- . Expressão analítica - $T_a = TM(1 - e^{-ut})$

$$T_a = \frac{t}{at+b}$$

g) Características de integração no tempo

- . Intervalo de tempo de integração (DT)
- . Método de integração no tempo (θ)
- . Número de interações
- . Tempo total da análise
- . Intervalo de tempo para cálculo das tensões

h) Propriedades mecânicas dos materiais

h.1 - Rocha

- . Módulo de elasticidade da rocha
- . Coeficiente de dilatação térmica
- . Coeficiente de poisson

h.2 - Concreto

- . Módulo de elasticidade
- . Coeficiente de distorção térmica
- . Coeficiente de poisson

CAPÍTULO V

EXEMPLOS

V.1 - DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS EM UMA CONSTRUÇÃO INCREMENTAL CONSIDERANDO-SE FLUXO DE CALOR UNI-DIRECIONAL

Este exemplo, retrata a construção incremental de uma estrutura maciça de concreto cujas dimensões permitem a consideração do fluxo uni-direcional, isto é, a dissipação do calor se faz somente pela superfície. A Figura 5.1 mostra, esquematicamente, a geometria da estrutura, indica as propriedades térmicas do concreto e da rocha adotadas, bem como, as condições de contorno. A distribuição de temperaturas, ao longo da altura para 9 e 18 dias após o início da construção, obtido por via analítica, pode ser vista em linha cheia. As soluções obtidas pelo MEF são comparadas.

V.2 - ANEL DE CONCRETO SUBMETIDO À VARIAÇÃO LENTA DE TEMPERATURA

A Figura 5.2 mostra um anel de concreto moldado juntamente com um anel de quartzo fundido, indicando as propriedades térmicas e mecânicas do concreto e o quartzo. Na Figura 5.3 está traçada a curva de fluência do concreto medida através de ensaios apropriados. Na Figura 5.4 está representado graficamente a lei de variação de temperatura a que foi submetido o modelo e mostra as tensões elásticas, medidas, e as calculadas pelo método das temperaturas equivalentes.

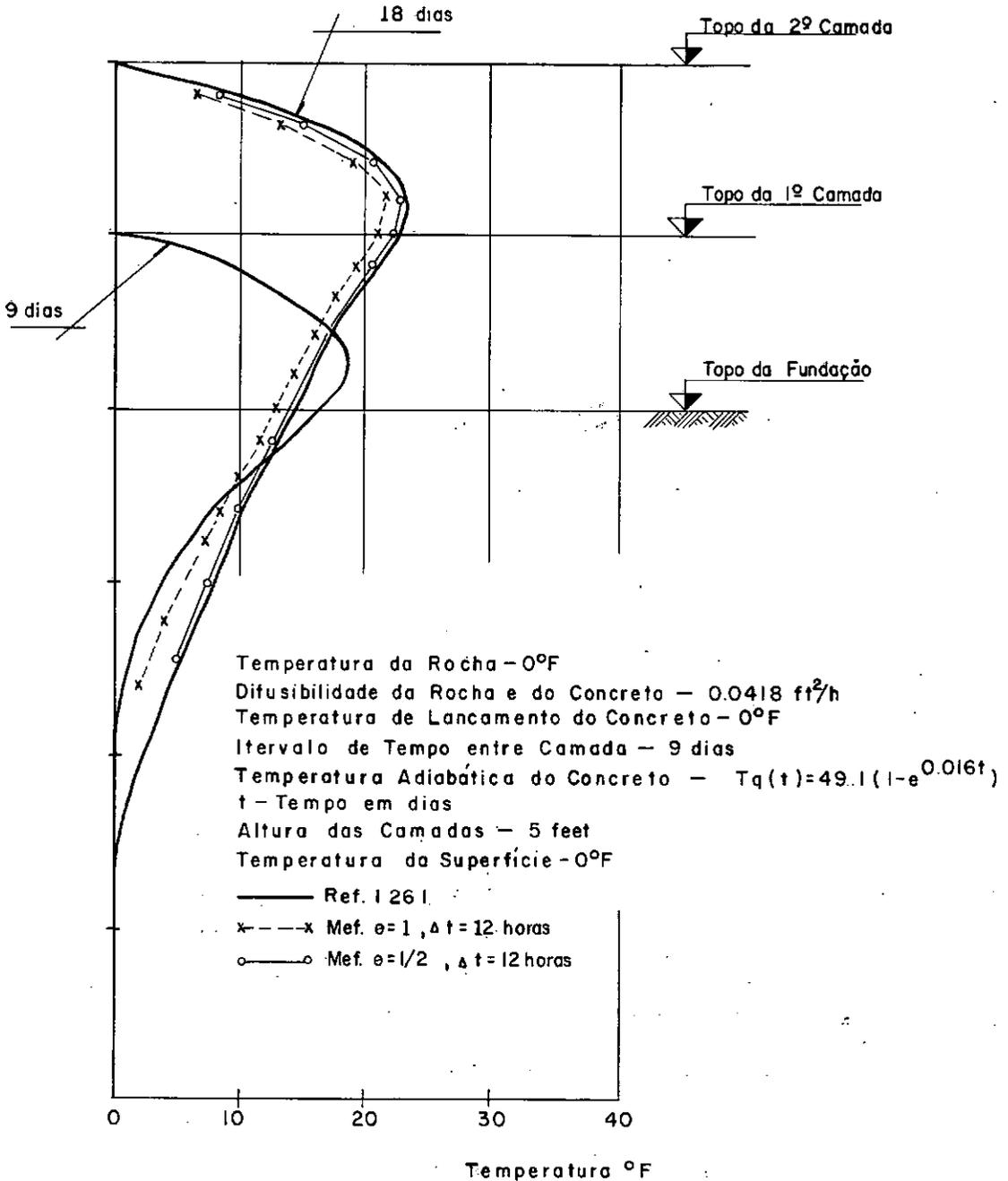


FIG. 5.1— CONSTRUÇÃO INCREMENTAL, FLUXO UNIDIRECIONAL — COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS

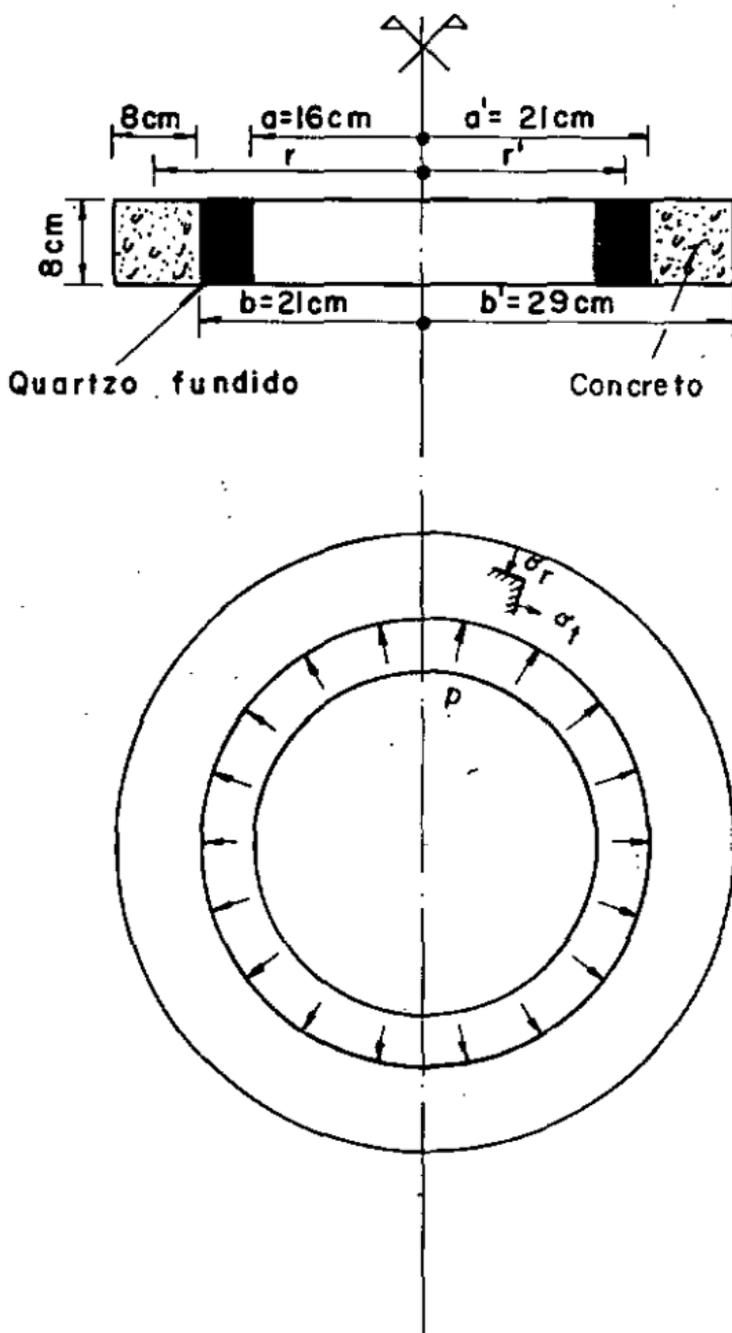


FIG. 5.2 — ANEL SUBMETIDO AO ENSAIO DE VARIAÇÃO LENTA DE TEMPERATURA

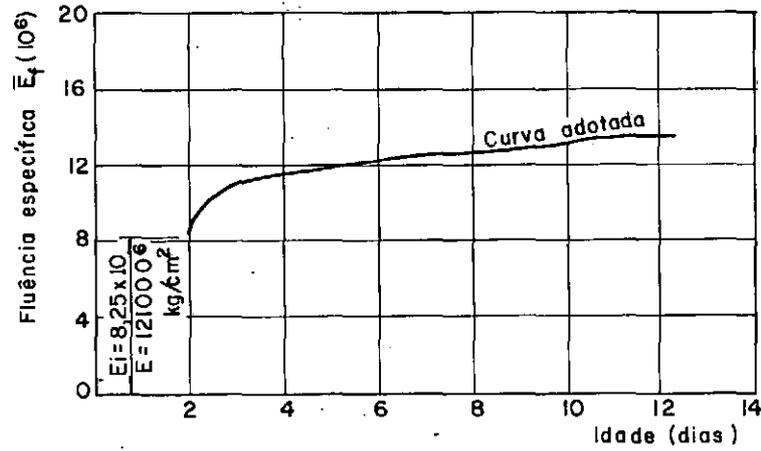


FIG. 5.3 — CURVA DE FLUENCIA ADOTADA

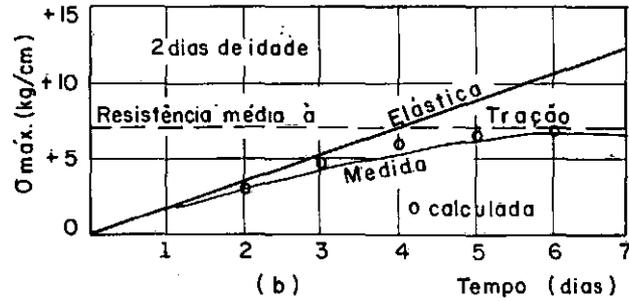
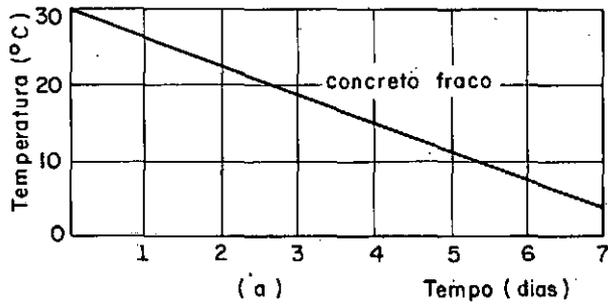


FIG. 5.4 — (a) variação de temperatura (b) tensões

V.3 - PLACA QUADRADA SUBMETIDA A UM CARREGAMENTO UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDO

Uma placa quadrada é constituída de material visco-elástico linear com envelhecimento. As propriedades mecânicas são dadas e também a função de retonação do material. A solução obtida pelo método das forças equivalentes é comparada com a referência [30].

Módulo de elasticidade - E

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Coefficiente de poisson - ν

Espessura - h

Carga - q = 1

$$\frac{D}{qa^4} = 1$$

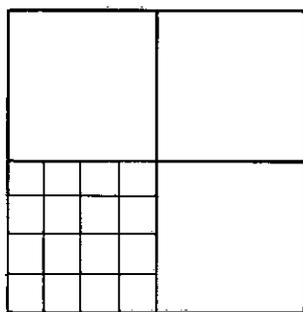


FIG. 5.5 — MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Função de relaxação - $R(t', t) = E | 1 - K_d K_z / 1 + K_d K_t |$

$$K_d = 1.9 - 0.11t' + 0.002t'^2 + 0.4569 \times 10^{-4} t'^3$$

$$K_z = 1.0 - 0.13 e^{-0.25(t-t')} - 0.35 e^{-0.021(t-t')} - 0.52 e^{-0.019/t-t'}$$

Deslocamentos no centro da placa x 10^{-3}

TEMPO	Ref. $ ^3 \Delta t = 1$	MFE $\Delta t = 1$
10	1.26	-
20	1.62	1.61
30	1.81	1.76
40	1.95	1.90
50	2.06	2.06

V.4 - ANÁLISE DO ESTADO TÉRMICO DURANTE A CONSTRUÇÃO DO MURO DE TRANSIÇÃO ESQUERDO MTE DA USINA DE SAMUEL - PORTO VELHO - RO

A análise térmica do MTE - Usina de Samuel - foi efetuada pelo programa. A geometria da estrutura é mostrada na Figura 5.6 a partir da malha de elementos finitos. O ritmo de construção é dado pelas Figuras 5.6.a, b, c e d. Foram consideradas na análise:

Condições de contorno

- . Temperatura média do ar - 27°C
- . Temperatura da água da cura - 26°C
- . Coeficiente de transmissão superficial

- . Concreto - ar - 278.4 Kcal/m² dia °C
- . Concreto - água - 7200.0 Kcal/m² dia °C
- . Forma metálica - 278.4 Kcal/m² dia °C
- . Superfície adiabática - eixo de simetria

Condições iniciais

- . Temperatura da rocha - 26°C
- . Temperatura de lançamento do concreto - 30°C

Propriedades térmicas dos materiais

	$k \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{m} \cdot \text{dia} \cdot \text{°C}} \right)_c$	$\frac{\text{Kcal}}{\text{t} \cdot \text{°C}}$	h^2	m^2/dia
Rocha	36.72		170	0.08
Concreto J76	39.39		205	0.08
Concreto FI52	38.96		200	0.08

Curvas das temperaturas adiabáticas dos concretos Figura 5.7.

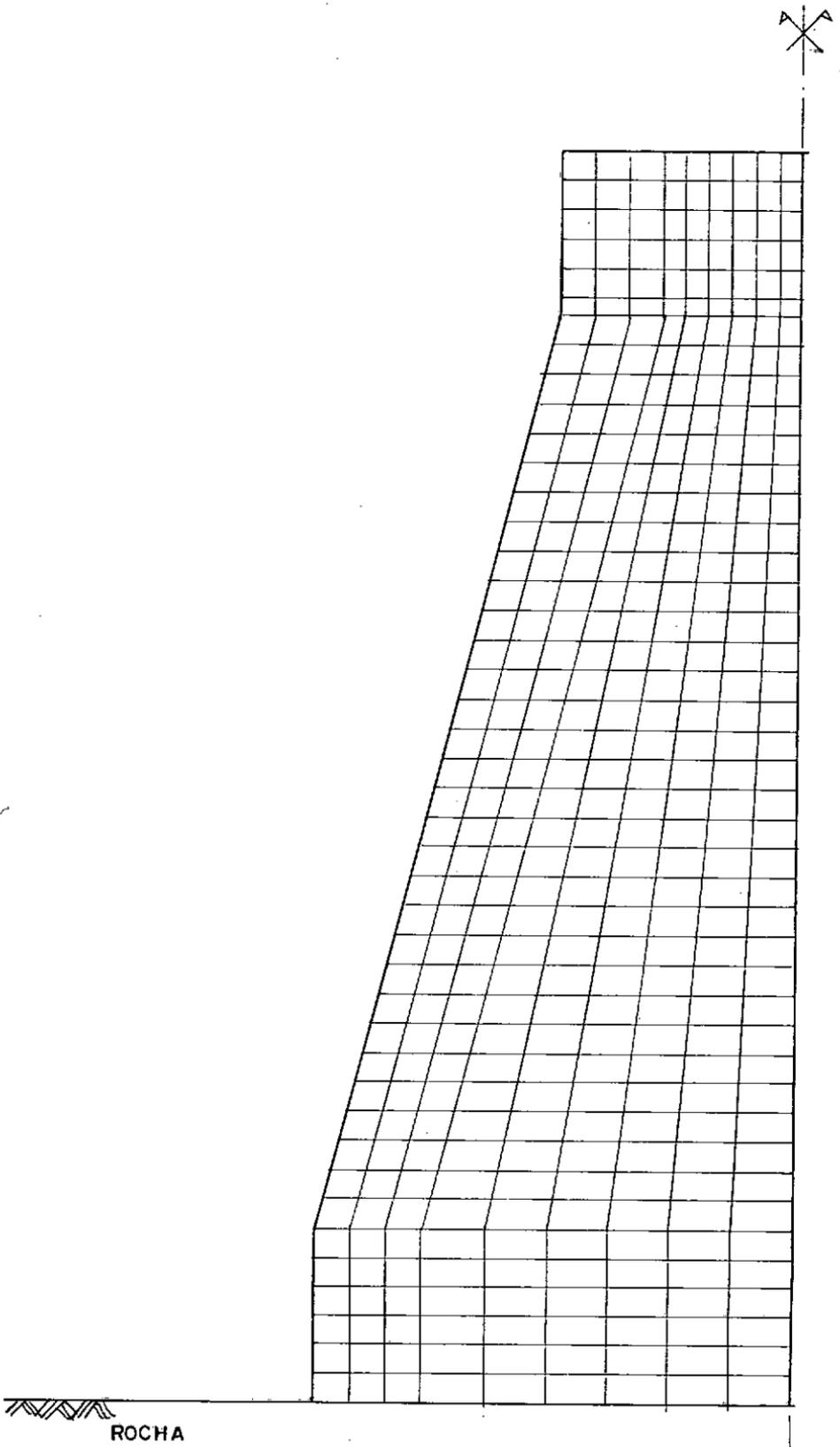


FIGURA 5.6 a - Malha de Elementos Finitos

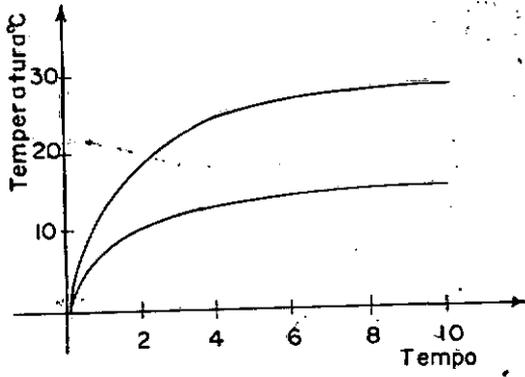


FIG. 5.7—TEMPERATURA ADIABÁTICA DOS CONCRETOS

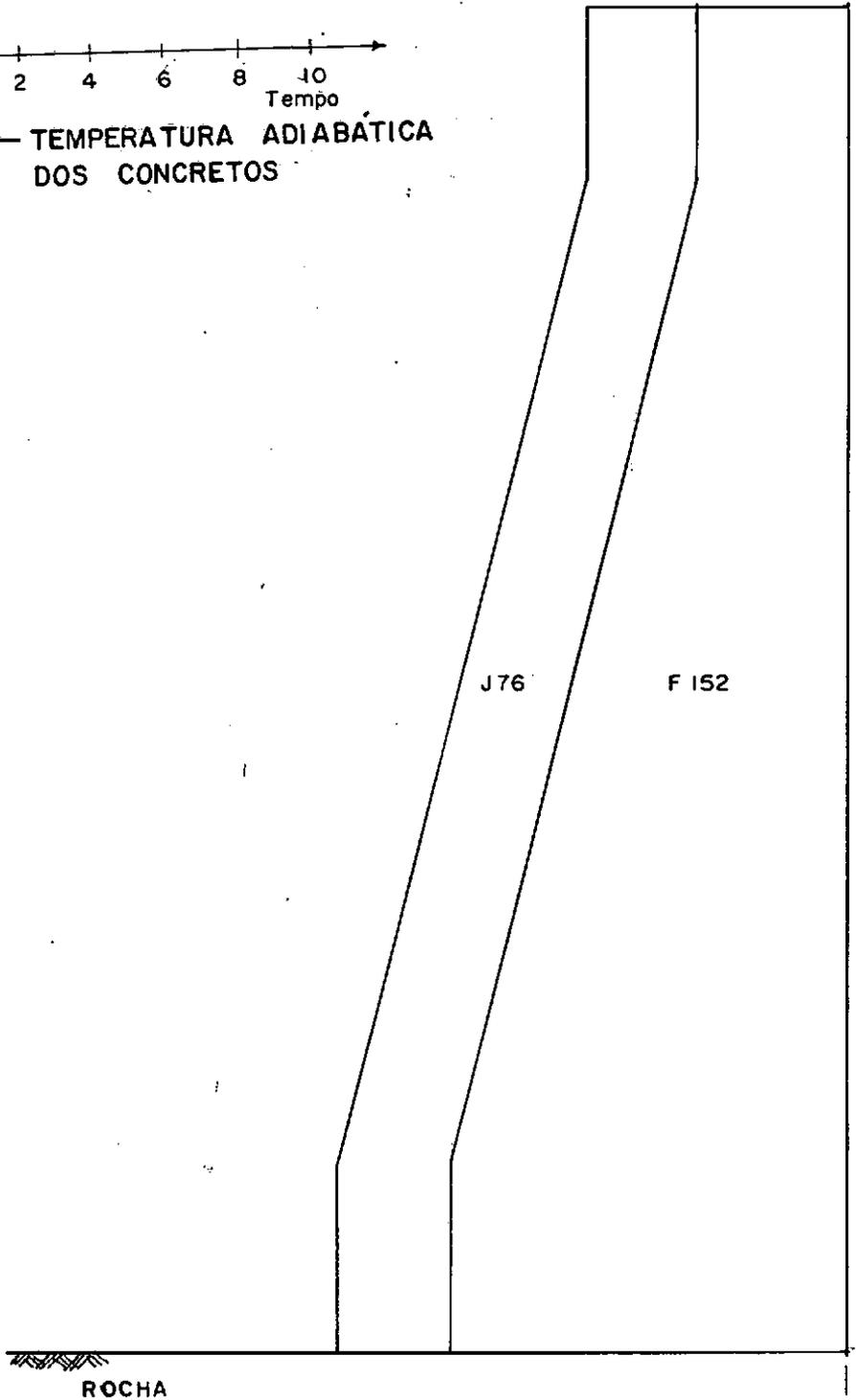


FIG. 5.6 b — CLASSES DE CONCRETO

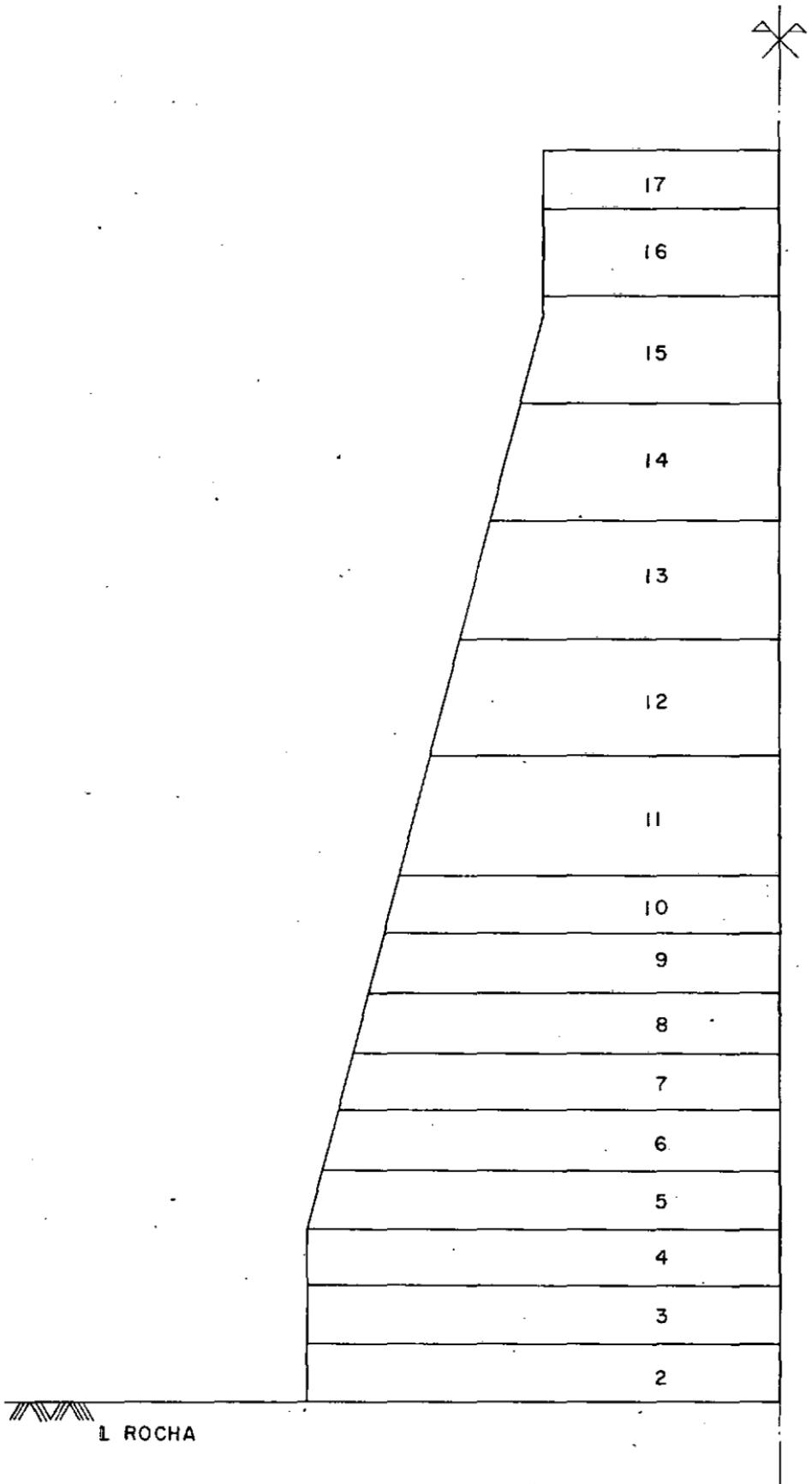


FIG. 56c - NUMERAÇÃO DAS CAMADAS

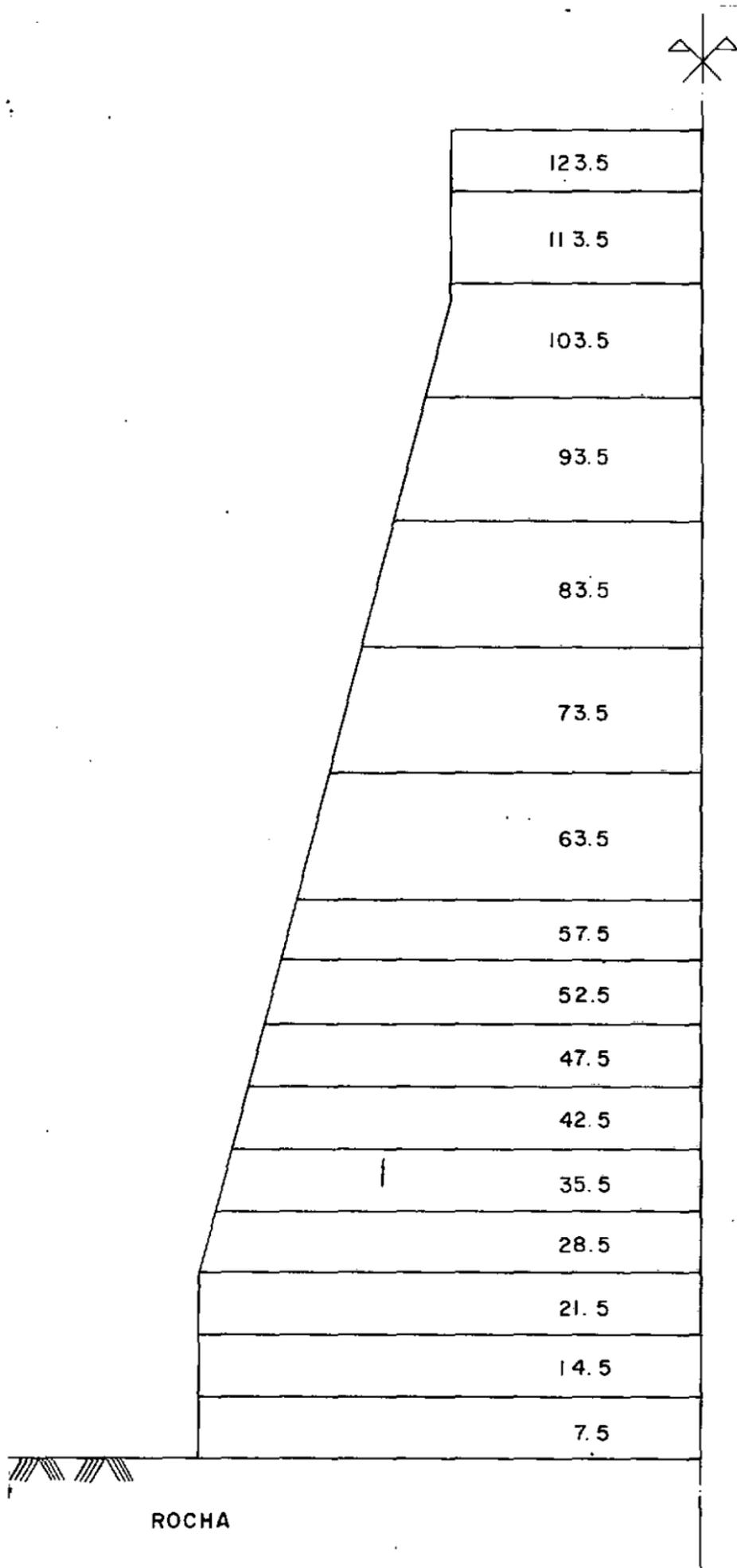


FIG. 5.6 d — TEMPO DE LANÇAMENTO DAS CAMADAS (DIAS)

Característica de integração do tempo

- . Intervalo de tempo de integração - 05 dias
- . Método de interação no tempo - $\theta = 1$
- . Número de integrações - 360
- . Tempo total da análise - 180 dias
- . Intervalo de tempo para cálculo de tensões - 5 dias

Propriedades mecânicas dos materiais

Rocha - $E_r = 400.000 \text{ kyf/an}^2$

$$\alpha_r = 40 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$$

$$\nu_r = 0,19$$

Concretos - $E_c \rightarrow$ Figura 5.8

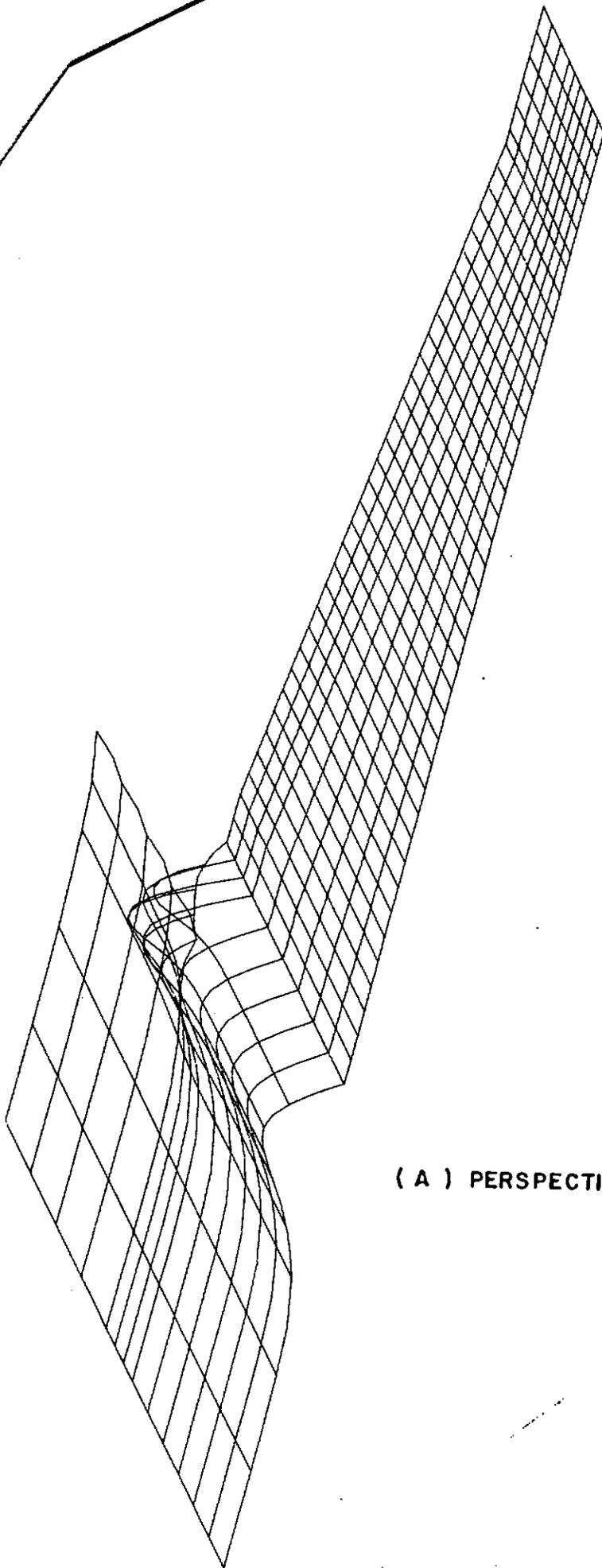
$$\alpha_c = 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$$

$$\nu_c = 0,20$$

Número de pontos de integração

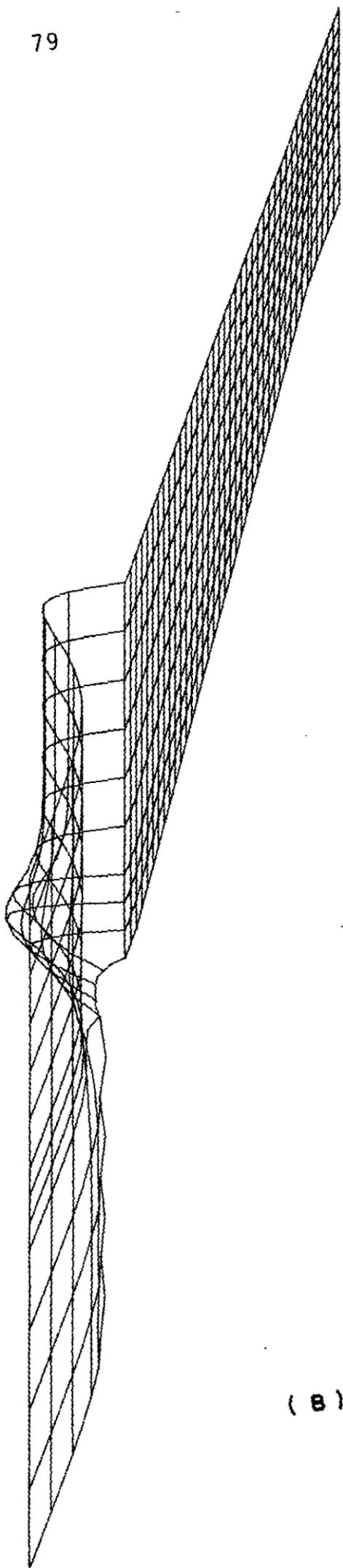
- . Temperatura - 3 pontos
- . Tensão - 2 pontos

As Figuras 5.9.a, b e c mostram as superfícies térmicas características para a elevação de temperatura das camadas de 1m e 2m. A Figura 2.10 indica a variação da temperatura em um ponto no interior da massa de concreto comparando os valores medidos com os obtidos pelo MEF.

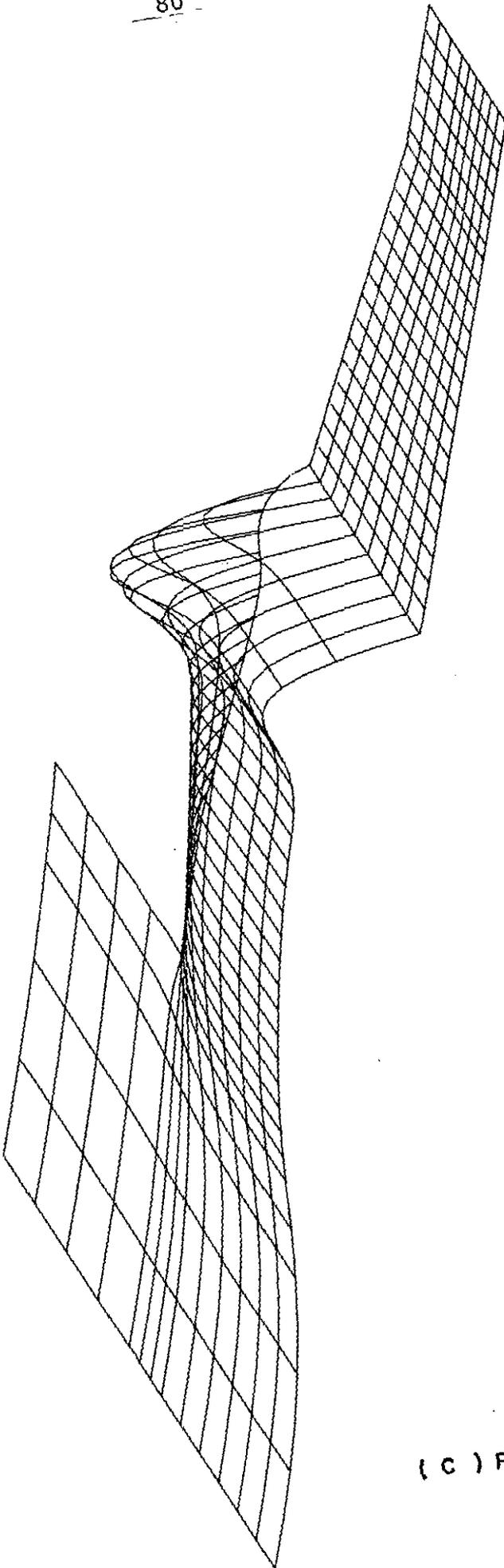


(A) PERSPECTIVA XY — 20 DIAS

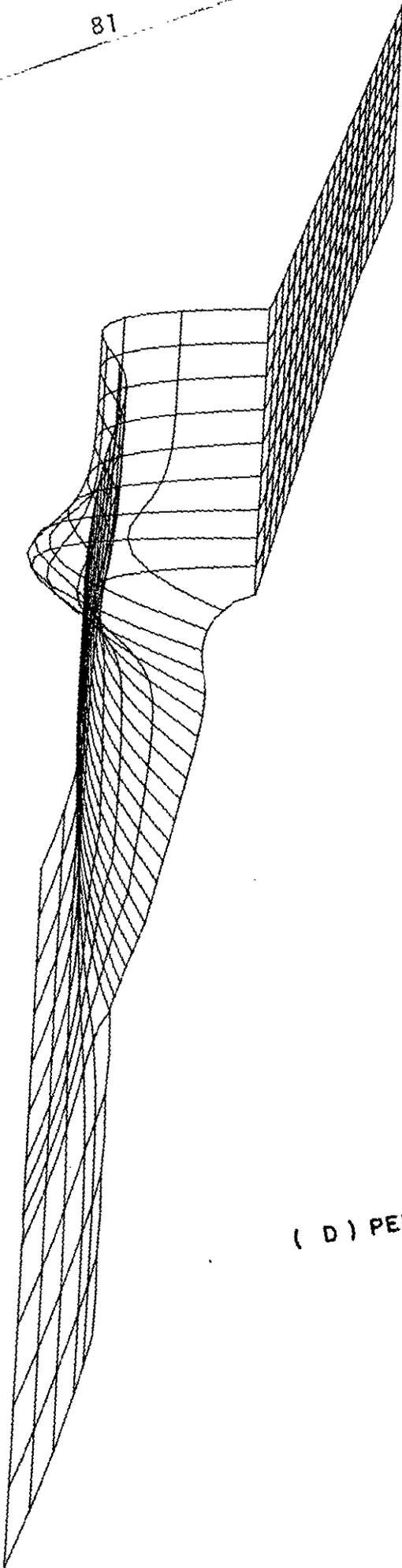
FIG.5.9—PERSPECTIVA DA SUPERFÍCIE TÉRMICA
(a imagem plana indica a parte não construída)



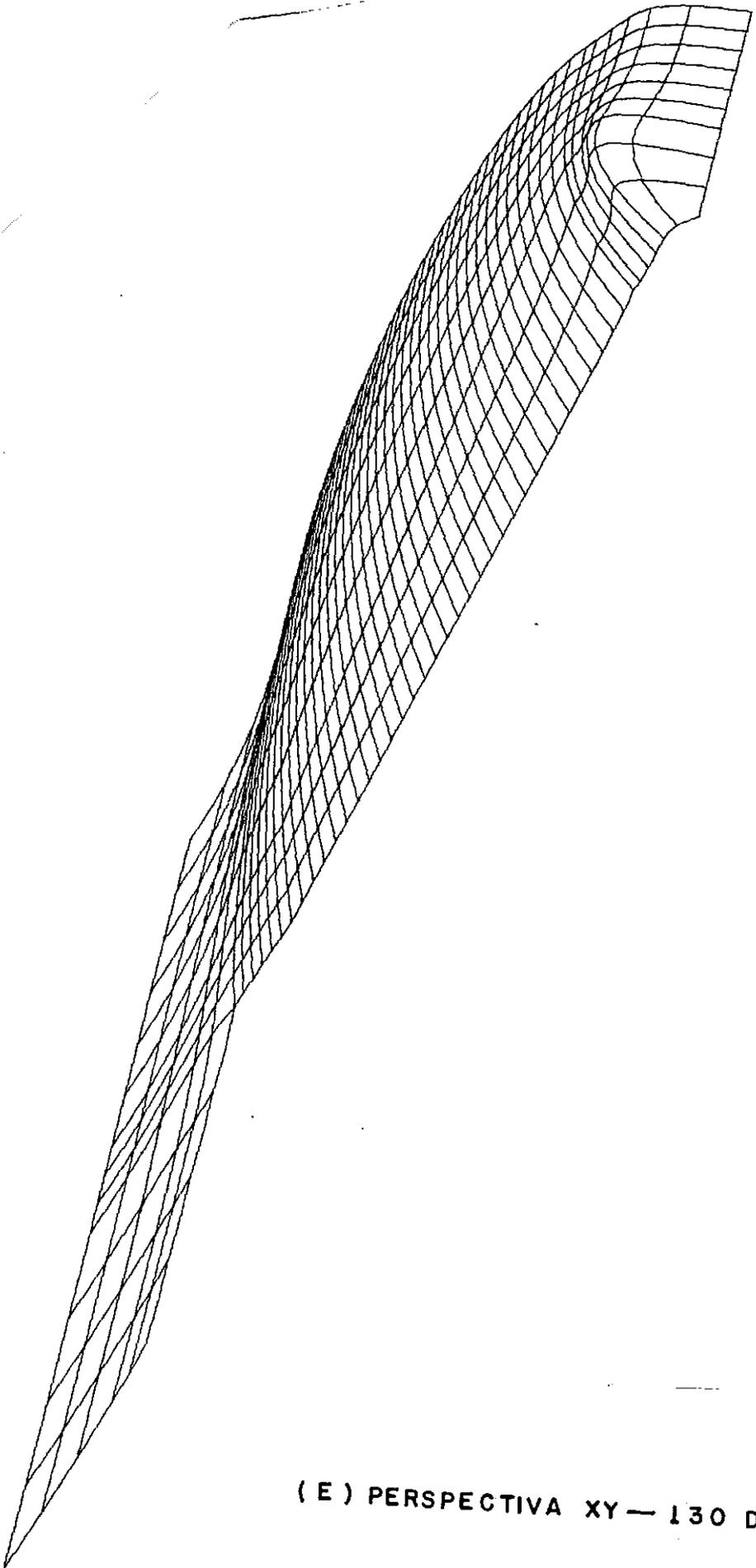
(B) PERSPECTIVA YZ — 2



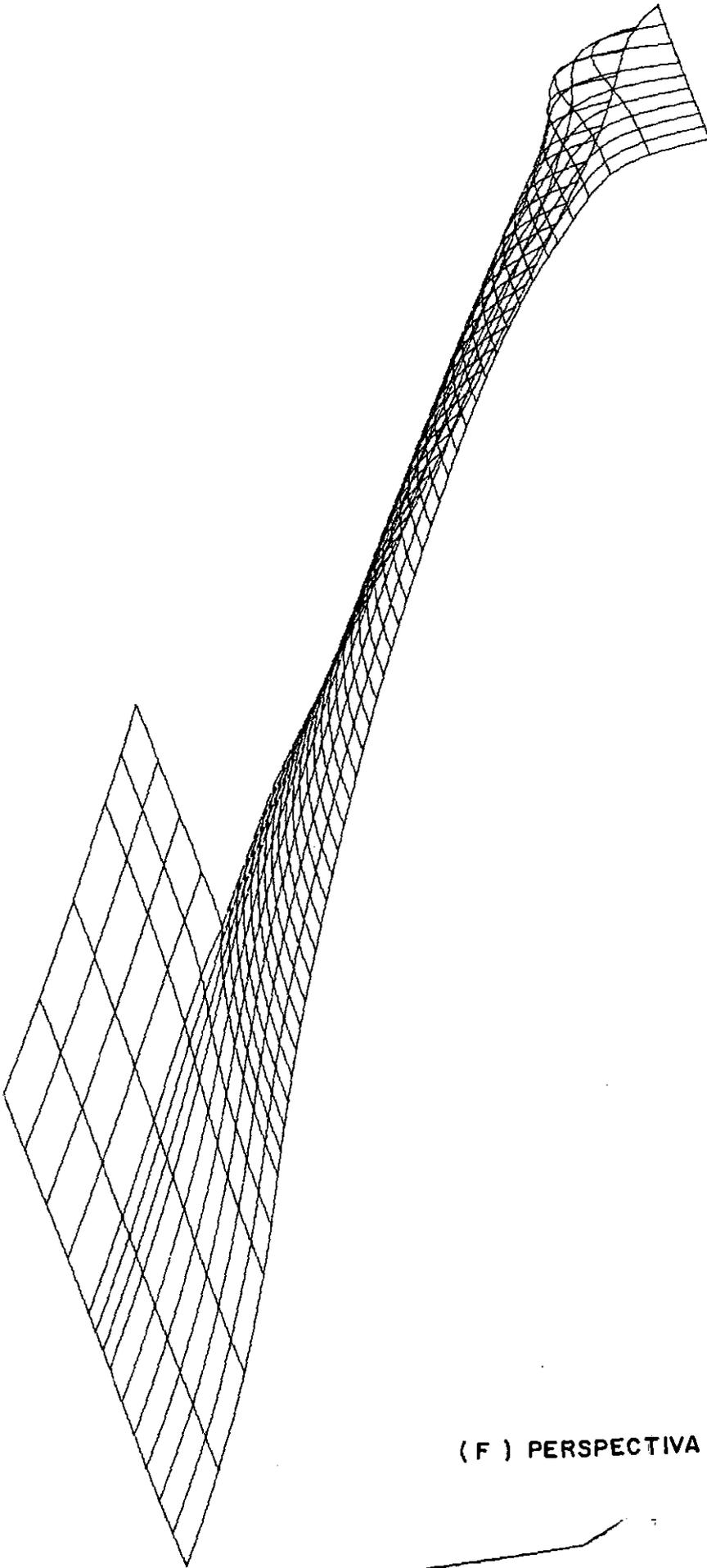
(C) PERSPECTIVA XY — 60



(D) PERSPECTIVA YZ — 60 D



(E) PERSPECTIVA XY — 130 DIAS



(F) PERSPECTIVA YZ — 130 DIAS

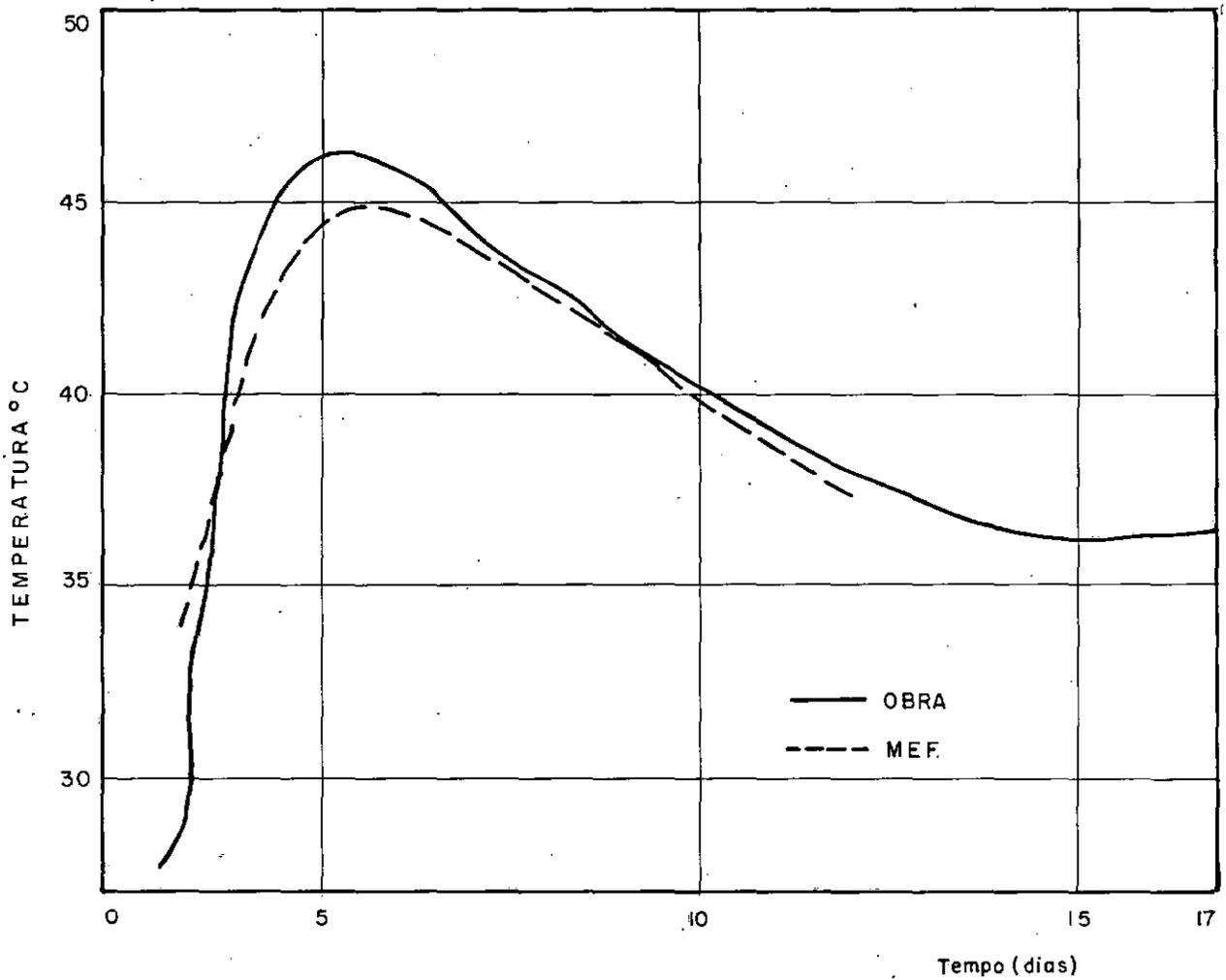


FIG. 5.10 — COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS MEDIDAS NA OBRA DURANTE O MÊS DE MARÇO/1986 COM OS RESULTADOS NUMÉRICOS

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

Como pode ser observado ao longo deste trabalho, foram abordados diversos temas referentes à análise térmica de estruturas de barragens. Fez-se referência ao método dos elementos finitos aplicados à problemas de transferência de calor, procedeu-se uma revisão dos modelos de comportamento estrutural propostos para representar o concreto e finalmente discorreu-se sobre o problema das tensões térmicas, quando então, apresentou-se o método das temperaturas equivalentes.

Quanto ao primeiro problema pode-se afirmar que o procedimento delineado satisfaz as expectativas já que o erro detectado situa-se dentro de limites aceitáveis. Os exemplos mostrados no capítulo anterior demonstram tal afirmativa principalmente aquele em que se compara os resultados numéricos com os obtidos em medições na própria obra durante a execução. Em caso da necessidade de maior precisão sugere-se diminuir o intervalo de tempo embora em detrimento de economia de memória de computador.

A discussão a cerca do modelo estrutural para representar o comportamento do concreto, como já foi mencionado antes, vem merecer destaque, pois ainda apresenta questões não esclarecidas. Este tópico, encontra ou deveria encontrar, afinidade com o problema mais completo que trata da resolução da estrutura

pelo método dos elementos finitos, isto é, numericamente. Assim, esta questão visa a obtenção de um modelo matemático que se adapte satisfatoriamente à formulação dos elementos finitos. Os trabalhos mais recentes parecem já caminharem nesta direção e pode-se citar os últimos artigos publicados por BAZANT e ZIENKIEWICZ [1]. Uma outra vertente que se tem à especular está na análise local da interface de contato entre o concreto velho e o novo recém lançado, concomitantemente com um procedimento específico a dar ao concreto algumas poucas horas após a pega do cimento.

No que concerne ao processo adotado neste trabalho, através do método das temperaturas equivalentes, os resultados são encontrados respaldo experimental se forem cumpridas as hipóteses básicas que se pressupõe para a validade do princípio da superposição. Evidentemente que tal fato não se dá efetivamente na realidade mas pode ser considerado um avanço no cálculo destas estruturas.

BIBLIOGRAFIA

1. ACI Committee 224 - Control of Cracking in Concrete Structures. AEI Journal, December 1972.
2. ACI Manual of Concrete Practice, Committee 207 - Effect of restraint, volume change and reinforcement on working of massive concrete.
3. Andrew, W. P. - Módulo de Elasticidade, Coeficiente de dilatação Térmica e Capacidade de Alongamento do Concreto. IBASCON - Colóquio Paraguaio-Brasileiro sobre Tecnologia de Concreto Massa, Assuncion, Paraguai, Julho.
4. Andrade, W. P. - O Controle do Concreto na Barragem do Funil. Furnas Centrais Elétricas S. A., 1969.
5. André, C. A. e outros - Avaliação das Tensões de Origem Térmica em Estruturas de Concreto Massa. Comitê Brasileiro de Grandes Barragens XII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Vol. II, SP, Abril 1978.
6. Arthanau, S. C. W. Yu - Creep of Concrete Under Uniaxial and Biaxial Stresses at Elevated Temperatures. Magazine of Concrete Research, Vol. 19, September 1967.
7. Arrvch, A. M. - Seminário de Termo-Elasticidade e Transferência de Calor. COPPE/UFRJ.

8. Bathe, K. J. - Finite Element Procedures in Engineering Analysis Edejs by 1982.
9. Bazant, Z. P. - Creep and Sarinkage in Concrete Structures. John Wiley & Sons. Ltda.
10. Camargo, W. M. - A Capacidade de Deformação e a Otimizada des Concretos. CBHB, XII S.N.G.B., Vol. I, SP, Abril 1978.
11. Carlson, R. W.; Thayer, D. P. - Surface Cooling of Mass Concrete to croking. ACI, Title nº 56.9.
12. Carneiro, F. L. L. G. - Considerações Sobre a Influência da Retração e Fluência do Concreto no Cálculo das Estruturas IBRACON, SP, maio de 1978.
13. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. - Conduction of Heat in Solids. 2ª Editor, Oxford the Ciarendon Press.
14. Castro, Newton - Determinação da Função e Fluência Através de Ensaio de Relaxação. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ.
15. Chorino, M. A. - Structural Effects of Time-Dependent Behaviour of Concrete. Comitê Europeu do Betton - 14ª Session Pluriêu - Copenhagen, Mai 1971.

16. Comité du Calcul et de la Conception des Barrages - Les Méthodes des Elements Finis Appliquées Aux Calculs et a la Conception des Barrages. Commission Internationale des Grands Barrages. Bulletin 30, Janier 1978.
17. Courbon I. et Fanchart, S. - L'Influence ou Finage et ou Retrait, L'Effet des Changements de Temperature Jur Les Constructions en Beton. Association Infornacionale des ponts et Charpeutes, France.
18. Creus, G. J., Fenante, A. J. - Analises Viscoelastico li-
neal y no Lineal de Estructures de Armigon on Regimen du
tens protena no uniforme. Boletim IMME, Ano 17, nº 65, Ju-
lio, Diciembre, 1979.
19. Diab, D. - Contribution a L'Etude du Complene Barrage-Fonda-
tion et Enplications des Sciences dus au Remplissage de
Certains Reservoirs. Centre d'Etudes, de Rechuerches et
D'Essois Scientifiques du Genie Civil nº 46, Avril 1974.
20. Dolgopolov, V. V. Investigation of the Thermal Conditions and
Thermal Stress on a Buttress doun During Huetinsting Re-
servoir Level. Translated from Gidrotelehnicheskoe Stroi-
tel'stro, nº 8, pp. 36-39, August 1969.
21. Donea, J. - On the Accuracy of Finite Element Solutions to
the Transient Heat-Conduction Equation. International
Journal for Numerical Method in Engineering, Vol. 8, 103
110, 1974.

22. Fairbain, E., Meneses, N. Trinh, J. - Effects of Thermal Gradients in the Cylindrical Concrete Tank, CEBTP, France.
23. Fraems Veubene, B. M. and Hogge, M. A. - Dual Analysis for Heat Conduction - Problems by Finite Elements. *INM - Uites National Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 5, GS-82, 1972.
24. Freenbaun, G. A., Rubinstein, F. M. - Creep Analysis of Axisymmetric Bodies Using Finite Elements *Nuclear Engineering and Design* 7, 1968, 379-397.
25. Garkun, L. M. and Shaikin. B. V. - Prescribing Measures for Thermal Control of Massive Concrete Blocks in Dams Constructed in Siberia, translated from *Gidrotekhnicheskoe Stvitel'stro*, n^o 6, pp. 8-11, June 1978.
26. Flover, R. E. - Calculation of Temperature Distribution in a Succession of Lites due to Release of Chemical Heat. Vol. 34, *Proceedings of the American Concrete Institute. Journal of the American Concrete Institute*.
27. Goodman, R. E., Asce, M., Taylor, R. L., A. M. Asce, Brekke, T. L. - A Model for the Mechanics of Jointed Rock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, May, 1986.

28. Guelpe, P. F. V. e Tagliatella, E. P. - Análise dos Efeitos Térmicos da Reação de Hidratação do Concreto Massa da Barragem da Ilha Solteira. VIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, SP, Dezembro 1972.
29. Guimarães, F. V. e Correa, W. G. - Concreto Refrigerado - Opção Econômica para a Construção da Barragem de Sobradinho. IBRACON - Colóquio Paraguayo-Brasileiro sobre Tecnologia do Concreto-Massa. Assunção 19 a 6 de julho de 1974.
30. Halbritter, Anorês Lopovico - Aplicação do Método dos Elementos Finitos à Análise do Comportamento Geológico Estrutural. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Maio de 1977.
31. Hilton, H. H., Russel, H. G. - An Extention of Alfrey's Analogy to Thermal Stress Problems an Temperature Dependent Viscoelastic media. J. Mech. Phys. Solids, 1961, Vol. 9, Pergamon Press Ltd., Lonfon.
32. Holck, C. H. - Tensões de Origem Térmica nas Estruturas de Concreto. Publicação Interna do Engiin. September, 1982.
33. Houghton, D. L. - Determining Strain Capacity of Mass Concrete. ACI Journal, December 1976, Title nº 23-58.

34. Houk, I. E., Passon, J. A. Houghton, D. L. - Prediction of Thermal Stress and Strains Capacity of Concrete by tests on Findls Beans. ACI Committe 207, Title nº 6716.
35. Ibri, I. A., Che Brat, V. K. - Evolução Térmica em Concretos dos Blocos das Turbinas de Sobradinho. Estratêgia Construtiva e Controle por Instrumentação.
36. Illston, J. M., Jordaan, I. J. - Three-Dimensional Measurements in Goung Concrete. Material et Constructions , Vol. 4, nº 24, 1971.
37. Kreith, F. - Princípios de Transmissão de Calor, Editora Edgard Bencher Ltda.
38. Lee, E. H., Rogers, T. G. - Solution of Viscoelastic Stress Analysis Problems Using Measured Creep a Relonatron Functions. Journal of Applied Mechanics, March 1963.
39. Miguez de Mello, F., De Ávila, J. P. de Paiva, F. - Brazilian National Committee on Large Dams General Paper, Rio de Janeiro, 1982.
40. Narrow, I. and Ullberg, E. - Conlotion Between Sensile Splitting Strength and Thermal Strengths of Concrete. ACI Journal, 1963, Title nº 60.2.

41. Neville, A. M. - Creep of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1970.
42. Sead, M. N. A., Oliveira, P. J. e Salles, F. de - Fluência, Coeficiente de Dilatação Térmica e Elevação Adiabática de Temperatura de Concretos. IBRACON, 1981, SP, Julho.
43. Sabljak, R., Kotchentenko, D. I. - Tensões Autôgenas nas Barragens de Concreto. IBRACON.
44. Silva, Gilberto Alves - Termo-Elasticidade. COPPE/UFRJ.
45. Silveira, A. F. - As Variações de Temperatura nas Barragens LNEC - Memória nº 177.
46. Silveira, A. F. - O Comportamento Térmico das Barragens de Betão - LNEC.
47. Ross, A. D. - Creep of Concrete under Variable Stress. Journal ACI, Title nº 54-41, March 1958.
48. Tagliatela, E. P., Eckschmidt, H. R. - O Controle das Tensões Térmicas em Concreto Massa de Grandes Barragens pelo Método dos Elementos Finitos e suas Percussões sobre as Modernas Tecnologias de Construção. Colóquio Paraguaio-Brasileiro sobre Tecnologia de Concreto-Massa. Assuncion, Paraguai, Julho de 1974.

49. Taylor, R. L., Pister, K. S., Goudreau, G. L. - Thermo Mechanical Analysis of Viscoelastic Solids. IJNME, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 2, 45-59, 1970.
50. Timoshenko - Teoria da Elasticidade, 3ª Edição, Ed. Guanabara Dois.
51. Wilson, E. L., Bathe, K. J., Peterson, F. E. - Finite Element Analysis of Linear and Non-Linear Heat Transfer. Nuclear Engineering and Design 29, 1974, 110-124.
52. Zagottis - As Tensões de Origem Térmica nas Barragens e o Comportamento Viscoelástico do Concreto. IBRACON.
53. Zienkiewicz, O. C. - Analysis of Visco-Elastic Behavior of Concrete Structures with Particular Reference to Thermal Stress. ACI, Title nº 68-19.
54. Zienkiewicz, O. C. - El Metodo de Los Elementos Finitos. Editorial Reverté.
55. Znamensky, D. e Kuperman, S. C. - Observações de Temperatura em Concretos dos Maciços de Barragem de Ilha Solteira. CBGB - VII SNGB, Rio de Janeiro, GB, Novembro 1971.