



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Civil

INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DE DESLOCAMENTOS EM BARRAGENS-

CASO DO CONJUNTO TOMADA D'ÁGUA-CASA DE FORÇA DA

UHE TRÊS IRMÃOS

ENG. CLAUDOMIRO MAURICIO DA ROCHA FILHO

1210001304



Ilha Solteira - SP



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Interpretação quantitativa de deslocamentos em barragens
- Caso do conjunto tomada d'água – casa de força da
UHE Três Irmãos

Eng. Claudomiro Mauricio da Rocha Filho

Proc. 071/2002 - NPD 065/02

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TEC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
19.9.02	30.09.02
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	Te. 1304
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Ilha Solteira Auto 28.10.00	R672i

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes

1210001304



sup - 169795
sup - 54208

Ilha Solteira

Fevereiro de 2002

30702006 ESTRUTURAS
R672i

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da FEIS/UNESP

R672i Rocha Filho, Claudomiro Mauricio da
Interpretação quantitativa de deslocamentos em barragens : caso do conjunto tomada d'água : casa de força da UHE Três Irmãos / Claudomiro Mauricio da Rocha Filho. -- Ilha Solteira, 2002
vii, 81 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Orientador: Haroldo de Mayo Bernardes
Inclui bibliografia

1. Barragens-Segurança 2. Concreto 3. Estruturas 4. Instrumentação 5. Retroanálise



“Interpretação quantitativa de deslocamentos em barragens – Caso do conjunto tomada d’água – casa de força da UHE Três Irmãos”

Claudio Mirol Maurício da Rocha Filho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DO
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

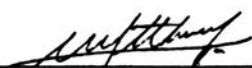
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes – orientador/FEIS/UNESP



Prof. Dr. João Carlos Chaves – FCT/UNESP



Prof. Dr. José Antonio Matthiesen – FEIS/UNESP

Ilha Solteira/SP, fevereiro de 2002

BCpIS - FEIS - UNESP



1

Aos meus filhos Lucas, Leonardo e Vinicius,
razão do meu viver.

BCpIS - FEIS - UNESP⁷



AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes e ao Prof. Dr. Rogério de Oliveira Rodrigues, pela orientação competente, dedicada e paciente.

Aos eng. Júlio César Astolphi e Wanderley Ognebene, do Laboratório CESP de Eng. Civil, pela iniciativa em incentivar e apoiar a realização deste trabalho.

Ao engenheiro Flávio Moreira Salles, do Laboratório CESP de Engenharia Civil, pelo apoio, incentivo e colaboração permanente.

Ao engenheiro Emílio, do Laboratório CESP de Engenharia Civil, pela colaboração nos assuntos de instrumentação.

À CESP, por ter me dado todas as condições de iniciar e concluir o mestrado.

Ao engenheiro Investigador Coordenador do LNEC José Mora Ramos, pela primeira e valiosa orientação, em conjunto com o Prof. Dr. Haroldo, sobre o tema escolhido.

Aos Professores e Amigos do Departamento de Engenharia Civil da Unesp.

À José Lourival, João Araújo e Osmar, técnicos da CESP, pelo apoio prestado.

Aos amigos Aloísio, José Américo, Rodrigo, Cláudio, Edson, Maria Francisca e Flávio, pela convivência agradável no período do mestrado.

À minha mãe Lourdes e ao meu pai Claudomiro, pela educação e pelo estímulo de sempre enfrentar desafios.

A minha esposa Cleire, pelo incentivo, amor e dedicação neste período tão importante de nossas vidas.



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS E TABELA.....	i
RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
1 APRESENTAÇÃO	1
1.1 Introdução	1
1.2 Modelos de análise de comportamento	4
1.3 Objetivo.....	7
1.4 Descrição sucinta dos capítulos	8
2 OBSERVAÇÃO DE BARRAGENS	9
2.1 Segurança de barragens	9
2.2 Importância do controle de segurança de barragens no contexto da privatização	14
2.3 Inspeções visuais em barragens.....	15
2.4 Instrumentação de barragens.....	16
3 INSTRUMENTAÇÃO DA UHE TRÊS IRMÃOS.....	21
3.1 Aspectos gerais	21
3.2 Segurança de barragens na CESP	28
3.3 Sistema CESP de segurança de barragens - SICESP	29
3.4 Inspeção visual de barragens na CESP	30
3.5 Instrumentação da UHE Três Irmãos	32
4 INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DE DESLOCAMENTOS.....	41
4.1 Interpretação quantitativa	41



4.2	Efeito da carga hidrostática	43
4.3	Efeito da temperatura	44
4.4	Efeito dos ‘fatores dependentes do tempo’	45
4.5	Equação de deslocamento total	46
4.6	Uso integrado de modelo numérico e de análise quantitativa.....	48
4.7	Método dos mínimos quadrados.....	48
5	ESTUDO DE CASO	50
5.1	Aspectos gerais	50
5.2	Utilização integrada de análise quantitativa e de modelo numérico ...	51
5.3	Deslocamentos calculados	52
5.3.1	Deslocamentos devido ao efeito hidrostático	52
5.3.2	Deslocamento devido ao efeito temperatura.....	53
5.3.3	Deslocamentos devido ao efeito “tempo”	53
5.4	Equação dos deslocamentos totais	54
5.5	Deslocamentos medidos.....	54
5.6	Retroanálise	55
5.7	Processo dos mínimos quadrados	57
5.8	Equações de deslocamentos obtidas	61
5.9	Comentários sobre os valores obtidos.....	62
6	CONCLUSÕES.....	77
7	REFERÊNCIAS.....	79

LISTA DE FIGURAS E TABELA:

Figura 1 – Vista de barragem de gravidade da UHE Três Irmãos.....	2
Figura 2 – Cortes referentes aos tipos de barragens mais comuns	3
Figura 3 – Instrumentos para obras de concreto, solos e rochas.....	18
Figura 4 – Correlação entre instrumentos e deteriorações observadas.....	20
Figura 5 – Quadro orientativo de localização das unidades CESP	22
Figura 6 – Vista da Usina Hidroelétrica Três Irmãos.....	23
Figura 7 – Quadro evolutivo das obras da UHE Três Irmãos.....	25
Figura 8 – UHE Três Irmãos – Planta baixa das estruturas de concreto, com detalhamento dos blocos e galerias de drenagem.....	26
Figura 9 – Atividades CESP de Segurança Ambiental.....	27
Figura 10 – Atividades do LCEC	28
Figura 11 – Detalhe de inspeção técnica em galeria de drenagem	31
Figura 12 – Vista do pêndulo direto PD-4020	33
Figura 13 – Corte esquemático em seção de uma barragem de gravidade, mostrando disposição de instalação do pêndulo direto	34
Figura 14 – Croquis esquemático das placas de apoio do coordenômetro e disposição para montagem do sistema de leitura.....	34
Figura 15a – Coodinômetro micrométrico	35
Figura 15b – Coodinômetro micrométrico e acessórios.....	35
Figura 16 – Esquema de instalação do extensômetro de hastes e a “cabeça” de leitura do mesmo	36
Figura 17 – Croquis mostrando roseta extensométrica (EH-407, 408 e 409) ..	37



Figura 18 – Vista das “cabeças” dos extensômetros de hastes, com piezometrista efetuando leituras de deslocamento	37
Figura 19 – Vista mostrando limnógrafo instalado à montante da barragem da UHE Três Irmãos e abaixo (em “close”), o mesmo instrumento	38
Figura 20 – Posicionamento de instrumentos de fundação ao longo das galerias de drenagem da UHE Três Irmãos	39
Figura 21 -Corte mostrando instrumentação de fundação de uma estrutura da UHE Três Irmãos	40
Figura 22 – Barragem do Alto Ceira, em Portugal	42
Figura 23 – Deslocamento de um bloco sob carga hidrostática.....	43
Figura 24 – Deslocamento de um bloco sob ação da temperatura.....	44
Figura 25 – Deslocamento de bloco de concreto sob ação de fatores dependentes do tempo”	45
Figura 26 – Retroanálise: abordagem direta.....	56
Figura 27 – Retroanálise: abordagem direta.....	56
Figura 28 – Planta das estruturas de concreto da UHE Três Irmãos, mostrando posicionamento esquemático dos instrumentos	68
Figura 29 – Corte transversal de estrutura de concreto da UHE Três Irmãos, mostrando posicionamento esquemático de instrumentos	69
Figura 30 – Gráfico da variação do nível d’água de montante.....	70
Figura 31 – Gráfico da variação do nível d’água de jusante	71
Figura 32 – Malha de elementos finitos - ADINA	72
Figura 33 – Gráfico de deslocamentos em função do carregamento carga hidrostático	73



Figura 34 – Gráfico de deslocamentos em função da temperatura ambiente. **74**

Figura 35 – Gráfico de deslocamentos em função dos efeitos do tempo **75**

Figura 36 – Gráfico de deslocamentos totais: medidos (PD-4020 e roseta
extensométrica- EH- 407, 408 e 409) e calculados (equação 23) **76**

Tabela 1 – Análise: deslocamentos (retroanálise) x deslocamentos (projeto).. **63**

RESUMO

ROCHA FILHO, CLAUDOMIRO MAURICIO DA. Interpretação quantitativa de deslocamentos em barragens – Caso do conjunto tomada d'água – casa de força da UHE Três Irmãos. Ilha Solteira. 2002. 82 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

Este trabalho apresenta um estudo de interpretação quantitativa de deslocamentos em barragens, tendo como caso o conjunto tomada d'água – casa de força da UHE Três Irmãos. Faz-se também, um levantamento da importância que vem sendo dada à questão da segurança e instrumentação de barragens no Brasil.

A interpretação quantitativa de deslocamentos horizontais é um método utilizado na avaliação do comportamento estrutural, desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, em Lisboa, tendo por base o acompanhamento estatístico de dados provenientes das leituras de instrumentos específicos e que fazem parte do sistema de auscultação de obras de concreto. Consiste na separação dos efeitos de deformações elásticas e não elásticas devido às principais solicitações externas e ao comportamento reológico do concreto, proporcionando comparação de forma permanente entre dados fornecidos pela instrumentação e valores calculados. Tal separação permite o estabelecimento de limites de segurança e a estimativa da causa de deslocamentos na estrutura.

A análise criteriosa dos dados de instrumentação é fundamental na atividade de auscultação de barragens, pois, por meio dela avalia-se periodicamente o



desempenho das regiões instrumentadas e, por conseguinte, o desempenho conjunto das estruturas, possibilitando condições no sentido de prever a necessidade de intervenções nas fases de operação e manutenção.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo a aplicação do método de interpretação quantitativa de deslocamentos no conjunto Tomada d'Água / Casa de Força da UHE Três Irmãos, considerando-se cada uma das parcelas relativas às principais solicitações atuantes, a saber: carregamento hidrostático, variação de temperatura e ação do tempo sobre as propriedades reológicas do material estrutural. Se constatada a precisão e confiabilidade desse método em barragem tde concreto tipo gravidade, tal estudo será útil no processo de detecção de anomalias em termos de deslocamento dessas estruturas, fornecendo subsídios para o processo de tomada de decisões no controle de segurança, podendo vir a ser estendido para outras unidades da UHE Três Irmãos e para empreendimentos similares.

Palavras-chave: Retroanálise Segurança Barragens
Concreto Instrumentação Estruturas



ABSTRACT

ROCHA FILHO, CLAUDOMIRO MAURICIO DA. Quantitative Interpretation of Displacements – Case of intake - power house of UHE Três Irmãos. Ilha Solteira. 2002. 82p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista

This research presents an study of quantitative interpretation of displacements in dams, having as the Case of intake - power house of UHE Três Irmãos dam. It is also done an study of the importance given to safety and instrumentation in dams of Brazil.

The quantitative analysis of horizontal displacements is a method used in the reporting of structural behavior, developed in the Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, at Lisboa, based on the statistical analisys of data provenient from measurements of specific instruments and that are part of the system of monitoring of concrete strutures. It consists on the separation of effects from elastic deformations and not elastic deformations due main external solicitations and on the reologic behavior of the concrete, allowing a permanent comparation between the data given from instrumentation and the calculated values, and the establishment of safety limits and prediction of the causes for the displacements in the structure.

The criterious analysis of the instrumentation data is fundamental in the activity of monitoring of dams because through this data is periodically checked the performance of the instrumented areas and therefore, the total performance of the structures, making possible conditions in the way to predict cares of operation and maintenance.

In this context, this research has as its objective the applying of the method of quantitative interpretation of displacements in the Intake – Power House UHE Três Irmãos, considering each of the relative parts to the main



imposed solicitations: hidrostatic pressure, temperature variation and the action of the time on the rheologic properties of structural material. Once the precision and confiability of this method in gravity type concrete dams, is assured this study will be useful in the process of detection of displacement of this structures, providing information for the process of decision taking in the safety control of dams, and it may be extended to other units of UHE Três Irmãos dam and for similar structures

Keywords: Back Analysis Safety Dams
Concrete instrumentation Structure



CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho, com base no tema Segurança de Barragens, apresenta um estudo de avaliação do comportamento estrutural de uma barragem de concreto tipo gravidade, no tocante a deslocamentos, por meio de um processo fenomenológico denominado método de interpretação quantitativa. Conhecido como método do LNEC [Gomes,1981], foi desenvolvido na década de 1950, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Lisboa, inicialmente, para observação de barragens do tipo abóboda. Consiste na separação dos efeitos relativos às deformações elásticas e não elásticas, em função das principais solicitações externas e do comportamento reológico do concreto. A estrutura civil, objeto deste estudo, é o bloco do conjunto Tomada de Água / Casa de Força nº 2 da Usina Hidroelétrica Três Irmãos, rio Tietê, estado de São Paulo, Brasil.

Define-se barragem como qualquer estrutura construída em vales secos ou nos cursos d'água, com a finalidade de retenção de líquidos e ou sólidos por eles arrastados [Lindquist, 1996]. As finalidades mais usuais da



construção de uma barragem são: geração de energia elétrica, abastecimento d'água, irrigação, tratamento de águas servidas, retenção materiais sólidos, controle de cheias e elevação do nível d'água para viabilizar trechos de navegação. Por empreendimento (outro termo muito usado nessa área de trabalho), subentende-se o conjunto formado pelas diversas estruturas construídas em função da barragem. No caso de usinas hidroelétricas, normalmente essas estruturas são os vertedouros, tomadas d'água / casas de força, maciços de terra, muros divisores, túneis, eclusas e obras de arte (pontes, estradas, etc.).

Com relação às barragens de concreto, dos tipos mais comuns, pode-se citar as de gravidade, as de gravidade aliviada, as de contrafortes e as em arco. Como exemplos, a figura 1 apresenta uma foto da UHE Três Irmãos, mostrando em primeiro plano, uma estrutura de concreto tipo gravidade e a figura 2 apresenta cortes explicativos de barragens dos tipos gravidade, gravidade aliviada, contrafortes e em arco.



Figura 1 – Vista de barragem de gravidade da UHE Três Irmãos.

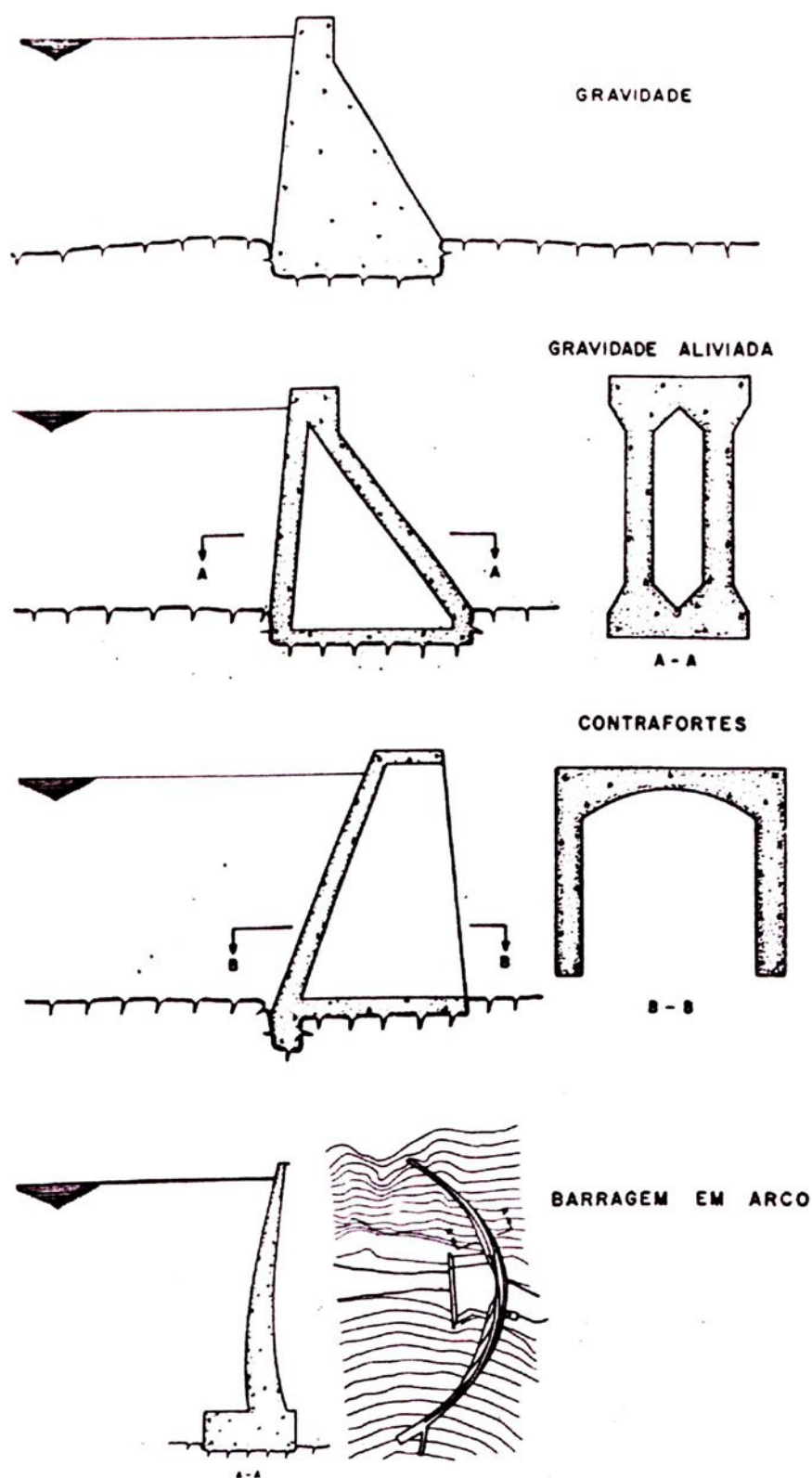


Figura 2 – Cortes referentes aos tipos de barragens mais comuns.

Barragens de concreto tipo gravidade são o objeto deste estudo de caso e o modelo de edificação hidráulica que predomina no Brasil, devido às características próprias da maior parte dos rios viáveis para exploração de recursos hídricos neste país. Essa opção ocorre porque a topografia de planície predomina nos vales onde correm esses cursos d'água e, devido também à abundância de agregados (a custo baixo) para esse tipo de construção. Esses fatores, quase que por exclusão, condicionam a implantação desse tipo de obra.

A barragem de concreto tipo gravidade é uma estrutura cuja estabilidade está diretamente condicionada ao seu peso próprio e a forma geométrica da sua seção transversal (lembra a de um triângulo), em que a sua altura e a largura da sua base possuem relação de grandeza relativamente próxima. Ao contrário do perfil das barragens de gravidade, em outros tipos de barragem, a altura da estrutura é de dimensão bem superior à de sua base.

1.2 MODELOS DE ANÁLISE DE COMPORTAMENTO

Com relação ao projeto geral e, particularmente ao item que trata da segurança da obra, o órgão projetista, ao término do período construtivo da barragem, emite um relatório de análise e interpretação de resultados baseado nos trabalhos até então realizados. Tal documento, devidamente adaptado em função das observações de campo, ocorridas durante a fase de construção, apresenta uma visão geral de todos os estudos, modelos matemáticos ou reduzidos, critérios e cálculos efetuados na fase de projeto e, via de regra, tem



o objetivo de municiar o controle de segurança da barragem em questão, numa primeira etapa.

Tal documento, porém, baseia-se em estudos realizados em condições nas quais são considerados carregamentos muito acima dos observados, tais como: cheias excepcionais, trincas de tração, sismos, etc. Por vezes, nos coeficientes de segurança utilizados consideram-se eventos de ocorrência muito pouco provável em determinadas regiões, seja por condições geográficas ou características próprias de fundações. Por outro lado, em alguns casos, a influência das ondas térmicas sazonais é desprezada na interpretação de determinadas anomalias

Visando ordenar a condução desses estudos e dar subsídios para melhor avaliar o comportamento de uma estrutura de concreto, foram criados modelos que retratam as situações de controle atualmente praticadas, os quais podem ser resumidos basicamente nas três seguintes formas:

- **Modelos Determinísticos:** baseados na utilização de um modelo matemático compreendendo barragem, fundação rochosa e carregamento hidrostático, cujas premissas são relativas às leis físicas de estabilidade e resistência dos materiais, levando em conta os esforços atuantes, bem como a geometria das estruturas em estudo e dos materiais constituintes, têm por objetivo fornecer limites teóricos de controle de uma barragem para controle da instrumentação ao longo do tempo.

- **Modelos Estatísticos:** baseados na obtenção de funções matemáticas por meio de estudos de retroanálise dos resultados observados na instrumentação,



durante um período de tempo, correlacionando causas (nível do reservatório, temperatura ambiente, etc.) e efeitos (deslocamentos, deformações, etc.).

- Modelos Mistos: baseados na utilização conjunta de modelos determinísticos e de modelos estatísticos, quando devido à dificuldade de determinar uma das ações de um efeito medido, permitem a determinação de um fator por via determinística, e dos demais, por via estatística ou vice-versa.

Na fase de enchimento do lago de uma barragem, o modelo determinístico é utilizado para se obter valores de referência para o controle da segurança, ainda que, como as propriedades de alguns dos materiais utilizados na construção não são perfeitamente conhecidas nessa fase, muitos dos parâmetros utilizados são determinados por análises estatísticas, não se tratando, portanto, de um processo único.

Depois de concluído o primeiro enchimento, o acompanhamento do comportamento da instrumentação visa a assegurar que a obra cumpra as finalidades para a qual foi construída e em condições de funcionalidade e segurança. Determinar a forma mais eficaz de interpretar os dados fornecidos pela instrumentação representa o divisor conceitual do problema, tendo em vista os métodos disponíveis.

No Brasil, a avaliação da segurança estrutural de barragens de concreto, com raras exceções, é feita de forma determinística, com base em modelos desenvolvidos anteriormente à construção. Se levarmos em conta que já no primeiro enchimento do reservatório, tem início um longo processo de acomodação do conjunto barragem de concreto / fundação, alterando os

parâmetros utilizados inicialmente na elaboração do projeto, faz-se necessário, pois, uma nova avaliação.

Nesse contexto, para as obras que possuem um eficiente projeto de instrumentação, a interpretação sistemática das informações colhidas, fundamentada em técnicas de engenharia com tratamentos matemáticos específicos, conduz a um processo de tomada de decisões consistente, de modo que os fatores que possam comprometer a segurança do empreendimento tenham grande probabilidade de serem contornados ou minimizados.

O modelo adotado neste estudo de caso foi o misto, em que os coeficientes da função representativa dos deslocamentos em virtude da variação do nível d'água são obtidos matematicamente, e os coeficientes relativos às demais funções são determinados, estatisticamente, com base nos deslocamentos medidos pela instrumentação, com a aplicação de estudos de retroanálise por tentativas fazendo uso do método dos mínimos quadrados.

1.3 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo a aplicação do método de interpretação quantitativa de resultados obtidos na observação de barragens de concreto em uma estrutura do tipo gravidade, efetuando-se a identificação das parcelas relativas às principais solicitações atuantes a saber: carregamento hidrostático, variação da temperatura ambiente e ação do tempo sobre as propriedades reológicas do material estrutural.



1.4 DESCRIÇÃO SUCINTA DOS CAPÍTULOS

No capítulo 2, são feitos comentários sobre segurança de barragens, sua abrangência, seu estágio atual, sua importância no contexto da privatização e também sobre inspeções visuais e instrumentação de barragens.

No capítulo 3, são descritas as características da barragem de Três Irmãos, e são feitos comentários sobre os estágios da segurança de barragens na CESP, desde sua implantação até o momento atual, explanando o SICESP - software desenvolvido pela CESP para acompanhamento do comportamento de suas hidrelétricas, o programa de inspeções visuais da CESP, o sistema de instrumentação existente na UHE Três Irmãos e finalizando, um detalhamento sobre os instrumentos de interesse para este estudo de caso.

No capítulo 4, abordam-se o processo de interpretação quantitativa e efeitos a determinar, os princípios da equação do deslocamento total, o uso do método de elementos finitos e do método dos mínimos quadrados.

No capítulo 5, são explanados a aplicação do método de interpretação quantitativa e aspectos de sua aplicação na obra em questão, a aplicação do método de elementos finitos por meio do programa computacional ADINA [ADINA, 1997] e o conseqüente isolamento da parcela relativa ao efeito da carga hidrostática, o isolamento das parcelas relativas à temperatura e ao tempo, a obtenção da equação de deslocamento total e a apresentação dos resultados obtidos com este estudo de caso.

No capítulo 6, são feitas as conclusões relativas ao processo, com base nos resultados obtidos.

CAPÍTULO 2

OBSERVAÇÃO DE BARRAGENS

2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS

“Se um homem negligenciar a fortificação de seu dique, se ocorrer uma brecha e o cantão inundar-se, o homem será condenado a restituir o trigo destruído por sua falta. Se não puder restituí-lo, será vendido, assim como os seus bens, e as pessoas do cantão de onde a água levou o trigo, repartirão entre si o produto da venda” - síntese do código de Hamurabi, imperador da Babilônia, cuja civilização floresceu ao longo do rio Eufrates, de 2000 a 1750 a. C. [Silveira, 1983].

Como se vê, o barramento de um rio sempre gerou preocupação, mas afinal, qual é a idéia comum ao se deparar com o termo “segurança de barragens”?

Pratica-se segurança de barragens, desde a concepção do projeto de um empreendimento, passando-se pelo período de construção, situação onde é otimizada em função de características locais observadas, pelo período de enchimento do reservatório e pelo período de vida útil da barragem até a sua desativação total, uma vez cumprido seu objetivo, ou se alguma anomalia ocorrer e levar a tal.



De forma sucinta, pode-se definir “segurança de uma barragem” como o conjunto de medidas implantado com o objetivo de avaliar o comportamento de um empreendimento do início de sua construção até o final de sua vida útil, fornecendo inclusive os subsídios necessários para se ativar processos de intervenção, visando manter as condições de funcionamento e integridade da obra sem afetar a segurança de terceiros e do meio ambiente.

No meio empresarial, o termo segurança de barragens engloba outras três modalidades de controle: Segurança Econômica, Segurança Financeira e Segurança ao Investimento Social.

A Segurança Econômica diz respeito aos cuidados necessários para que o retorno do capital investido ocorra durante a vida útil do empreendimento.

A Segurança Financeira está voltada para os estudos e esforços no sentido de assegurar a existência de recursos necessários para a conclusão do empreendimento, levando-se em conta eventuais acréscimos de custos.

A Segurança ao Investimento Social diz respeito aos cuidados necessários para que sejam implementadas as compensações justas às alterações sociais decorrentes do empreendimento.

No meio técnico, o termo segurança de barragens engloba três modalidades de controle: Segurança Hidráulica – Operacional, Segurança Ambiental e Segurança das Estruturas.

A Segurança Hidráulica / Operacional de uma barragem tem por objetivo ações em operações hidráulicas normais ou emergenciais, em que possa haver riscos à barragem ou à população e investimentos existentes à

jusante da obra. Os estudos nesse sentido têm início na fase de projeto, com os especialistas da área de hidráulica dimensionando os órgãos extravasores, estabelecendo leis de manobra e cuidados de operação e manutenção dos mesmos, de modo que problemas com cheias excepcionais, erosões à jusante e inundações generalizadas não ocorram, ou sejam minimizados.

A Segurança Ambiental de uma barragem tem por objetivo proteger o meio ambiente de alterações advindas da sua implantação e que possam acarretar prejuízos irreparáveis. Ainda na fase de planejamento, a legislação brasileira obriga os empreendedores interessados na construção de uma obra, que por suas características causará prejuízos ao meio ambiente, a elaborar um relatório denominado Relatório de Impacto ao Meio Ambiente – RIMA. Sem a aprovação desse relatório pelas autoridades competentes a obra não pode operar e desse mesmo relatório, constam as medidas que devem ser tomadas para repor ao meio ambiente as alterações decorrentes da obra. Após a aprovação e a implantação das medidas corretivas, faz-se necessário um controle permanente da região impactada, de modo a manter a situação semelhante à anterior da obra e, quando necessário, implementar medidas corretivas ao projeto.

A Segurança Estrutural de uma barragem tem por objetivo a observação das diversas estruturas que compõem o empreendimento e, diante de alguma anormalidade, a análise do problema e acionamento dos órgãos competentes, de forma a garantir a manutenção das condições normais de estabilidade e funcionamento da obra, dentro dos padrões especificados.

A implantação de uma barragem em um determinado rio leva a um conseqüente represamento, em que o volume d'água que antes seguia de



forma natural pelo leito, estará passando através dos condutos forçados da usina, em condições normais de operação e através da fundação devido à percolação; ou por cima desta, em caso de galgamento.

Vale frisar que, quando se fala de segurança de barragens no meio técnico, é consenso que não há possibilidade de riscos nulos; quer dizer, não há segurança total, pois o que se busca, na realidade, é uma otimização dos cuidados tomados até então, muitas vezes baseando-se em fracassos ocorridos.

A questão maior da segurança de barragens está em se conciliar níveis d'água do reservatório com a estabilidade das estruturas, em função das características de cada obra e da sua fundação, buscando-se condições satisfatórias tanto para o empreendimento como para populações e investimentos situados à jusante. Segundo estatística, como causas de acidentes com barragens no mundo, observa-se que, aproximadamente 30 % dos casos têm sido devido a transbordamento, 25 % devido à percolação e 15% ao escorregamento de taludes, ficando os 30% restantes devido a causas diversas (perdas d'água em condutos, proteção de taludes, etc.) [Lindquist, 1996].

A segurança estrutural de uma barragem é motivo de grande preocupação no meio técnico devido à possibilidade de ocorrência de eventuais acidentes ou incidentes, causando danos com sérias proporções sobre a região à jusante, normalmente habitada e com interesses econômicos. O fato de muitas barragens possuírem um sistema de instrumentação adequado e o controle de seus dados de forma padronizada, pode não ser

condição suficiente para se delinear o processo evolutivo de um quadro de deterioração ou colapso estrutural.

Um sistema de segurança estrutural de barragens engloba não somente a implantação de um projeto de instrumentação e de um caderno de diretrizes abrangentes, mas sim, para dar vida ao projeto, a condição necessária de equipes bem treinadas e aparelhadas, de modo que problemas emergenciais tenham condições de serem solucionados ou minimizados a contento.

Em segurança estrutural de barragens, os itens que mais tem causado preocupação quanto à estabilidade da estrutura têm como agente mecânico a água, podendo esta levar a uma situação de acidente ou incidente, e por consequência, levar a deterioração da obra ou da fundação; sendo necessária, pois, uma intervenção correta a tempo e, em muitos casos, nem isso pode ser suficiente.

Historicamente, no Brasil, até o momento, o controle de segurança de barragens é realizado pelo proprietário e, em alguns casos, por meio de consultorias especializadas. Por sua vez, é notório como o assunto segurança de barragens vem sendo alvo de estudos por câmaras especializadas de vários países, preocupadas com o risco que um sinistro pode significar, não só pela perda do investimento em si, mas também, pelo destino de milhares de pessoas, bens imóveis / móveis, lucros cessantes e o trauma que isso traz para a população. Com base no exposto, ações no sentido de contornar ou minimizar situações dessa natureza, devem obrigar os proprietários a um controle preventivo em suas barragens, pois investimentos nesse sentido têm uma relação custo/benefício plenamente justificável.



Nesse contexto, o apoio técnico de profissionais externos, ligados a universidades ou a consultorias especializadas no assunto, tem sido de grande valia para a segurança de barragens no Brasil. Ocorre que, dada a natureza de suas funções, tais profissionais têm tido mais condições de se preocupar com itens específicos e de se aprofundar mais em novos conceitos, proporcionando um diferencial na resolução de problemas que afetam barragens, os quais podem ser parecidos mas não os mesmos, e que, em muitas empresas, ainda recebem tratamento generalizado.

2.2 IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DE SEGURANÇA DE BARRAGENS NO CONTEXTO DA PRIVATIZAÇÃO

A segurança de barragens, como se vê, é de suma importância tanto para o proprietário como para a manutenção dos direitos de terceiros. No modelo brasileiro, até pouco tempo, o controle da maioria das barragens brasileiras esteve a cargo de empresas estatais, e tendo em vista os processos de privatização em curso, inúmeros são os esforços que vêm sendo desenvolvidos por entidades técnicas da sociedade, no sentido de se implantar a normatização do setor de segurança de barragens, para que novos proprietários continuem com o compromisso de apoio e valorização do setor.

Seguindo uma tendência mundial, diversos países, entre eles, os Estados Unidos da América, Portugal, Canadá, Suécia, Noruega, Finlândia e Inglaterra, implantaram legislação pertinente ao assunto. No Brasil, o Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB, por meio do seu Núcleo Regional de São Paulo, visando fornecer subsídios nesse sentido às autoridades



governamentais, publicou no ano de 1999, o seu “Guia Básico de Segurança de Barragens”. Esse documento, tendo por base a normatização canadense, faz uma abordagem ampla e técnica do assunto e pelo seu teor, apresenta-se como um instrumento obrigatório de pesquisa, tanto no planejamento / implantação de novas barragens como nos processos de reavaliação de segurança das existentes.

Caso adotado na íntegra ou mesmo como subsídio, o Guia Básico de Segurança [CBDB,1999] deve preencher, ainda que tardiamente, uma lacuna existente em nossa legislação, pois a implantação de um item normativo e mandatário dessa natureza tende a mostrar a todos o conceito de segurança, a confiabilidade e o respeito com que são tratadas as obras por parte das autoridades brasileiras.

2.3 INSPEÇÕES VISUAIS EM BARRAGENS

Quando se tem um sistema de normas e procedimentos sobre segurança de barragens em um determinado empreendimento, um dos itens primordiais é o da inspeção visual. Essas inspeções, geralmente qualitativas, têm o objetivo de investigação e detecção de eventuais situações anômalas nas estruturas de uma barragem e é realizado por um conjunto de profissionais treinados para esse fim.

Conforme exigência específica de cada caso de inspeção visual, esses conjuntos são formados por equipes de técnicos da própria obra (engenheiros de manutenção e piezometristas) e por engenheiros (inspetores e especialistas) ligados, via de regra, a um órgão técnico central, em cujas

funções insere-se a de gerenciar o sistema de segurança de barragens da empresa. Normalmente, esses grupos de profissionais são responsáveis pelo monitoramento e manutenção dos instrumentos de auscultação existentes em cada obra, pela compilação dos dados observados até a elaboração dos relatórios de auscultação, das inspeções periódicas visuais / emergenciais, pelos levantamentos topográficos, bem como, pela elaboração das análises da instrumentação e dos pareceres técnicos, conforme sua formação técnica. Como resultado, obtém-se um quadro da barragem que tem como objetivo propiciar uma visão geral do seu comportamento atual, face aos diversos fatores a que está sujeita.

Em relação ao exposto, cabe ressaltar que cuidados devem ser tomados para os casos de procedimentos emergenciais, de modo que decisões urgentes não fiquem expostas a rotinas burocráticas por parte do proprietário do empreendimento (pessoa física ou jurídica) e que a busca de uma solução correta esteja amparada em bases técnicas. Uma perfeita sintonia entre equipes de campo e de projeto é necessária, de modo que diretrizes técnicas sejam seguidas à risca. Também é desejável que as gerências responsáveis, constantemente propiciem condições de capacitação e motivação às equipes, de modo a se ter um envolvimento generalizado da parte de todos.

2.4 INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

Quanto à instrumentação em si, a análise dos dados coletados é o item chave na atividade de auscultação de barragens, pois por meio dela se avalia periodicamente o desempenho das regiões instrumentadas e, por



consequente, o desempenho conjunto das estruturas, dando condições para melhorar sua operação e manutenção. Os parâmetros básicos dessa avaliação são as medidas das grandezas físicas obtidas dos resultados da instrumentação, as observações coletadas durante as inspeções de campo e os dados hidrológicos e climatológicos básicos tais como níveis d' água, temperaturas, etc.

Esses dados, que à primeira vista mais parecem um embaralhado de informações, são organizados por equipes normalmente treinadas e familiarizadas com cadernos de "check-list" (listagem mensal previamente elaborada individualmente para cada obra em que constam itens de interesse para inspeção e com facilidade de preenchimento) e programas de computação (softwares e planilhas) elaborados ou adaptados para esse fim, de modo que informações de inspeções, leituras, compilação de dados e gráficos, sejam organizados e dispostos em condição de análise. Daí, com base nessas informações, devidamente compiladas e por comparação com o modelo adotado, seja ele determinístico, estatístico ou misto (híbrido), tem-se um estudo das condições de segurança da obra.

Os instrumentos de auscultação tem por objetivo gerar insumos para a análise do comportamento estrutural da barragem e para tal, são desenvolvidos e instalados em posições definidas pelos projetistas. O intuito é de que possam fornecer leituras que possibilitem a identificação das grandezas (deslocamentos, deformações, rotações, permeabilidade, temperatura, etc.) necessárias ao controle da obra. Os instrumentos usuais em instrumentação de barragens de concreto estão ilustrados na figura 3 e são os seguintes:



- extensômetros de hastes: utilizados para medidas de deslocamentos e deformações em maciços rochosos, fundações e estruturas de concreto;
- medidores de recalque: utilizados para medidas de deslocamentos verticais do conjunto fundação – maciço de terra;
- medidor triortogonal: utilizado para obtenção de deslocamentos em juntas e fissuras, em barragens de concreto, galerias e maciços rochosos;
- pêndulo direto: utilizado para medidas de deslocamentos horizontais em estruturas de concreto, resultantes da rotação das mesmas;
- pêndulo invertido: utilizado para medidas de deslocamentos horizontais em estruturas de concreto, resultantes da translação das mesmas;
- piezômetros: utilizados para a determinação de pressões neutras e subpressões em maciços de terra, fundações e taludes;
- termômetros: utilizados para medidas de temperatura no interior ou na superfície de estruturas de concreto;
- tensômetro para armaduras: utilizado para a determinação de tensão em armaduras de estruturas de concreto.



Figura 3 – Instrumentos para obras de concreto, solos e rochas (Fonte: CESP).

O projeto de instrumentação, elaborado na fase inicial e complementado durante o processo construtivo (devido à necessidade de alterações passíveis de ocorrer), deve possibilitar a obtenção das leituras de interesse desde o início da obra, visando testar seu funcionamento e fornecimento de dados que possibilitem o controle do comportamento das estruturas nas diversas fases da obra.

O acompanhamento da instrumentação de auscultação, não só das leituras mas também de sua análise sistemática é importante durante toda a vida útil da barragem. A periodicidade dessas análises pode diminuir, após os cinco primeiros anos do enchimento do lago, mas não deve ser interrompida. Acidentes em barragens ocorrem geralmente em função de problemas acumulativos, que se desenvolvem ao longo dos anos. Sistemas de instrumentação bem projetados, implantados e acompanhados regularmente, certamente poderiam ter evitado diversos incidentes ocorridos [Eigenheer, 1986].

Sistemas de instrumentos, usualmente empregados na auscultação de barragens de concreto, desde que projetados, instalados, conservados e operados dentro das especificações, fornecerão leituras que, conjuntamente com as inspeções visuais, levam os analistas a um diagnóstico mais preciso dos principais tipos de deterioração. Destaca-se a importância da instrumentação da fundação e das inspeções visuais, que por si só já permitem a observação da quase totalidade das deficiências observadas. A seguir, a figura 4 apresenta uma correlação entre instrumentos instalados e as

deteriorações possíveis de serem detectadas por meio da sua correta observação [CBDB, 1996].

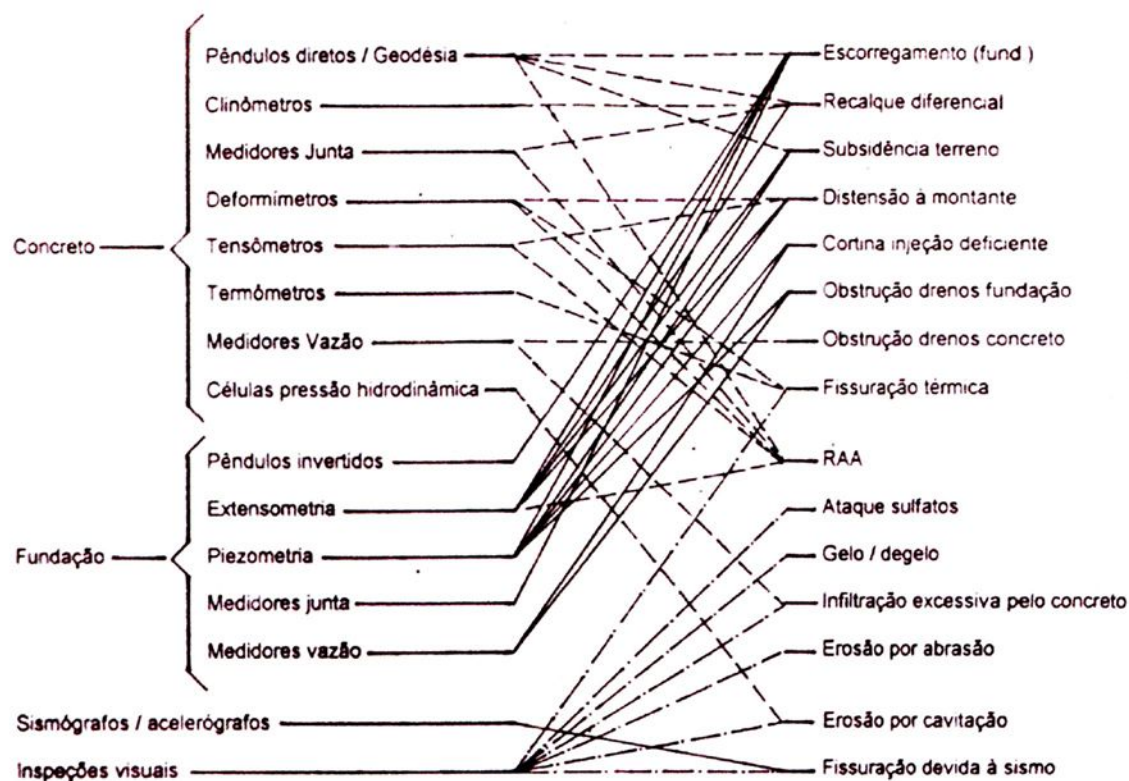


Figura 4 – Correlação entre instrumentos e deteriorações observadas.

Resumindo, com a instrumentação de barragens de concreto, tem-se por objetivo, monitorar deslocamentos, deformações, desalinhamentos, ocorrência de vazamentos, deterioração material, recalques diferenciais, abertura de juntas de dilatação entre blocos, aparecimento de trincas, comportamento de subpressões e infiltrações, de modo que inconvenientes relativos ao desempenho das estruturas possam ser contornados ou minimizados a tempo.

No presente trabalho, serão considerados somente os deslocamentos horizontais observados na crista de um bloco de concreto.

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTAÇÃO DA UHE TRÊS IRMÃOS

3.1 ASPECTOS GERAIS

A UHE Três Irmãos é um empreendimento integrante do Aproveitamento Múltiplo Três Irmãos, de propriedade da Companhia Energética de São Paulo– CESP, e situa-se no rio Tietê, no oeste paulista, entre os municípios de Pereira Barreto e Andradina, a 28 km da confluência com o rio Paraná. O Aproveitamento Múltiplo Três Irmãos foi projetado a partir de 1978 pela Promon Engenharia e construído pela Construtora Andrade Gutierrez, com a coordenação e supervisão da CESP em todas as fases. A figura 5 apresenta um quadro orientativo da empresa CESP, mostrando a localização de suas usinas hidroelétricas e das gerências de meio ambiente, cuja missão é zelar pelo controle ambiental.

A concepção inicial era de servir como barragem de contenção, dotada de eclusa e como ampliação da rota de navegação fluvial à região centro- oeste, com seu lago ligado ao da UHE Ilha Solteira por meio de um canal a céu aberto, denominado Canal de Pereira Barreto, com 9,6 km de extensão, projetado pelo Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores - CNEC e a construção a cargo da C. R. Almeida, também com a coordenação e supervisão da CESP em todas as fases.



O objetivo principal do projeto era suprir a falta d'água nos períodos de seca das bacias dos rios Paranaíba e Grande, que alimentam a UHE Ilha Solteira, por meio do desvio de águas do rio Tietê ao rio São José dos Dourados, afluente do lago, e também interligar o eixo de navegação paulista com a região central do país, visando baratear o custo do transporte de produtos agrícolas aos grandes centros.



Figura 5 – Quadro orientativo de localização das unidades CESP.

Ainda na fase inicial da construção em junho de 1980, a CESP decidiu pela implantação de um sistema gerador de energia elétrica com a instalação de oito turbinas tipo Francis, perfazendo uma potência final de 1292 MW. Tal alteração originou um aproveitamento múltiplo nas áreas de geração, regulação de níveis d' água conforme a necessidade de uma das duas usinas e da navegação fluvial.

Cronograma da construção:

Junho de 1980:	Início das obras;
Maio de 1987:	Desvio do rio pelas adufas;
Agosto de 1990:	Fechamento das adufas;
Agosto de 1990:	Início do enchimento do lago;
Setembro de 1993:	Término do enchimento do lago;
Novembro de 1993:	Inauguração do grupo gerador nº 1;
Maio de 1994:	Inauguração do grupo gerador nº 2.

O enchimento do lago teve início em agosto de 1990, e a usina começou a gerar energia elétrica em 1993. Atualmente, são cinco as unidades de geração em operação, com uma potência instalada de 807,5 MW. A figura 6 apresenta uma vista aérea de jusante para montante da UHE Três Irmãos, após a conclusão das obras.



Figura 6 – Vista da Usina Hidroelétrica Três Irmãos.

DADOS DO EMPREENDIMENTO UHE TRÊS IRMÃOS

Comprimento total: 3.710,00 m;

Estruturas de concreto: 480,00 m;

Barragem de terra – M D: 1610,00 m;

Barragem de terra – M E: 1620,00 m;

Cota de coroamento: 331,40 m;

Altura máxima da estrutura de concreto: 82,60 m.

VERTEDOURO DE SUPERFÍCIE

Comporta tipo: radial;

Quantidade: 04 unidades;

Descarga total: 9.500 m³ /s.

UNIDADES DE GERAÇÃO

Turbina: Francis;

Quantidade: 08 unidades;

Potência total: 1292,00 MW;

Velocidade nominal (sentido horário): 85,70 rpm.

Área de inundação: 817,00 km²;

Volume de concreto: 1.488.000 m³;



A seguir, na figura 7 tem-se um quadro com diferentes etapas do desenvolvimento da obra: o primeiro quadro apresenta uma vista do rio Tietê, com a linha tracejada (preta e branca) mostrando o eixo projetado da barragem e a vista de uma das primeiras concretagens, junto à fundação rochosa. As duas fotos intermediárias mostram o conjunto de casas de força e uma visão geral das estruturas (obra em fase intermediária). Os dois últimos quadros apresentam uma vista de montante das tomadas d'água e uma vista de jusante do empreendimento em operação.

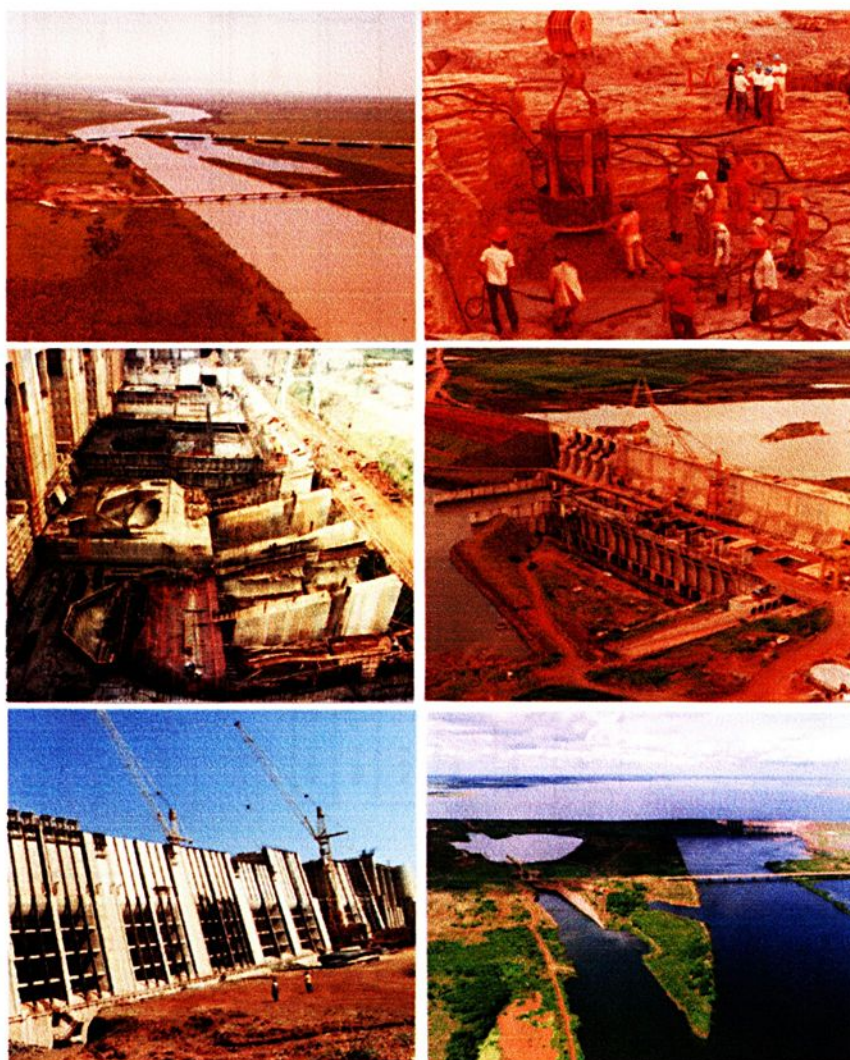


Figura 7 – Quadro evolutivo das obras da UHE Três Irmãos.

Com relação à Segurança Ambiental, a CESP desenvolve um programa de forma a reparar ao meio ambiente e à população os males causados com a implantação de seus empreendimentos. Este reparo é realizado com a manutenção de equipes permanentes especializadas na recuperação de áreas degradadas, promovendo o repovoamento dos lagos, o replantio de árvores, proteção e manutenção da fauna; na área social, o reparo consiste do reassentamento de populações afetadas. A figura 9 mostra um panorama das atividades CESP voltadas para o meio ambiente.



Figura 9 – Atividades CESP de Segurança Ambiental.

3.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS NA CESP

Na década de 60, teve início o ciclo de grandes obras no ramo das hidroelétricas, e a CESP, para atender a construção da UHE Ilha Solteira e dar apoio às demais usinas em funcionamento, montou o hoje denominado Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), reconhecido internacionalmente. Essa instituição recebeu influência direta de duas importantes escolas de engenharia da época: a portuguesa, nos moldes do qual se especializou nas áreas de segurança de barragens, rochas e solos, e a americana, espelho adotado pela área de concreto, devido ao forte intercâmbio existente com consultorias contratadas para atuar na construção da UHE Ilha Solteira. Desde então, devido ao desenvolvimento técnico alcançado ao longo dos anos, a CESP passou de receptora a prestadora de serviços especializados de engenharia a terceiros, tanto no Brasil como no exterior. A figura 10 ilustra três atividades do LCEC, vista de trabalhos em ensaios de aço, de ensaios no campo e de análise de cimentos.



Figura 10 – Atividades do LCEC.

Para atender as necessidades da empresa relativas à atividade de segurança de barragens, o Laboratório CESP de Engenharia Civil - LCEC estruturou o sistema de segurança de barragens da empresa, formando

equipes técnicas (engenheiros inspetores e técnicos) em seu próprio quadro para atender as diversas solicitações relativas às inspeções visuais de superfície e subaquáticas, controles topográficos, levantamentos batimétricos e manutenção de instrumentos de auscultação. Numa segunda etapa, foi implantado um programa de treinamento voltado às equipes técnicas (engenheiros de manutenção civil e piezometristas), ligados às usinas para condução em inspeções visuais de rotina e leitura de instrumentos, tornando mais eficiente a identificação de anomalias e buscando uma mesma linguagem, sempre com reciclagens periódicas, em conformidade com diretrizes do LCEC. Na década de 80, visando informatizar parte das tarefas relativas ao envio de dados às suas dependências, o LCEC implantou um programa de computador denominado “Sistema de Segurança de Barragens (SSB)” para recebimento e tratamento de dados da instrumentação das usinas. As leituras de instrumentos, até então enviadas via malote, passaram a ser digitadas e disponibilizadas para a equipe técnica do LCEC no “Mainframe” (computador central) da empresa.

3.3 SISTEMA CESP DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

“SICESP”

Na década de 90, com o surgimento de novas ferramentas na informática, o LCEC desenvolveu um novo sistema denominado “Sistema Cesp de Segurança de Barragens (SICESP)” em substituição ao SSB, gerando um avanço para a empresa no tocante à informatização da segurança de barragens. O sistema criado compreende três módulos distintos: Cadastro Técnico das Usinas Hidroelétricas, Instrumentação e Análise e, por último, o de



Gerenciamento. O Cadastro Técnico apresenta os dados técnicos necessários para análises de segurança por empreendimento, o módulo de Instrumentação e Análise possibilita a avaliação dos gráficos relativos às leituras compiladas dos instrumentos também por empreendimento, e o módulo de Gerenciamento traz as normas e regulamentos que auxiliam como base para análises da segurança estrutural de barragens.

3.4 INSPEÇÃO VISUAL DE BARRAGENS NA CESP

Como já citado, os processos de acompanhamento da instrumentação e as inspeções visuais são atividades de segurança estrutural de uma barragem desenvolvidos no campo. Na CESP, esses processos obedecem a seguinte sistemática:

- Processo de leitura da instrumentação: aplicado por técnicos de instrumentação da usina (equipe de campo) e, quando de inspeção periódica geral, com o acompanhamento de engenheiros inspetores;
- Processo de leituras emergenciais e inspeção especial de instrumentos: aplicado quando constatadas leituras anormais ou deficiência no aparelho, por engenheiros inspetores e, se necessário, com o apoio do LCEC, por intermédio de sua equipe especializada em manutenção de instrumentos;
- Processo de inspeção visual periódica: são realizadas inspeções técnicas aos vários locais de interesse na obra, de duas formas, sendo uma pela equipe de campo, via “check-list” e uma segunda, com o mesmo intuito porém, mais abrangente, dirigida pela equipe de engenheiros inspetores;



- Processo de inspeção visual especial: aplicada com coordenação de engenheiros inspetores e, quando necessário, com a presença de consultores especializados no assunto, visando providências urgentes com vistas à solução do problema.

A figura 11 mostra uma situação de inspeção de instrumentos na UHE Três Irmãos, em que o engenheiro de manutenção civil local e o técnico de manutenção do LCEC, examinam funcionamento de piezômetro de tubo com anomalia, constatada anteriormente pelo piezometrista da usina.



Figura 11 – Detalhe de inspeção técnica em galeria de barragem.

Finalizando, tem-se a comentar que, no final da década de 90, devido a uma reestruturação interna na CESP, o controle e a interpretação de resultados da instrumentação, relativos à segurança estrutural de barragens passaram para a responsabilidade da Diretoria de Geração, ficando o LCEC, além de suas atividades afins (concreto, solos e rochas), com a responsabilidade de fabricação, instalação e manutenção dos instrumentos necessários à CESP e às outras empresas do ramo.

3.5 INSTRUMENTAÇÃO DA UHE TRÊS IRMÃOS

O conjunto de estruturas de concreto do corpo principal da UHE Três Irmãos, composto por vertedouros, tomadas d' água/ casas de força, barragens de gravidade, área de montagem, muros direito e esquerdo, possui o seguinte sistema de auscultação: 104 piezômetros de tubo; 02 piezômetros pneumáticos; 66 termômetros elétricos; 53 medidores de junta; 35 medidores triortogonais; 22 extensômetros de hastes; 04 tensômetros para concreto armado; 08 medidores de vazão; 07 pêndulos diretos; 02 caixas atensoriais; 03 cadeias clinométricas, 04 piezômetros elétricos e 02 limnígrafos [CESP, 1999].

A observação de deslocamentos nas estruturas de concreto é feita por meio de um conjunto de instrumentos, constituído de: pêndulos diretos, cadeias clinométricas, extensômetros de hastes, medidores de junta (elétricos e mecânicos) e marcos topográficos, os quais estão instalados em blocos considerados de interesse, tanto pela sua importância em si como pela sua fundação rochosa. São mostrados nas figuras 20 e 21, tanto em planta como em corte, a disposição do conjunto de instrumentos de fundação, em blocos considerados estratégicos na UHE Três Irmãos.

No caso específico deste estudo de caso, são de interesse o pêndulo direto PD-4020, os extensômetros de hastes EH-406, EH-407, EH-408 e EH-409, localizados na Tomada d'Água nº 2 e os limnígrafos de montante e de jusante. A seguir, uma breve explanação específica para esses três tipos de instrumentos:

a) Pêndulo Direto [CESP,1992]: possibilita medir deslocamentos de pontos da estrutura em relação a outros pontos da estrutura ou a pontos da fundação; nesse caso, entre a crista da barragem e a galeria de drenagem sob a Tomada d'Água. É composto por um fio de aço inox, fixado por meio de um dispositivo acoplado a um perfil metálico chumbado no concreto, pouco abaixo da crista da barragem; na extremidade inferior do fio, fica suspenso um peso de aproximadamente 392 N (40 kgf), dotado de quatro aletas e imerso em um tambor de óleo – figura 12. A figura 13 mostra um corte esquemático do posicionamento do pêndulo no corpo da barragem. O ajuste do posicionamento do fio com relação ao tubo que o envolve é feito por meio de um dispositivo especial pouco abaixo do local onde se fixa o prumo. O coordenômetro micrométrico é um aparelho desenvolvido para efetuar leituras de deslocamentos horizontais no fio de prumo do pêndulo, posicionado sobre uma base metálica fixa, conforme figuras 12 e 14. A figura 15-a, mostra uma foto do coordenômetro micrométrico e a figura 15-b, mostra o aparelho completo.

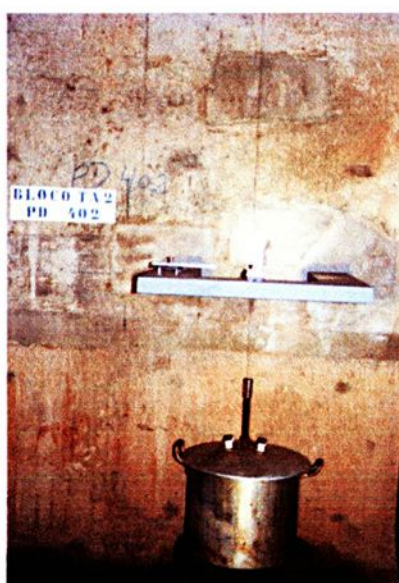


Figura 12 – Vista do pêndulo direto PD-4020 (Fonte: CESP).

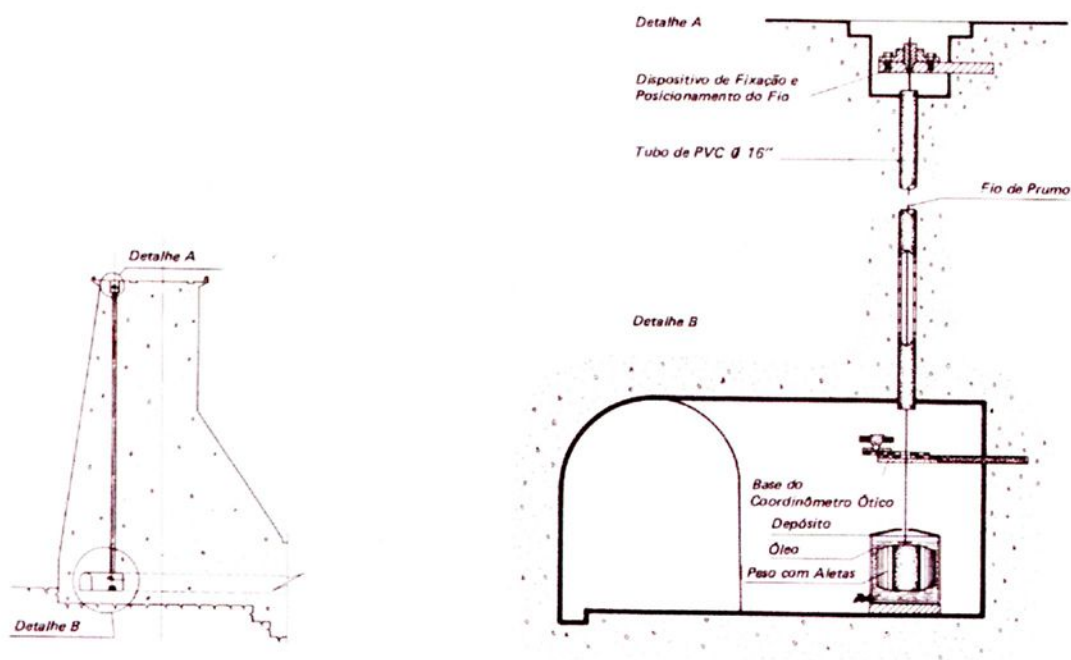


Figura 13 – Corte esquemático em seção de uma barragem de gravidade, mostrando disposição de instalação do pêndulo direto [CESP, 1992].

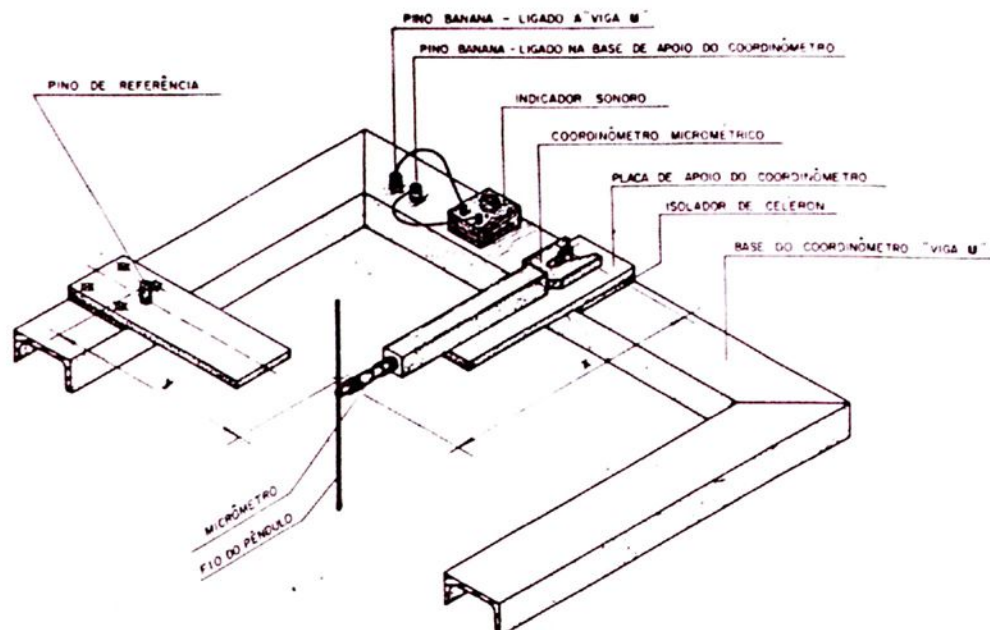
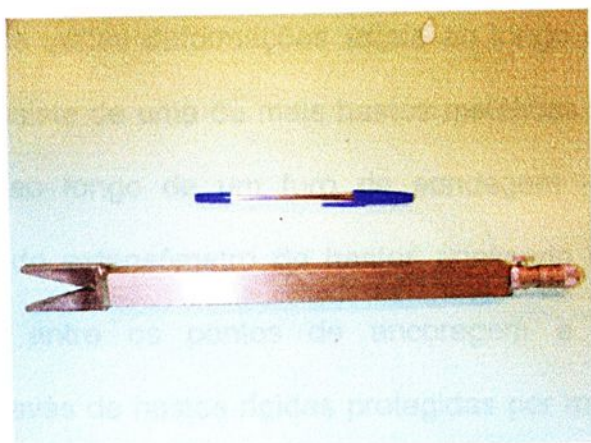
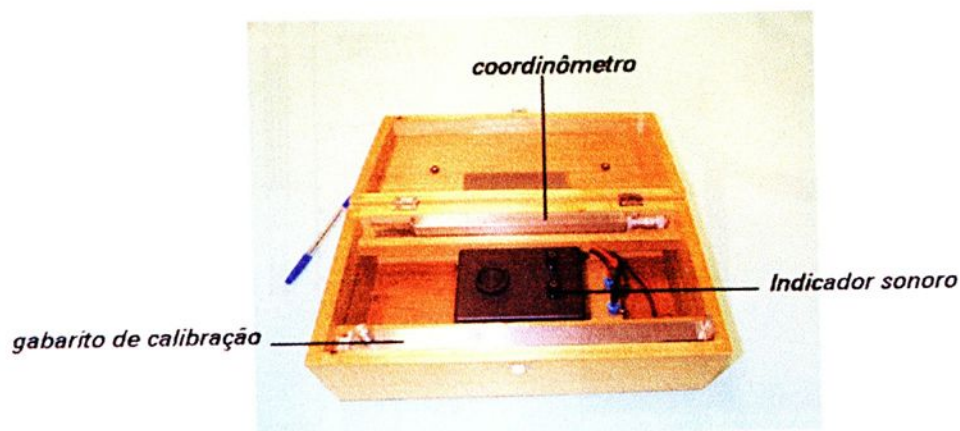


Figura 14 – Croquis esquemático das placas de apoio do coordenômetro e disposição para montagem do sistema de leitura (Fonte: CESP).



Coordinômetro micrométrico



Coordinômetro completo

Figuras 15a e 15b - Coordinômetro micrométrico.

b) Extensômetro de Hastes [CESP,1992]: utilizado para medir deslocamentos e deformações em maciços rochosos, possibilita a determinação de várias deformações axiais ao longo de um mesmo furo de sondagem. Consiste de uma ou mais hastes metálicas fixadas a uma ou mais profundidades ao longo de um furo de sondagem - Figuras 16 e 17. O funcionamento do extensômetro de hastes analisado é mecânico, sendo os deslocamentos entre os pontos de ancoragem e a cabeça de leitura transmitidos através de hastes rígidas protegidas por mangueiras plásticas; as leituras são feitas com um relógio comparador – Figura 18;

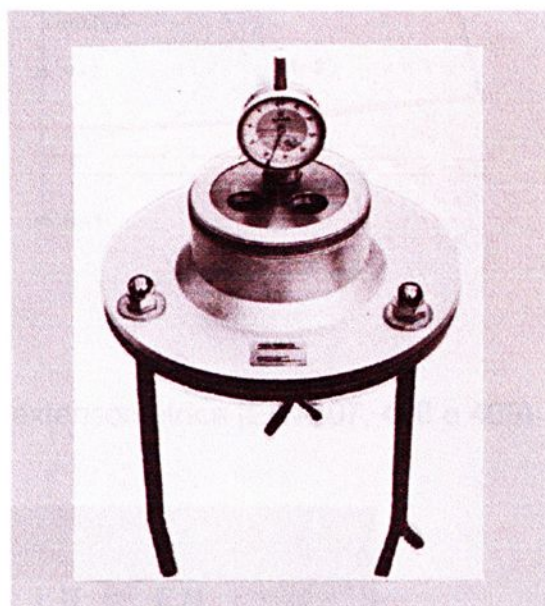
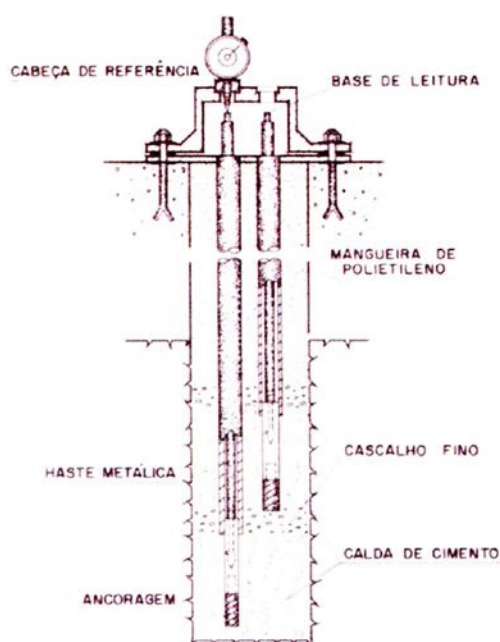
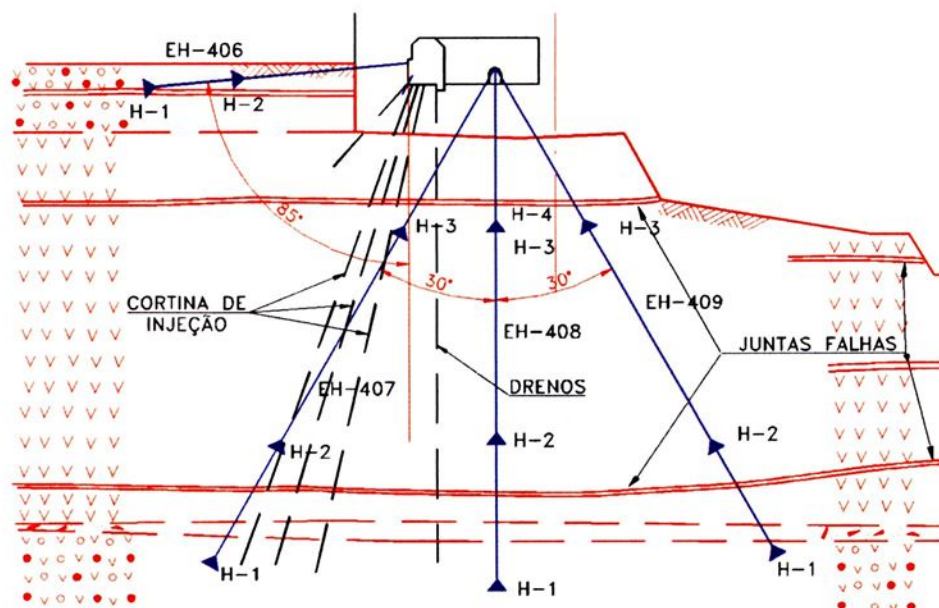


Figura 16 – Esquema de instalação do extensômetro de hastes e a “cabeça” de leitura do mesmo (Fonte: CESP).

O conjunto formado pelos extensômetros de hastes EH-407, 408 e 409, é denominado roseta extensométrica, devido a disposição em que são instalados, sendo o EH-408 disposto na vertical e os outros dois inclinados de

30° em relação ao primeiro, no plano montante – jusante. As hastes dos três instrumentos são chumbadas em pontos considerados profundos e em material compacto da fundação rochosa. Essa é uma forma usual de substituir pêndulos invertidos (de maior custo), pois os resultados obtidos são coerentes com o



esperado [PROMON, 1980].

Figura 17 – Croquis mostrando roseta extensométrica (EH-407, 408 e 409).



Figura 18 – Vista das “cabeças” dos extensômetros de hastes, com piezometrista efetuando leituras de deslocamento.

c) Limnígrafo: régua graduada instalada na posição vertical (à montante e/ ou à jusante da barragem) por meio da qual, faz-se o acompanhamento periódico das variações dos níveis d'água em um lago, rio, etc., conforme Figura 19.



Figura 19 – Vista mostrando limnígrafo instalado à montante da barragem da UHE Três Irmãos e abaixo (em “close”), o mesmo instrumento (Fonte: CESP).

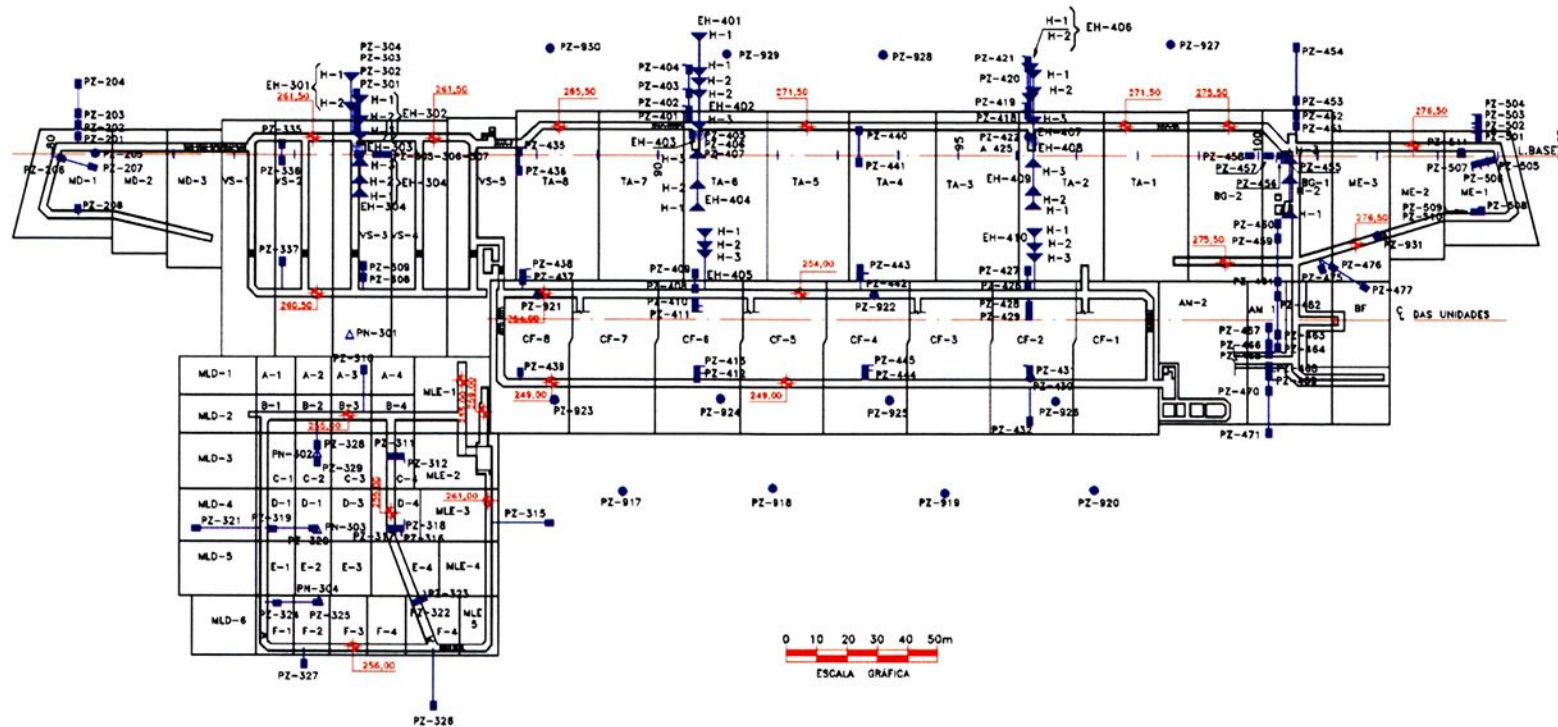


Figura 20 – Posicionamento de instrumentos de fundação ao longo das galerias de drenagem da UHE Três Irmãos.

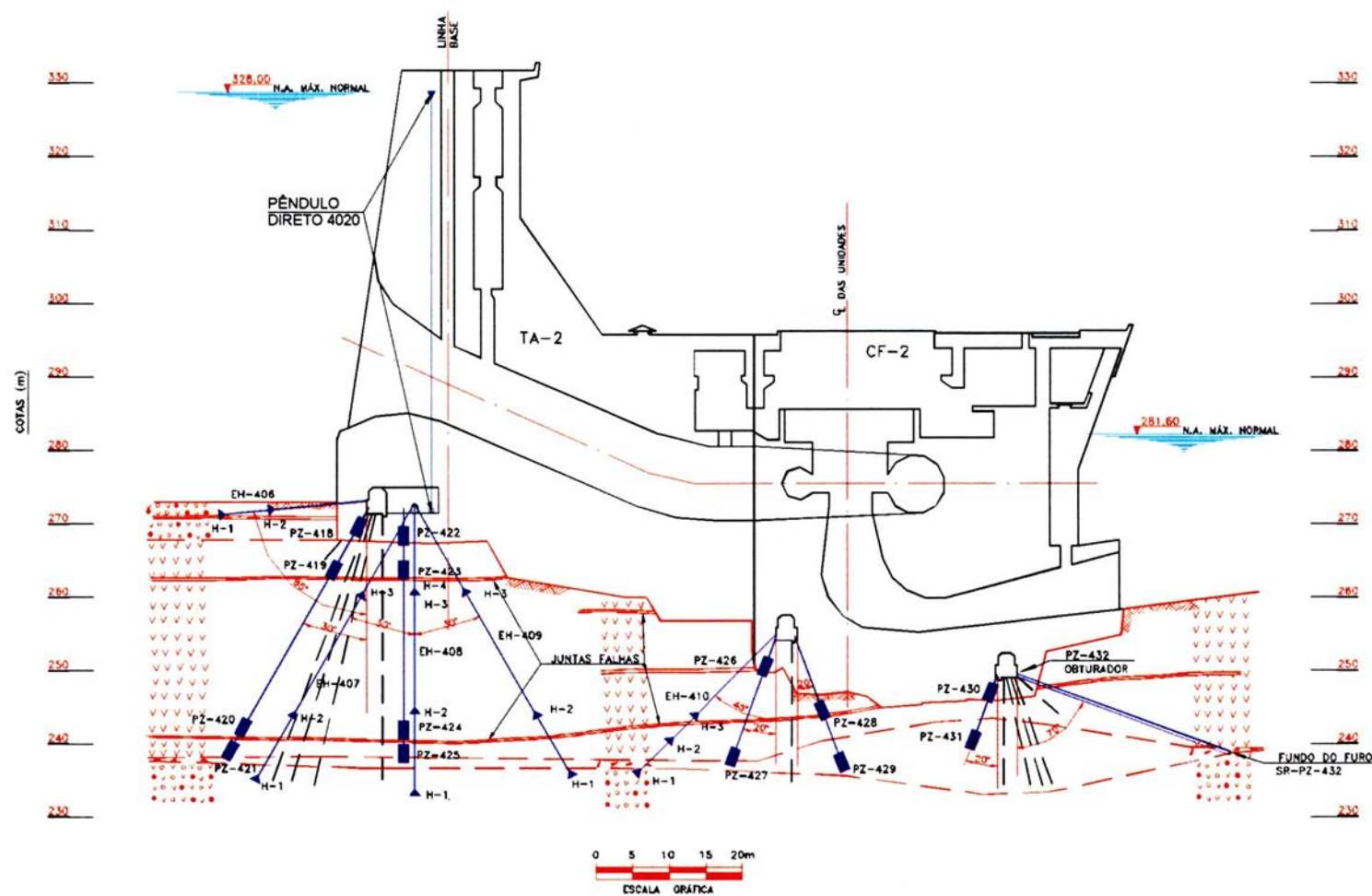


Figura 21 – Corte mostrando instrumentação de fundação de uma estrutura da UHE Três Irmãos.

CAPÍTULO 4

INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DE DESLOCAMENTOS

4.1 INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA

Os primeiros estudos de interpretação quantitativa em barragens foram desenvolvidos no LNEC - Lisboa, na década de 1950, e, de lá para cá, muitos trabalhos foram publicados sobre esse assunto. Em especial, com relação a este estudo de caso, cita-se como material de pesquisa abordado, as obras de Gomes [1981], Ramos [1985], Ramos [1987], Ramos [1999] e Oliveira [2000], dos quais obteve-se parte do embasamento teórico necessário. As diretrizes principais para o desenvolvimento do estudo foram fornecidas pelo orientador do mestrado.

Nos modelos de interpretação qualitativa, o processo se aplica pela comparação de valores limites; calculados com valores medidos. Caso não se tenha um método por meio do qual seja possível uma estimativa relativa às parcelas das ações que influenciam na variação de uma determinada grandeza em uma determinada estrutura, fica difícil uma análise mais criteriosa do evento em questão

Nos modelos de análise quantitativa o processo se aplica, considerando-se hipóteses de caráter geral e específico referentes à estrutura e às ações. Enquadram-se como genéricas as hipóteses de que a estrutura não deve sofrer modificações sensíveis durante o período em que é observada,



e a de que as ações predominantes são devidas ao nível hidrostático, às variações de temperatura e ao envelhecimento do concreto. Como hipóteses de caráter específico enquadram-se a necessidade de decomposição e posterior superposição de efeitos. Tais métodos consistem em descrever as relações entre as parcelas dos efeitos estruturais observados e as principais solicitações atuantes nas estruturas de barragens, recorrendo a modelos de comportamento representados por expressões analíticas paramétricas.

Como citado, por meio da análise quantitativa de deslocamentos pode-se obter não só valores de cada efeito no valor total de deslocamento medido, como também uma avaliação de limites práticos com base nos históricos dos instrumentos de interesse, de modo que possa haver uma comparação constante entre valores calculados (adaptados à prática) e valores lidos. A figura 22 mostra uma barragem em arco, na qual foi aplicada a metodologia de análise quantitativa.

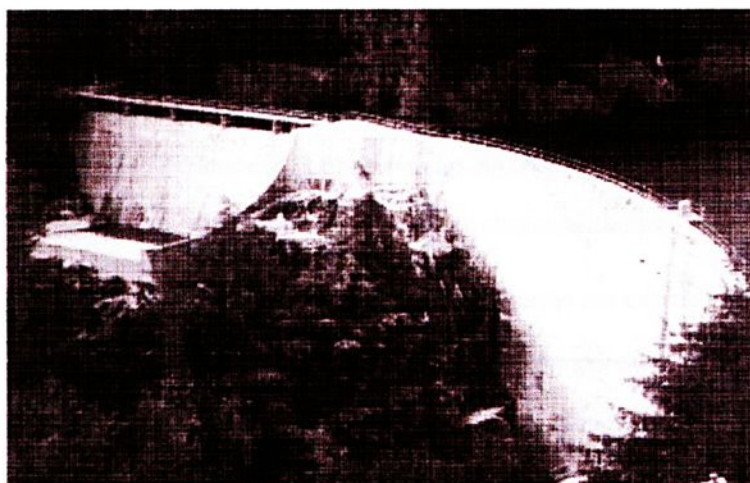


Figura 22 – Barragem do Alto Ceira, em Portugal (Fonte: LNEC)

4.2 EFEITO DA CARGA HIDROSTÁTICA

A pressão hidrostática exercida pelo carregamento do lago no paramento de montante de uma barragem é responsável pelo item mais importante quanto à estabilidade da estrutura: o efeito hidrostático. Variável em função do nível do lago, atua no corpo da barragem, provocando deslocamentos de intensidade variável. A figura 23 apresenta um bloco de barragem de gravidade, sob a ação do carregamento hidrostático de montante, sofrendo com isso um deslocamento para jusante e também uma deformação na fundação rochosa (as linhas tracejadas simulam o deslocamento e a deformação).

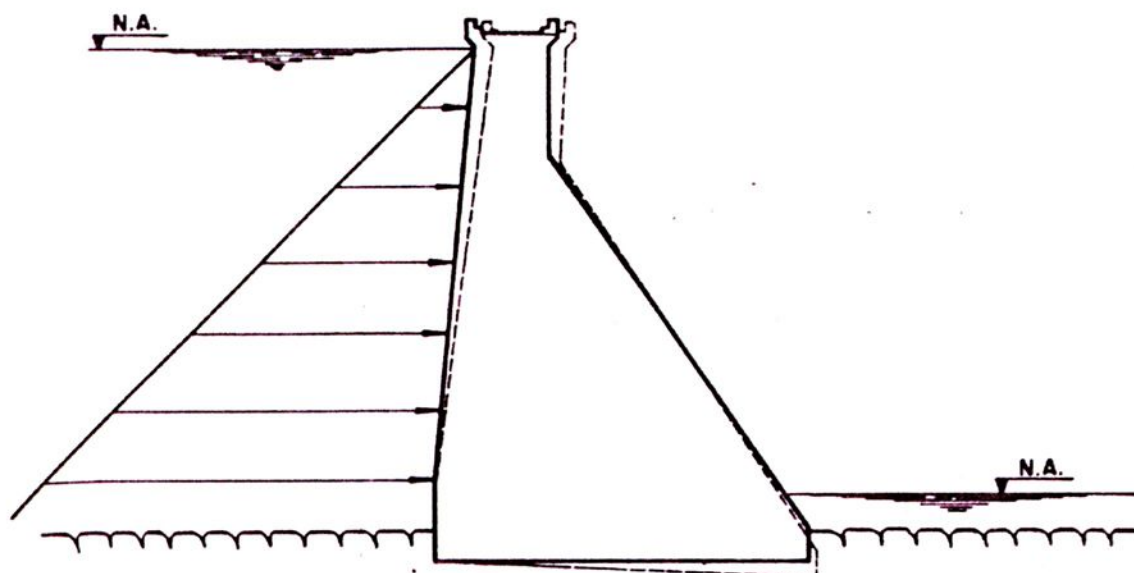


Figura 23 – Deslocamento de um bloco sob carga hidrostática.

4.3 EFEITO DA TEMPERATURA

A variação de temperatura, causada pelas ondas térmicas anuais, provoca deformações em estruturas que, devido à forma e volume das barragens de concreto, são bastante significativas. Barragens de concreto tipo gravidade, objeto deste estudo de caso, apresentam uma deformação sensível para jusante nos meses mais frios do ano (contração) e situação inversa nos meses mais quentes do ano. A figura 24 apresenta um bloco de barragem de gravidade, sob a ação da variação de onda térmica anual. Nesse caso, a linha tracejada mostra que o bloco está exposto a temperaturas típicas de verão, quando o concreto dessas estruturas sofre dilatações contrárias ao sentido do carregamento hidrostático.

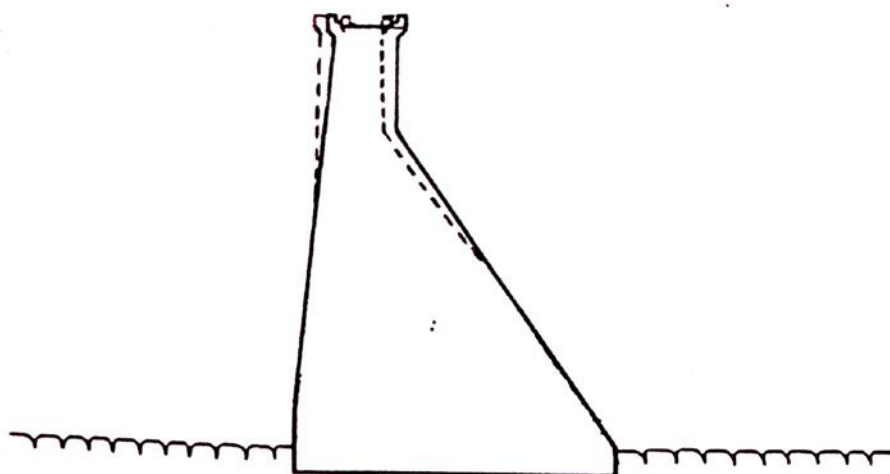


Figura 24 – Deslocamento de bloco de concreto sob ação da temperatura.

Com relação à temperatura d'água do lago nas diversas profundidades junto ao paramento de montante e também ao gradiente térmico no interior do maciço de concreto, normalmente devido ao longo tempo de recorrência de análise, não influenciam na obtenção da função de efeito térmico de deslocamento.

4.4 EFEITO DOS “FATORES DEPENDENTES DO TEMPO”

O envelhecimento de uma barragem por questões de deterioração, aliado ao fato de estar submetida a carregamentos hidrostáticos e aos ciclos anuais de ondas térmicas, de forma constante, provoca no concreto uma perda de plasticidade e um conseqüente aumento de deformações plásticas (acréscimo de deformação residual) que, findo um determinado período de anos, tende a se estabilizar. A figura 25 apresenta um bloco de barragem de gravidade sob carregamento constante (carga hidrostática de montante), ao longo do tempo, e sua deformação simulada. A explicação é que o concreto dessas estruturas tem um comportamento predominantemente elástico, porém, com o tempo, passa a apresentar uma certa plasticidade representada no desenho pela linha tracejada.

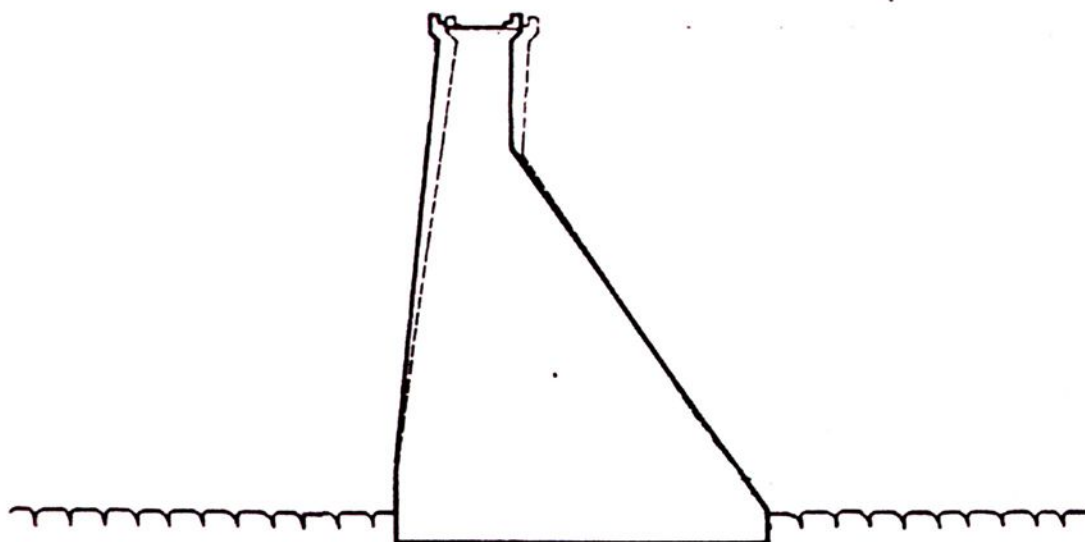


Figura 25 – Deslocamento de bloco de concreto sob ação de fatores “dependentes do tempo”.

4.5 EQUAÇÃO DE DESLOCAMENTO TOTAL

Na interpretação quantitativa de deslocamentos, os principais efeitos estruturais atuantes na estrutura podem ser representados por meio de duas parcelas características:

a) parcelas elásticas (e), reversíveis e instantâneas, relativas aos efeitos das variações da carga hidrostática e da temperatura ambiente, em que se admite seu estudo em separado;

b) parcelas não elásticas (p), irreversíveis e variáveis com o tempo, referentes aos efeitos da fluência e correspondentes à exploração normal do empreendimento.

Como citado anteriormente, os deslocamentos de uma barragem, relativos a essas parcelas, podem ser, teoricamente, decompostos num somatório expresso pela equação:

$$UT_i(h, \theta, t) = U_{eh,i}(h,t) + U_{e\theta,i}(\theta) + U_{ph,i}(h, t) \quad (1)$$

onde:

$$U_{eh,i} = \sum a_i f_i(h) \quad (2)$$

A equação (2) representa deslocamentos em função da variação do nível d'água do lago. Polinômios de terceiro grau têm se mostrado suficientes para expressar a influência da carga hidrostática em barragens de gravidade.

$$U_{e\theta,i} = \sum b_i g_i(\theta) \quad (3)$$

A equação (3) representa deslocamentos em função da variação da temperatura ambiente. Nesses casos, funções senoidais tem se mostrado

suficiente para representar a sazonalidade das ondas térmicas ao longo do ano, em uma barragem de gravidade.

$$U_{ph,i} = \sum c_i p_i(t) \quad (4)$$

A equação (4) representa deslocamentos em função de ações decorrentes do tempo. O uso de uma função de termos exponenciais e logarítmicos tem se mostrado suficiente para representar os efeitos decorrentes do tempo, em uma barragem de gravidade.

Resumindo: U_{Ti} representa o deslocamento total no ponto instrumentado “i” e, $U_{eh,i}$, $U_{e\theta,i}$ e $U_{ph,i}$, são respectivamente, o efeito da pressão hidrostática, o efeito da temperatura ambiente e o efeito dos “fatores dependentes do tempo”; f_i , g_i e p_i são respectivamente, funções do nível d’água, temperatura e tempo, a_i , b_i e c_i os correspondentes coeficientes do modelo.

A análise em questão tem por base duas épocas distintas: uma durante o primeiro enchimento do reservatório e outra num intervalo prolongado de tempo, de tal forma que as observações aconteçam num período suficientemente longo, em geral não inferior a cinco anos do início do primeiro enchimento. Esse procedimento é necessário para que no período das observações em estudo já não ocorram modificações sensíveis nas propriedades estruturais, a não ser as decorrentes da evolução normal do processo reológico.

A identificação dos parâmetros da equação (1) é feita por um processo iterativo, sendo necessário, para além das condições habitualmente exigidas em interpretações quantitativas ditas elásticas, o conhecimento das

respostas da estrutura para variações do nível desde a cota mínima, da possibilidade de separação dos efeitos induzidos na superestrutura pela deformabilidade da fundação e da reologia do concreto da barragem.

4.6 USO INTEGRADO DE MODELO NUMÉRICO E DE ANÁLISE QUANTITATIVA

Neste estudo de caso adotou-se um modelo misto que utiliza o modelo determinístico para obter um dos componentes e o modelo estatístico para estimar os demais. Foi utilizado o programa ADINA - Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis [ADINA,1997] para analisar o modelo do conjunto TA2/CF2, discretizado por elementos finitos e de modo determinístico, obteve-se matematicamente os coeficientes da função representativa dos deslocamentos devidos à variação do nível d'água do reservatório.

4.7 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O método dos mínimos quadrados, utilizado por Gauss no século XIX e de vasta aplicação pela sua praticidade, consiste em se fixar a condição de mínima diferença “ e ” entre os valores de grandezas observadas u^* , e as calculadas em função de parâmetros $u(p)$. Segundo EYKHOFF [1974], esse método não requer nenhum conhecimento prévio. Fazendo:

$$e = u^* - u(p) \quad (5)$$

Para evitar que essa função assuma valores negativos, a mesma deve ser elevada à segunda potência, razão da denominação “mínimos quadrados”.



A técnica de minimização a adotar consiste em definir, por iteração, o conjunto de parâmetros "**p**" do modelo que minimiza a função objetivo "**J**", suposta contínua e derivável.

Com isso, a função objetivo a minimizar fica sendo:

$$\mathbf{J} = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = [\mathbf{u}^* - \mathbf{u}(\mathbf{p})]^T [\mathbf{u}^* - \mathbf{u}(\mathbf{p})] \quad (6)$$

Numericamente, desde que haja mais de uma solução ao problema, podem existir várias combinações de parâmetros que conduzam a condições satisfatórias. Cabem aí, análises no sentido de busca por um conjunto que leve a um menor índice de dispersão.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

5.1 ASPECTOS GERAIS

Apresentam-se, neste capítulo, comentários e resultados sobre os estudos realizados na aplicação do método de interpretação quantitativa de deslocamentos na tomada d'água (TA)/ casa de força (CF) da UHE Três Irmãos e na aplicação numérica de elementos finitos que definiu a função relativa de deslocamentos ao efeito hidrostático.

Neste estudo não serão considerados deslocamentos nem situação de flutuação, em relação à influência de subpressões no contato barragem de concreto / fundação rochosa, devido ao problema ter sido estudado em detalhes por meio de análises tridimensionais de percolação [LIBBY, 1983]. Neste estudo, os dados já conhecidos nas cortinas de injeção da TA/CF, mostraram que mesmo com a obstrução de 75% dos drenos, o diagrama de subpressão teórico situar-se-ia abaixo do estabelecido. Com o objetivo, dentre outros, de confirmar os estudos acima, foram realizados estudos hidrogeotécnicos na região das estruturas de concreto [PROMON, 1986], em que se previu que as subpressões a se instalar sob a TA/CF, deverão situar-se em níveis sensivelmente inferiores aos previstos nos Critérios de Projeto [PROMON, 1978].



5.2 UTILIZAÇÃO INTEGRADA DE ANÁLISE QUANTITATIVA E DE MODELO NUMÉRICO

Segundo Ramos [1999], “A utilização integrada das duas formas de análise potencia as suas capacidades específicas, ao considerar em simultâneo os resultados da observação com recurso a técnicas que deles fazem uso direto e global, sem, no entanto, recorrerem às leis da mecânica, com resultados de modelos numéricos que se baseiam nessas leis.”

A aplicação do estudo numérico teve como objetivo a obtenção de uma função, baseada no modelo determinístico, representativa dos deslocamentos horizontais da estrutura, devidos ao carregamento hidrostático. Com o auxílio do programa ADINA, software de elementos finitos, foi analisado o modelo do conjunto tomada d'água/casa de força nº 2 - TA2/CF2. O modelo de malha de elementos finitos adotado foi aproveitado de um desenvolvimento anterior, constante do relatório Promon [1989], elaborado durante a fase de projeto. A discretização da malha em elementos finitos possui 608 pontos nodais e 619 elementos (quadrangulares, triangulares e elementos de junta), bidimensionais de formulação isoparamétrica.

Nesta análise, os deslocamentos calculados referem-se a um eixo considerado indeslocável, situado na fundação da estrutura. O objetivo é determinar, matematicamente, deslocamentos horizontais na estrutura de concreto, devidos à variação do carregamento hidrostático. O concreto da barragem foi suposto como um material contínuo, homogêneo e isotrópico, com comportamento linear caracterizado por um módulo de elasticidade $E_c=30$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu_c=0,22$. A fundação foi considerada de material



homogêneo, isotrópico e com comportamento elástico linear. Considerou-se os seguintes valores médios para o maciço de fundação: $E_f=10$ GPa e $\nu_f=0,22$.

As cotas de nível mínimo e de operação normal do lago (valores em relação ao nível do mar) adotadas foram, respectivamente, 280,00 m e 327,00 m.

As ligações exteriores da estrutura foram idealizadas como engastes rígidos do maciço da fundação com a camada ao fundo e nas faces posterior e anterior.

5.3 DESLOCAMENTOS CALCULADOS

5.3.1 DESLOCAMENTOS DEVIDO AO EFEITO

HIDROSTÁTICO

O estudo de deslocamentos desenvolvido no software ADINA, foi executado com variação nos níveis de água do reservatório, de modo que a partir de simulações de carregamentos hidrostáticos, fizesse-se a identificação dos coeficientes do polinômio da equação (7), a qual representa deslocamentos na barragem devido unicamente à pressão hidrostática. A equação com os parâmetros identificados consta do item 5.8, em que se apresentam as equações, uma vez finalizados os processos de minimização e iteração.

$$U_{h,i}^e = p_1 + p_2 h + p_3 h^2 + p_4 h^3 \quad (7)$$

5.3.2 DESLOCAMENTOS DEVIDO AO EFEITO

TEMPERATURA

Para representar os deslocamentos em função da variação da temperatura ambiente ao longo do tempo, foi adotada, com base nos experimentos existentes, uma equação senoidal e para este caso específico, foi adotada a equação a seguir:

$$U_{\theta,i}^e = p_5 \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + c\right) \quad (8)$$

onde: $t = n^\circ$ de dias transcorridos a partir do enchimento e

$c =$ constante adotada para adequação sazonal da curva senoidal.

5.3.3 DESLOCAMENTOS DEVIDO AO EFEITO “TEMPO”

A função a seguir, adotada para fornecer os deslocamentos em questão, tem um perfil polinomial e logarítmico devido às características do concreto, o qual, quando sob carga constante e por um período longo de tempo, passa por um período de acomodação, em que deixa a fase elástica e passa para a plástica, porém, estabilizando-se em termos de deformação, após um período de alguns anos.

$$U_{h,i}^p = p_6 t^3 + p_7 t^2 + p_8 \ln(t+1) \quad (9)$$

5.4 EQUAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS TOTAIS

A equação a seguir, resulta da composição das três anteriores, proporcionando deslocamentos totais calculados:

$$U_j^T(h, \theta, t) = U_{h,j}^e + U_{\theta,j}^e + U_{t,j}^p \quad (1)$$

$$U_j^T(h, \theta, t) = p_1 + p_2 h + p_3 h^2 + p_4 h^3 + p_5 \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + c\right) + p_6 t^3 + p_7 t^2 + p_8 \ln(t+1) \quad (10)$$

5.5 DESLOCAMENTOS MEDIDOS

O período escolhido para suprir este estudo de caso, compreendeu de agosto de 1990, quando teve início o processo de enchimento do lago até novembro de 2000, situação em que se presume como estabilizada tanto a fundação rochosa como a influência dos fatores decorrentes do tempo nas propriedades reológicas do concreto da barragem, nos deslocamentos horizontais na direção montante jusante,

O pêndulo direto PD-4020 foi o instrumento escolhido para a comparação de deslocamentos medidos com os deslocamentos calculados pelo método de análise quantitativa. Os deslocamentos teóricos são calculados em referência a um eixo considerado indeslocável na fundação rochosa (item 5.2). Como o pêndulo direto PD-4020 foi projetado para fornecer leituras relativas entre dois pontos da estrutura (crista e galeria de drenagem), há a necessidade de atrelar os deslocamentos do pêndulo direto a um eixo teoricamente indeslocável, para que haja realmente, uma correlação entre

deslocamentos medidos e deslocamentos calculados. Nessa linha de trabalho, como os EH-407, 408 e 409 tem hastes fixadas em pontos profundos da fundação considerados teoricamente indeslocáveis, as leituras de interesse destes extensômetros foram somadas às do pêndulo direto PD-4020, obtendo-se assim, leituras que englobam as componentes horizontais de deslocamentos relativos a pontos profundos da fundação e à estrutura de concreto, ou seja, tem-se deslocamentos medidos absolutos [Bernardes, 2000].

Foram computados, para efeito de análise pelo método dos mínimos quadrados, todos os dados de interesse desde o início do enchimento, com seus correspondentes níveis d'água, nas respectivas datas, durante o período de 3766 dias.

5.6 RETROANÁLISE

Os primeiros desenvolvimentos da retroanálise datam do final do século XVIII. Nesse período, ocorreu o aprofundamento nos estudos sobre minimização de funções e estatística, com a criação da Escola Politécnica e da Escola Normal de Paris, em 1795 [Bernardes, 2000].

Gauss e Chebyshev possibilitaram a sistematização dos métodos dos mínimos quadrados, Marko e máxima verossimilhança no século XIX [Bernardes, 2000].

Unificando os métodos estatísticos e as técnicas de minimização de funções, a teoria da retroanálise foi compilada nos anos 70, nos trabalhos de Graupe, Akaide e Eykhoff [Bernardes, 2000].



Neste estudo, o processo de retroanálise foi aplicado utilizando-se a forma direta de abordagem, ou seja, a ordem de identificação dos parâmetros segue a mesma utilizada para os procedimentos de análise de estruturas. As análises são repetidas iterativamente, sendo alterados repetidamente os valores dos parâmetros até chegar a um conjunto, tal que as diferenças entre deslocamentos medidos e deslocamentos calculados sejam relativamente mínimas. As figuras 26 e 27 apresentam os diagramas relativos à ordem de processamento de abordagem de análise direta.

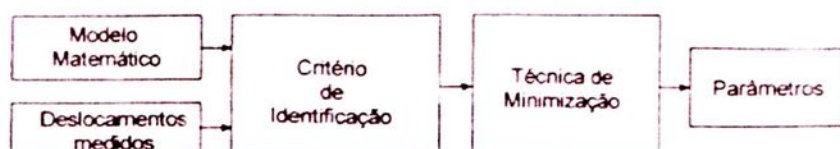


Figura 26 – Retroanálise: abordagem direta.

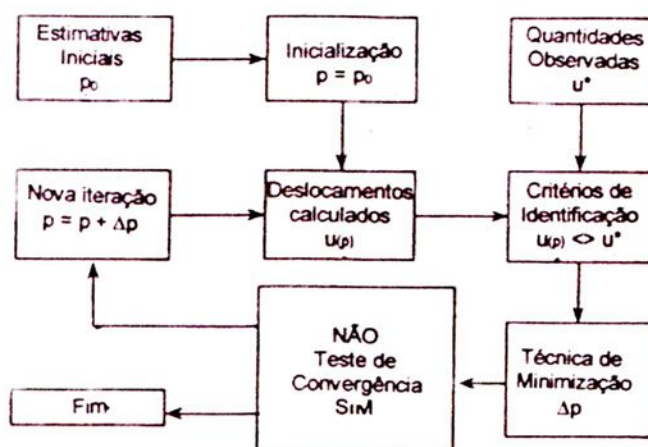


Figura 27 – Retroanálise: abordagem direta (detalhada).

O objetivo de aplicação do processo de minimização neste estudo de caso, é obter os valores para os parâmetros p_5 , p_6 , p_7 e p_8 , das equações (8) e (9), que atendam a condição de uma equação de deslocamento total próxima ao gráfico da curva teórica dos deslocamentos medidos.

O processo de retroanálise por abordagem direta, fazendo uso do método dos mínimos quadrados, foi aplicado com a utilização de planilhas do programa Microsoft Excel, devido à facilidade do mesmo em se programar o tratamento a um grande número de dados. Em média, foram utilizadas da ordem de 3766 linhas e 40 colunas, com arquivo de dados da instrumentação e processamento dos cálculos e gráficos.

5.7 PROCESSO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

A seguir, a dedução do método dos mínimos quadrados, utilizada para esse caso matricial, partindo-se da condição de busca da mínima diferença entre valor medido e valor calculado. Em continuidade ao citado no item 4.7 (p. 48), temos:

u^* = deslocamento medido;

$u(p)$ = deslocamento calculado em função dos parâmetros “p”;

u = deslocamento na iteração atual;

u' = deslocamento na iteração anterior;

u_h = deslocamento hidrostático;



u_0 = deslocamento devido temperatura;

u_t = deslocamento devido a efeitos do tempo;

p = parâmetro na iteração atual;

p' = parâmetro na iteração anterior;

$\bar{p}$ = parâmetros que minimizam as diferenças, eventualmente a ser utilizado na iteração posterior.

Δd = diferença entre deslocamento medido e deslocamento calculado;

Onde: $\Delta d = u^* - u(p)$

(11)

$$A = \text{matriz de sensibilidade} = \frac{\partial u}{\partial p} \longrightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial p} \right) \longrightarrow \text{função linear} \quad (12)$$

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta p} = \frac{u - u'}{p - p'} \longrightarrow (p - p') A = \Delta u \longrightarrow u = A (p - p') + u' \quad (13)$$

Q = matriz de diferenças quadradas;

$$Q = [u^* - u(p)]^T [u^* - u(p)]$$

$$Q = [u^* - (u' + A(p - p'))]^T [u^* - (u' + A(p - p'))]$$

$$Q = [(u^* - u' + Ap') - (Ap)]^T [(u^* - u' + Ap') - (Ap)]$$

$$Q = [u^* - u' + Ap']^T [u^* - u' + Ap'] + [Ap]^T [Ap] - [u^* - u' + Ap']^T [u^* - u' + Ap']^T [Ap]$$

$$[Ap]^T [u^* - u' + Ap']$$

Igualando a zero a derivada primeira em relação a “p” e igualando a função a zero, tem-se um caso de mínima diferença e “p” nesse caso passa a ser $\bar{p}$ = parâmetros que minimizam as diferenças (deltas).

$$\frac{dQ}{dp} = 0 = 0 + [A]^T [Ap] - 0 - [A]^T [u^* - u' + Ap'] \longrightarrow [A]^T [A] \bar{p} = [A]^T [u^* - u' + Ap']$$

$$\bar{p} = \{ [A]^T [A] \}^{-1} [A]^T [u^* - u' + Ap'] \quad (14)$$

Somando $(Ap - Ap)$ à parcela: $[u^* - u' + Ap']$, tem-se: $[u^* - (u' - Ap') + (Ap - Ap)]$;

Portanto $[u^* - u' + Ap'] = u^* - [u' + A(p-p') - Ap]$

Lembrando de (11) e (13) onde:

$\Delta d = u^* - u(p)$ e $u = A(p-p') + u'$

$$\text{tem-se: } \longrightarrow u^* - [u' + A(p-p') - Ap] = u^* - u + Ap = \Delta d + Ap \quad (15)$$

Retornando a (14) e substituindo:

$$\bar{p} = \{ [A]^T [A] \}^{-1} [A]^T [Ap + \Delta d] \text{ e chamando } G = [A]^T [A] \}^{-1} [A]^T$$

$$\text{tem-se: } \bar{p} = G \Delta d + [A]^T [A] \}^{-1} [A]^T Ap = G \Delta d + [I]p \quad (16)$$

onde: $[I]$ é uma matriz identidade;

daí: $\bar{p} = G \Delta d + p \longrightarrow \bar{p} - p = G \Delta d$ e portanto:

$$\overline{\Delta_p} = G \Delta d = \{[A]^T[A]\}^{-1} [A]^T \Delta d \quad (17)$$

Retornando à matriz de sensibilidade (12), temos:

$$A = \frac{\partial u}{\partial p} = \frac{\partial(u_h + u_\theta + u_t)}{\partial p} = \frac{\partial u_h}{\partial p} + \frac{\partial u_\theta}{\partial p} + \frac{\partial u_t}{\partial p} \quad (18)$$

onde, como já visto:

$$u_h = p_1 h^0 + p_2 h + p_3 h^2 + p_4 h^3$$

$$u_\theta = p_5 \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + c\right)$$

$$u_t = p_6 t^3 + p_7 t^2 + p_8 \ln(t+1)$$

Colocando em forma de matriz:

$$A = \left[\frac{\partial u}{\partial p_1} \frac{\partial u}{\partial p_2} \frac{\partial u}{\partial p_3} \frac{\partial u}{\partial p_4} \frac{\partial u}{\partial p_5} \frac{\partial u}{\partial p_6} \frac{\partial u}{\partial p_7} \frac{\partial u}{\partial p_8} \right] \quad (19)$$

Descrevendo o processo, temos valores p_n de uma estimativa inicial, os quais proporcionam um primeiro deslocamento calculado. Da diferença entre deslocamentos medidos e calculados, tem-se “ Δd ” e daí a matriz de sensibilidade, levando ao cálculo de “ G ” e daí, aos novos parâmetros “ p ” e por iteração, vai-se acurando os resultados dos “ p ”, se bem que pode ocorrer o contrário, ou seja, os valores influírem nos deslocamentos em sentido inverso, casos em que se aplicam outras rotas de tentativas.

5.8 EQUAÇÕES DE DESLOCAMENTOS OBTIDAS

Com os parâmetros relativos à equação (5) identificados de forma analítica por meio do programa de elementos finitos ADINA, chega-se a uma primeira forma da equação de deslocamento total. Com a aplicação de retroanálise por tentativas via método dos mínimos quadrados, tendo por base as mínimas diferenças entre deslocamentos medidos por intermédio da instrumentação (denominados valores totais de deslocamentos horizontais medidos) e deslocamentos calculados (valores em função de "t" e "h"), determinam-se os parâmetros "p" das equações (8) e (9).

Identificados os parâmetros "p", as equações de deslocamentos ficam sendo:

$$U_{h,j}^o = 0,0006 - 0,0003.h + 0,00011h^2 + 0,000015h^3 \quad (20)$$

$$U_{\theta,j}^o = \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{365} + 14,5\right) \quad (21)$$

$$U_{t,j}^p = -0,00000000006t^3 + 0,00000033t^2 + 0,015\ln(t+1) \quad (22)$$

Somando-se essas equações, que nada mais são do que as parcelas representativas dos deslocamentos devidos ao efeito hidrostáticos, ao efeito da onda térmica anual e ao efeito dos fatores dependentes do tempo, obtém-se a equação do deslocamento total, em relação a cada deslocamento medido, conforme equação a seguir:

$$U_i^T(h, \theta, t) = 0,00006 - 0,0003.h + 0,00011.h^2 + 0,000015h^3 + \text{sen}\left[\frac{2\pi.t}{365} + 14,5\right] - 0,00000000006.t^3 + 0,00000033.t^2 + 0,015\ln(t+1) \quad (23)$$

Por conseguinte, em determinado instante "t" e respectivo "h", determinado em função do nível do lago (diferença entre tal cota de nível e a cota inicial),

fazendo o confronto entre os deslocamentos calculados na equação (23) e o valor do deslocamentos medidos (soma das leituras horizontais montante-jusante do pêndulo direto PD – 4020 e da roseta extensométrica composta pelos EH – 407, 408 e 409), obtém-se um quadro de informações quantitativas que proporciona uma avaliação do estado atual da estrutura, bem como uma visão estimativa sobre seu comportamento futuro.

5.9 COMENTÁRIOS SOBRE OS VALORES OBTIDOS

Quando do término da obra, antes do enchimento, a empresa responsável pelo projeto desenvolveu uma análise do comportamento das estruturas dos conjuntos vertedouro – bacia de dissipação e tomada d'água – casa de força, a partir de modelos matemáticos, aplicando como ferramenta de cálculo o método dos elementos finitos. Neste estudo, analisando a influência da atuação do peso próprio da estrutura e do empuxo hidrostático, foram simuladas situações para vários níveis de operação do reservatório e de alterações na fundação rochosa. Desta análise, resultaram valores de deslocamentos publicados no documento “Relatório de análise do comportamento das estruturas do VS/BD e da TA/CF a partir de modelos matemáticos (MEF)” [PROMON, 1989].

Comparando os valores de deslocamentos horizontais (sentido montante/jusante) obtidos neste estudo de interpretação quantitativa de



deslocamentos, com os definidos numericamente pela projetista, conforme tabela 1, observou-se que:

Tabela 1 - Análise: deslocamentos (retroanálise) e deslocamentos (projeto).

Deslocamentos calculados por retroanálise (mm)	Deslocamentos limites (mm)
▪ Devido efeito hidrostático: 1,91 (valor médio: 1,73)	▪ Devido efeito hidrostático: 1,94
▪ Devido efeito temperatura: (amplitude) 2,00	▪ Devido efeito temperatura: (amplitude) 2,61
▪ Devido efeito “tempo”: 1,60	▪ Devido efeito “fluência”: 2,82
Deslocamento total (máximo): 4,51 mm	Limite total calculado: 6,06 mm

- O valor máximo de deslocamento calculado, devido ao carregamento hidrostático e obtido a partir de simulação no programa computacional ADINA conjuntamente com o processo de retroanálise dos deslocamentos medidos, foi de 1,91 mm (valor médio: 1,73 mm), enquanto que o limite aceitável para a condição de fundação rochosa deformável e sem trinca à montante, definido numericamente no estudo da projetista, foi da ordem de 1,94 mm.
- O valor médio de deslocamento calculado, devido à variação da onda térmica anual no processo de retroanálise dos deslocamentos medidos, teve uma amplitude da ordem de 2,00 mm entre os meses de inverno e verão, enquanto que o limite aceitável, definido numericamente pela projetista, teve uma amplitude da ordem de 2,61 mm;

▪ O valor de deslocamento em função dos efeitos “decorrentes do tempo”, calculado no estudo de retroanálise dos deslocamentos medidos, e que, devido ao período de anos transcorrido desde o enchimento do lago, está em processo de estabilização, foi de 1,60 mm, enquanto a análise da projetista indicou um deslocamento máximo desejável da ordem de 2,82 mm no seu estudo de fluência.

Com base nessas análises, em que os valores obtidos pelo processo de interpretação quantitativa de deslocamentos revelaram-se inferiores aos limites aceitáveis do estudo da projetista, pode-se dizer que o conjunto tomada d'água e casa de força nº 2 da UHE Três Irmãos, tem apresentado até o momento, deslocamentos horizontais absolutos abaixo do limite estipulado como de risco para a estabilidade da estrutura.

Do ponto de vista prático, pode-se afirmar que, a aplicação do método de interpretação quantitativa neste estudo de caso, conduz a uma previsão da influência de cada um dos principais efeitos atuantes, empuxo hidrostático, onda térmica anual e fatores “dependentes do tempo”, tendo por base as equações (20), (21) e (22) e os seus respectivos gráficos, representados nas Figuras 33, 34 e 35 e, principalmente pelo gráfico da figura 36 que relaciona os deslocamentos totais medidos e calculados.

A seguir, estão inseridas figuras relativas aos desenhos e gráficos que complementam e orientam o leitor na compreensão dos estudos desenvolvidos neste capítulo.

A figura 28 apresenta uma planta geral das galerias de drenagem das estruturas de concreto da UHE Três Irmãos, mostrando em detalhe a

posição do pêndulo direto PD-4020 e dos extensômetros de hastes EH-407, 408 e 409, localizados na Tomada d'Água nº 2.

A figura 29 apresenta um corte típico do conjunto tomada d'água – casa de força, mostrando posicionamento do PD-4020 e dos EH-407, 408 e 409 (roseta extensométrica) em nicho da galeria de drenagem de montante (cota de piso: 271,50 m). Estes extensômetros estão posicionados de forma a fornecer dados sobre deslocamentos na fundação, devido à preocupação com as juntas falhas existentes. O EH-406, instalado quase na horizontal, também é um instrumento de interesse ao estudo, pois, suas hastes podem fornecer leituras de deslocamento em caso de alguma trinca de montante, facilitando a identificação dessa anomalia, se bem que difícil de ocorrer. Nota-se também, as linhas da cortina de injeção e de drenos na vertical, junto à canaleta da galeria de drenagem.

A figura 30 apresenta o gráfico relativo às variações no nível d'água de montante, no período de agosto de 1990 a novembro de 2000. Estes dados serviram para identificação dos parâmetros “p” no processo de retroanálise e são utilizados na identificação das parcelas relativas aos deslocamentos devido ao empuxo hidrostático e aos fatores dependentes do tempo.

A figura 31 apresenta o gráfico relativo às variações no nível d'água de jusante, no período de agosto de 1990 a novembro de 2000. Estes dados auxiliaram no processo de análise numérica para identificação da parcela de deslocamentos devido ao carregamento hidrostático.

A figura 32 apresenta a seção transversal da TA/CF nº2, discretizada segundo em uma malha de elementos finitos, a qual foi utilizada no programa computacional ADINA, para análise de deslocamentos na estrutura, devido às simulações de variação no carregamento hidrostático de montante.

A figura 33 apresenta o gráfico relativo aos deslocamentos devido ao carregamento hidrostático, no período de agosto de 1990 a novembro de 2000.

A figura 34 apresenta o gráfico relativo aos deslocamentos devido à onda térmica anual, no período de agosto de 1990 a novembro de 2000. Nota-se que a amplitude dos deslocamentos foi da ordem de 2,00 mm, alcançando valores máximos nos períodos frios e vice-versa no verão.

A figura 35 apresenta o gráfico relativo aos deslocamentos no período de agosto de 1990 a novembro de 2000, devidos a fatores relacionados diretamente ao carregamento hidrostático constante na face de montante da estrutura, fazendo com que parte dos deslocamentos elásticos do concreto passem por um processo de alteração, traduzindo-se por uma certa plasticidade. Ao analisar-se a curva desse gráfico, nota-se que a linha de deslocamentos está na faixa de 1,60 mm. Esta função, durante o enchimento do lago e nos primeiros anos é influenciada pela parcela polinomial, porém, após o 9º ano (nesse caso) passou a sofrer uma influência acentuada da parcela logarítmica, notando-se então, valores quase constantes de deslocamento.

A figura 36 apresenta o gráfico de deslocamentos totais absolutos, medidos e calculados. Da correlação dos pontos referentes às duas curvas, nota-se uma boa coerência, fato que mostra uma certa eficiência, embora o estudo deva passar por um refinamento matemático. Tal medida pode proporcionar uma adequação eficiente do processo de interpretação quantitativa, uma vez que o mesmo foi desenvolvido inicialmente para análise de barragens em arco e agora está sendo testado em barragens do tipo gravidade. Do estudo em questão, nota-se bem que tanto o gráfico de deslocamentos medidos como o de deslocamentos calculados, inicialmente tiveram um crescimento rápido, porém, já se constata uma tendência de estabilização de ambas as curvas, influenciadas pelos efeitos de plasticidade do concreto, ao longo do tempo.



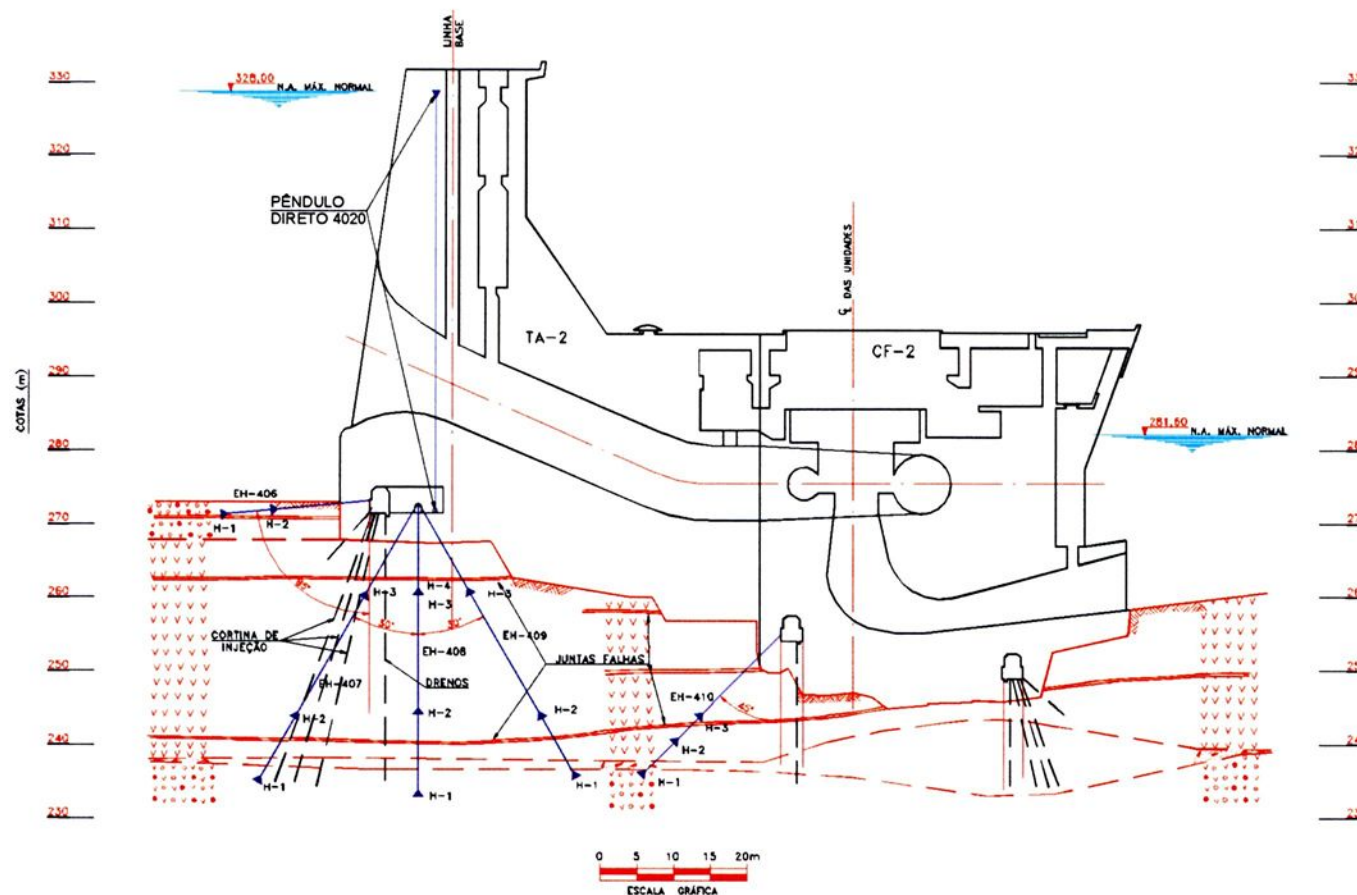


Figura 29 – Corte transversal de estrutura de concreto da UHE Três Irmãos,
mostrando posicionamento esquemático de instrumentos.

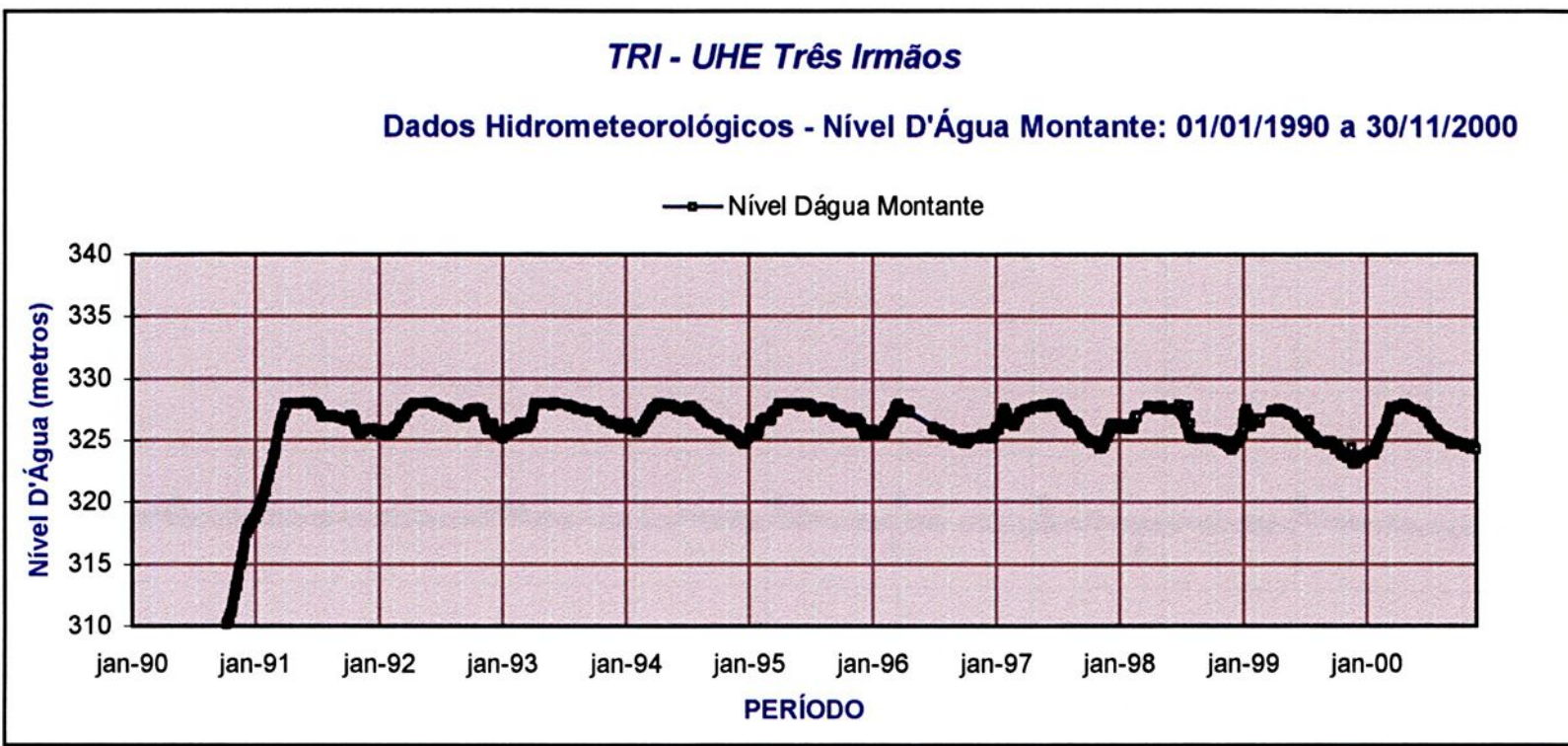


Figura 30 – Gráfico da variação do nível d'água de montante.

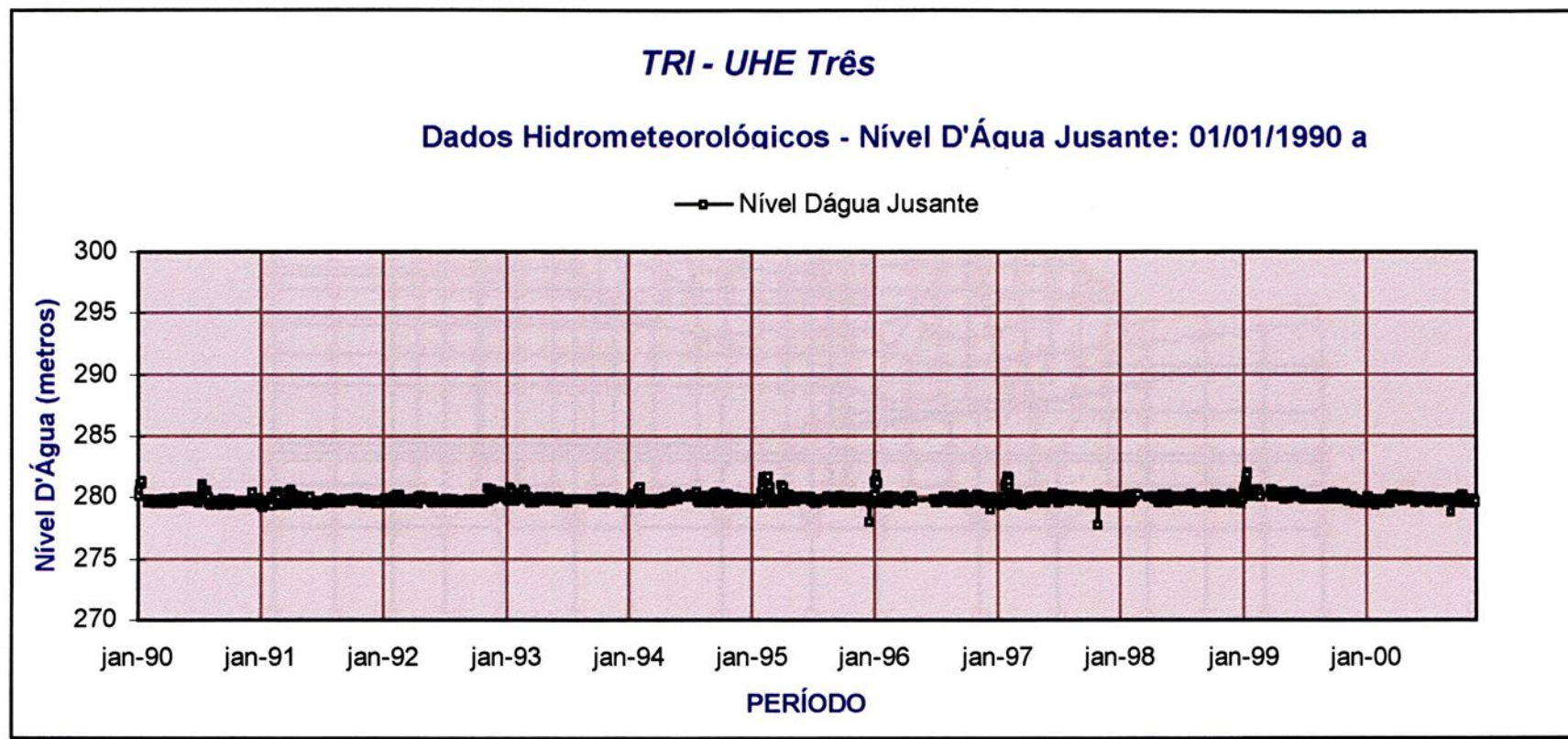


Figura 31 - Gráfico da variação do nível d'água de jusante

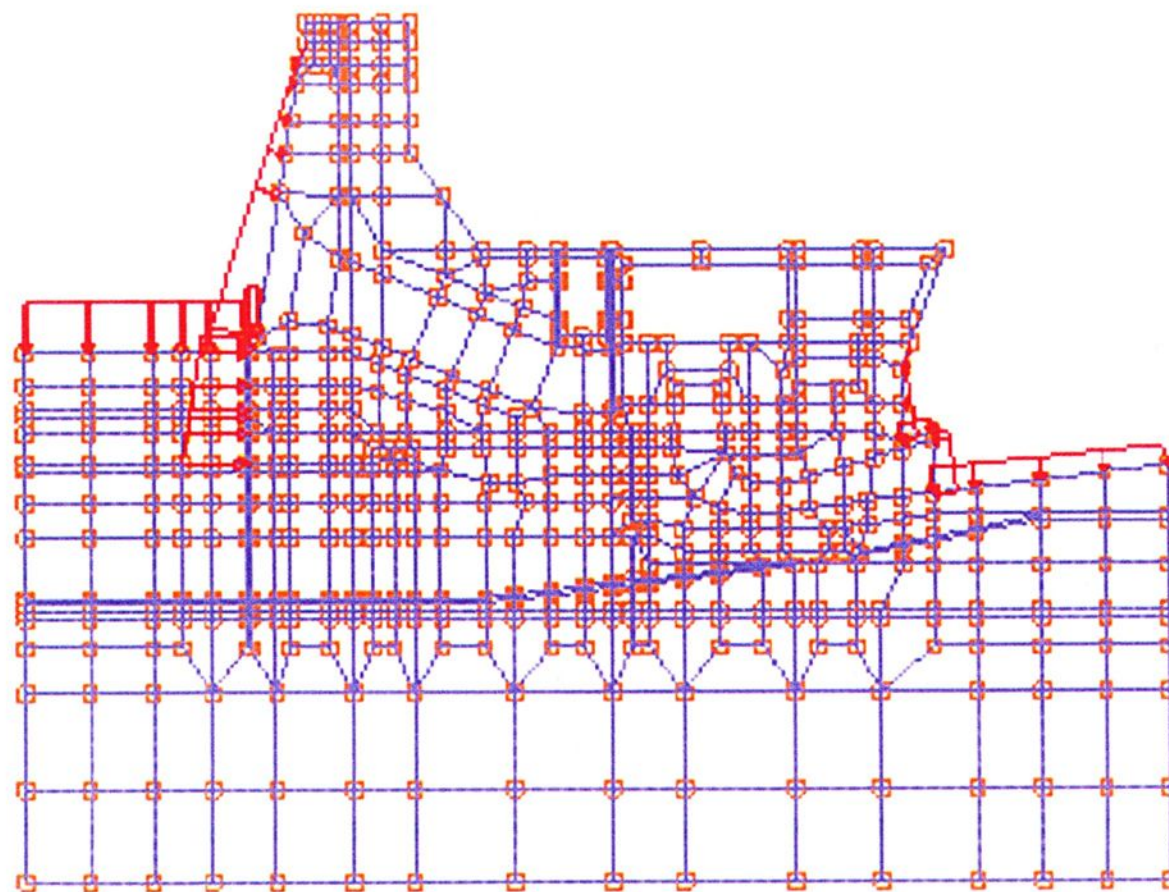


Figura 32 – Malha de Elementos Finitos – ADINA.

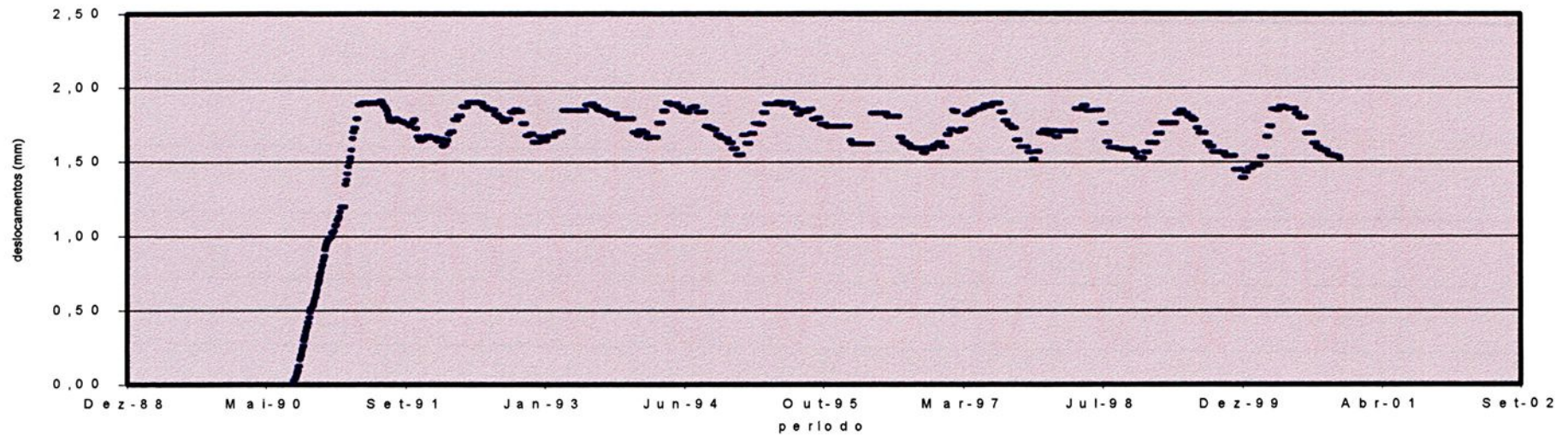


Figura 33 – Gráfico de deslocamentos em função do carregamento hidrostático.

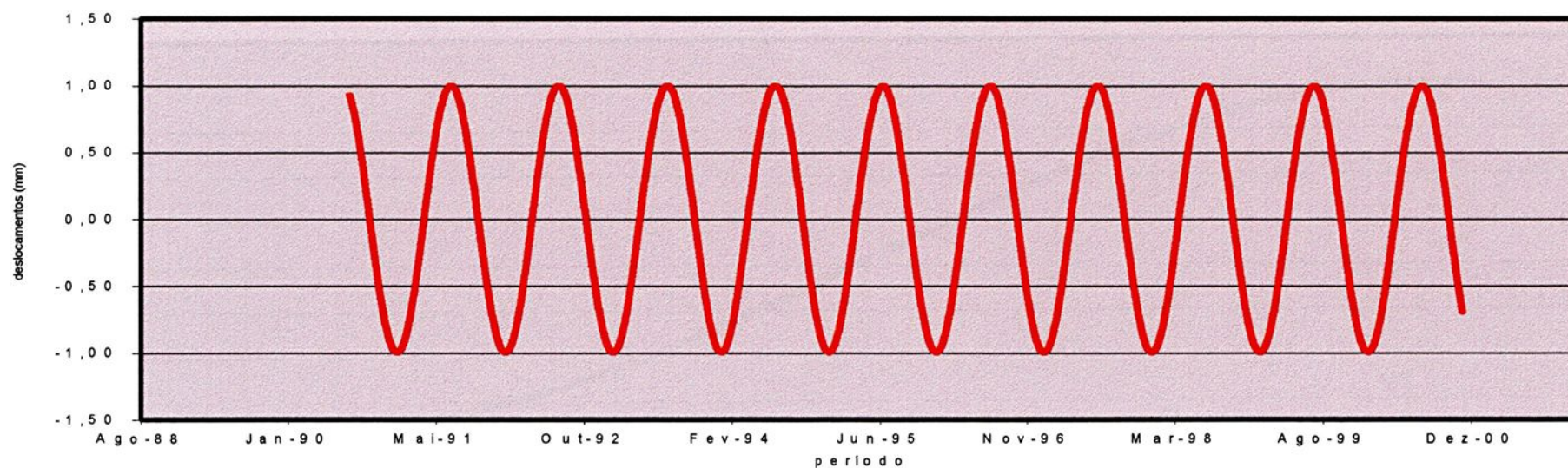


Figura 34 - Gráfico de deslocamentos em função da temperatura ambiente.

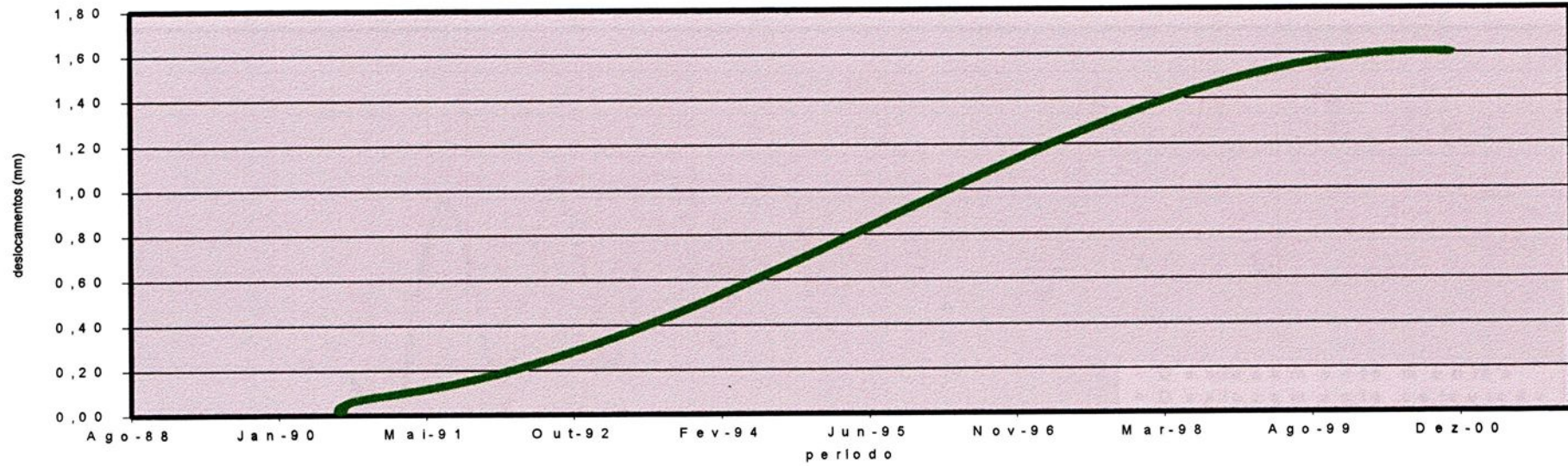


Figura 35 - Gráfico de deslocamentos em função dos efeitos do tempo.

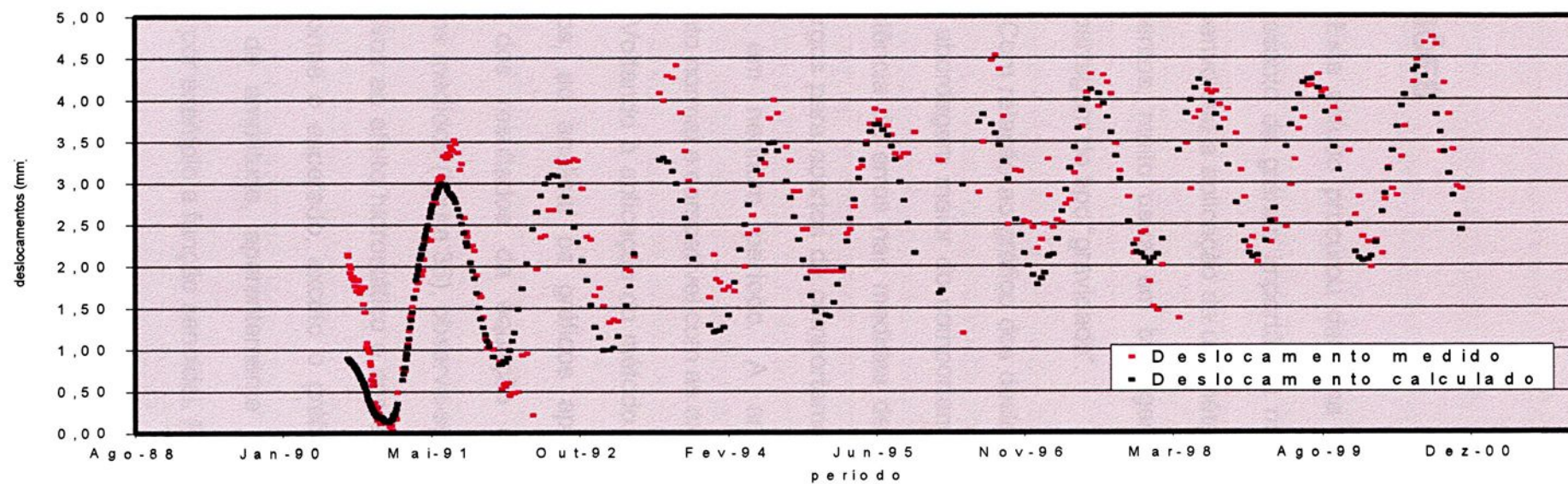


Figura 36 - Gráfico de deslocamentos totais: medidos e calculados.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este estudo procurou dar uma ênfase ao tema Segurança de Barragens, assunto de grande importância no contexto atual. Como objetivo principal, desenvolveu a aplicação de um método de interpretação quantitativa de deslocamentos, muito usual em barragens do tipo “em arco”, em uma estrutura de barragem do tipo “gravidade”.

Com relação ao gráfico dos deslocamentos medidos, este estudo não faz uma abordagem maior do comportamento da estrutura, e, apesar da possível existência de erros nas medidas de campo, neste trabalho não se efetuou expurgos para acertos de comportamentos anômalos nas leituras dos instrumentos em nenhum período. A análise dos dados indica um comportamento normal e compatível com as exigências de segurança da obra.

Voltando à aplicação do método de interpretação quantitativa de deslocamentos, ao analisar os gráficos apresentados no Capítulo 5, da comparação dos resultados da equação de deslocamento total e dos deslocamentos medidos (figura 36), observa-se uma correlação satisfatória. Os gráficos relativos ao efeito hidrostático e aos efeitos do tempo apresentam um traçado conforme o esperado, exceto o gráfico dos efeitos da temperatura, cujas ondas de amplitude, aparentemente podem ser melhor adaptadas, alterando-se, por exemplo a função senoidal. Porém, considerando o objetivo e o prazo disponível para o desenvolvimento de uma dissertação de mestrado, isso demandaria um tempo maior que o previsto.



Todavia, de uma visão geral, tais resultados demonstram que a aplicação do método de identificação quantitativa de resultados em barragens do tipo gravidade, possibilita a identificação dos deslocamentos relativos às parcelas dos principais efeitos atuantes: carregamento hidrostático, variação da temperatura ambiente e ação do tempo sobre as propriedades reológicas do material estrutural, a exemplo do que ocorre com as barragens tipo arco.

Considera-se, pois, que o modelo foi coerente para interpretar o comportamento de estruturas de gravidade, e sua utilização permite estimar comportamentos futuros.

Este estudo foi desenvolvido sem considerar a não-linearidade física nas análises por meio do método dos elementos finitos, sem fazer uso de funções de fluência específicas para o concreto aplicado na estrutura e sem um estudo minucioso de deslocamentos nas fundações, utilizando-se dados de estudos anteriores. Estima-se que ao abordar mais especificamente esses itens, e fazendo uso de métodos de análise de regressão mais eficientes que o método dos mínimos quadrados, possa se obter resultados mais próximos do real.

Finalizando, com base nos resultados obtidos, este estudo demonstrou que tais estudos de interpretação quantitativa de deslocamentos podem ser viáveis para outras obras, desde que se disponha de um projeto de instrumentação coerente tecnicamente, de uma instrumentação de boa qualidade, de um histórico de dados de auscultação confiável e de apoio computacional adequado.



7. REFERÊNCIAS

ADINA. **Automatic dynamic incremental nonlinear analysis primer.**

Watertown: Adina R&D, 1997. 145f.

BERNARDES, H. M. **Retroanálise do efeito estrutural das reações álcali – agregado em barragens de concreto.** 2000. 143f. Tese (Doutorado) –

Escola Politécnica, São Paulo.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB -. Simpósio sobre instrumentação de barragens, II, 1996, Belo Horizonte, In: **Simpósio...**

São Paulo: Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, 1996, v. 1.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Guia básico de segurança de barragens.** São Paulo: CBDB, 1999 (Relatório Técnico).

LABORATÓRIO CENTRAL DE ENGENHARIA CIVIL. **Instrumentação de barragens.** Ilha Solteira: CESP, 1992.

DIVISÃO DE MANUTENÇÃO CIVIL E SEGURANÇA DE BARRAGENS. **Usina Três Irmãos – Coletânea com os dados de auscultação de janeiro a julho de 1999.** Ilha Solteira: CESP, 1999, 224p. (Relatório Técnico LEC, 065/99).

EIGENHEER, L. P. Q. T. **Critérios de segurança - Simpósio sobre segurança de barragens.** São Paulo: PROMON, 1986, 71 f.

GOMES, A. F. S. **Automatização das actividades de observação de barragens e análise quantitativa de resultados.** 1981, 201p. Tese (Especialista) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.



EIKHOOFF, P. **System identification**: parameter and state estimation.

London: John Wiley, 1974, 555 p.

LIBBY, J. W. **Resume for meeting with consulting Engineer Mr. J. W.**

Libby. CS27B-MC8-310 São Paulo: 1983, 8p. (Relatório Técnico).

LINDQUIST, L. N.. **Segurança de barragens**. Ilha Solteira: CESP, 1996.

OLIVEIRA, S.B.M. **Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo: Formulações de danos**. 2000. 255 f. Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

CRITÉRIOS de projeto das estruturas de concreto. São Paulo: Promon, 1978, 33p. (Relatório Técnico).

ANÁLISE dos deslocamentos das estruturas de concreto da barragem de Água Vermelha até julho de 1979. São Paulo: Promon, 1980, 38p. (Relatório de instrumentação).

RELATÓRIO complementar das estruturas de concreto. São Paulo: Promon, 1986, 12p. (Relatório Técnico).

ANÁLISE do comportamento das estruturas do VS/BD e da TA/CF a partir de modelos matemáticos. São Paulo: Promon, 1989. 45p. (Relatório Técnico).

RAMOS, J. M. L. M. **Consideração sobre a reologia do betão no comportamento de barragens**. 1985. 222f. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.



RAMOS, J. M. et al. **Interpretação de deslocamentos em barragens de betão por análises quantitativas elásticas e não elásticas – Aplicação à Barragem de Aguieira.** Lisboa: LNEC, 1987, 23p. (Memória, 698).

RAMOS, J. M. L. M. **Curso de atualização em segurança e confiabilidade de barragens de concreto.** Ilha Solteira: Unesp, 1999, 31p. (Coletânea).

SILVEIRA, J. F. Segurança de estruturas de concreto em barragens. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Rio de Janeiro: CBGB, 1983.





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dec.feis.unesp.br

