



Hugo Manoel Marcato Affonso

**Instrumentação para medir deslocamentos
em barragens de enrocamento**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Alberto S. F. J. Sayão

Rio de Janeiro
Novembro de 2004



Hugo Manoel Marcato Affonso

**Instrumentação para medir deslocamentos
em barragens de enrocamento**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alberto S.F.J. Sayão

Presidente/Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Luciano V. de Medeiros

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Anna Laura L.S. Nunes

COPPE/UFRJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de Novembro de 2004.

Todos os direitos autorais reservados. É proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Hugo Manoel Marcato Affonso

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2002.

Ficha catalográfica

Affonso, Hugo Manoel Marcato

Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento / Hugo Manoel Marcato Affonso orientador: Alberto S. F. J. Sayão. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

v., 94f. : il. ; 29,7 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil .

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Instrumentação. 3. Barragens. 4. Enrocamento. 5. Medidor hidrostático de recalques. 6. Célula de recalque. 7. Caixa sueca. 8. Extensômetro horizontal. I. Sayão, Alberto S. F. J. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil . III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Manoel e Maria Luiza,
pelo carinho e dedicação.

À Patrícia,
pela compreensão e pelo companheirismo.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, aos meus pais, Manoel (*in memorian*) e Maria Luiza, pela educação e dedicação irrestrita durante toda minha vida.

À Vó Luiza, pelas preces e pelo bom humor.

À Patrícia, querida namorada, e à sua família, pelo apoio e pela compreensão em todos os momentos.

Especialmente ao meu orientador, Professor Alberto S. F. J. Sayão, pelos ensinamentos e sugestões, pela dedicação ao longo da pesquisa, pela sensatez, pelo respeito e pela compreensão.

À PUC-Rio pela oportunidade de ampliar meus horizontes técnicos e profissionais através da pós-graduação. Também pela oportunidade de fazer amigos de outros estados do Brasil e de outros países.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pelos conhecimentos repassados e pela orientação.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pela dedicação e atenção.

À equipe do Laboratório de Engenharia Civil de Furnas, em Aparecida de Goiânia – GO: Engenheiro Taylor Castro Oliveira, Engenheira Cláudia Castro, Técnica em Instrumentação Íris, ao estagiário David e aos laboratoristas Zecão e André.

À CAPES pelo apoio financeiro durante a execução da dissertação.

Aos professores da Faculdade de Engenharia de Juiz de Fora: Jorge Gravina Marcato, André Luis Marques Marcato, Márcio Marangon, Mitsuo Tsutsumi, Romir Soares de Souza Filho, Maria Tereza Barbosa, Paulo José Brugger e Cezar Henrique Barra Rocha, pelos ensinamentos e pelo profissionalismo.

A todos colegas de curso de graduação e de pós-graduação, especialmente: Rafael Gerard de Almeida Demuelenaere, Wagner de Oliveira Carvalho, Christian Ricardo Costa Alvarenga, Patrício José Moreira Pires, pelo companheirismo, por saberem compartilhar alegrias e superar dificuldades.

Aos amigos das repúblicas onde residi durante o período do mestrado, especialmente: Adriano Siqueira Pylro, Rodrigo Flora Calili, Eduardo Rocha.

Aos amigos pessoais que, a partir do convívio, dos incentivos, da discussão de idéias e da sementeira de nobres ideais participam ativamente de minha vida: Mônica e Igor, Augusto e Lisa.

Resumo

Affonso, Hugo Manoel Marcato; Sayão, Alberto S. F. J. **Instrumentação para medir deslocamentos em Barragens de Enrocamento**. Rio de Janeiro, 2004. 94p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A construção de Barragens de Enrocamento no Brasil tem se desenvolvido nas últimas décadas, por ser uma solução adequada para regiões onde há falta de solos finos e grande volume de escavações obrigatórias em rocha. Este desenvolvimento está relacionado tanto à quantidade de barragens construídas quanto ao incremento da altura das mesmas. A construção de protótipos de instrumentos para medição de deslocamentos neste tipo de barragem é de fundamental importância. Com a simulação das leituras em laboratório, torna-se possível implementar modificações no projeto, na construção, na instalação e na operação destes instrumentos, disponibilizando-se leituras mais acuradas e precisas, obtendo-se maior confiabilidade nos dados e, assim, informações mais consistentes sobre o comportamento das barragens. Além da elaboração de uma abrangente revisão bibliográfica sobre instrumentação geotécnica, foram estudados dois protótipos de instrumentos de medidas de deslocamento, Medidor Hidrostático de Recalques e Extensômetro Horizontal de Hastes Múltiplas. Ambos desenvolvidos no Laboratório de Engenharia Civil de Furnas, em Aparecida de Goiânia, estado de Goiás. Os resultados obtidos permitirão modificações na construção e instalação destes instrumentos.

Palavras-chave

Instrumentação, Barragens, Enrocamento, Medidor Hidrostático de Recalques, Célula de Recalque, Caixa Sueca, Extensômetro horizontal.

Abstract

Affonso, Hugo Manoel Marcato; Sayão, Alberto S. F. J. (Advisor) **Instrumentation for measuring displacements on Rockfill Embankments**. Rio de Janeiro, 2004. 94p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The number and height of rockfill dams in Brazil has been steadily growing, because rockfills constitute an adequate solution when the project requires a large volume of rock excavation and there is a lack of fine grained soils in the region. The development of new equipment for measuring displacements in these dams is of fundamental importance. Testing prototypes in the laboratory, under simulated field conditions, allows the researcher to implement modifications in the design characteristics and installation procedures for the instrument. As a result, measurements with higher accuracy and reliability are obtained and, consequently, higher safety for the dams. A comprehensive review of the literature on geotechnical instrumentation is presented. Two prototypes of displacement measuring devices have been studied and tested: a hydrostatic displacement cell and a multiple rods horizontal extensometer. Both were constructed and tested in the Civil Engineering Laboratory of Furnas, in Goiás, Brazil. The results and conclusions obtained will result in important modifications in the design and installation details of these instruments.

Keywords

Instrumentation, Dams, Rockfill, Hydrostatic Settlement Cell, Swedish Box, Horizontal Extensometer.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO SOBRE BARRAGENS DE ENROCAMENTO	16
2.1. Enrocamento	16
2.2. Barragens de Enrocamento	17
2.3. Seções Transversais Típicas	20
2.3.1. Barragens de Enrocamento com vedação a montante (BEVM)	21
2.3.2. Barragem de enrocamento com vedação central (BEVC)	24
2.4. Instrumentação de Barragens de Enrocamento	27
2.5. Compressibilidade de Enrocamentos	29
2.6. Instrumentação da Barragem de Foz do Areia	30
3. INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS	35
3.1. Definição e Histórico	35
3.2. Conceitos Básicos em Instrumentação	37
3.3. Critérios para execução	39
3.4. Frequência de leitura	46
3.5. Projeto de Lei para Segurança de Barragens	47
4. INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDA DE DESLOCAMENTOS	50
4.1. Conceitos de Instrumentos	50
4.2. Medidas de Deslocamentos	53
4.2.1. Medidores internos de deslocamentos verticais	53
4.2.1.1. Medidor Magnético de Recalque (MMR)	53
4.2.1.2. Medidor de recalque tipo KM	55
4.2.1.3. Medidor de Recalque Telescópico (IPT)	56
4.2.1.4. Medidor hidrostático de recalques (caixa sueca)	58
4.2.2. Medidores internos de deslocamentos horizontais	66
4.2.2.1. Extensômetros de hastes múltiplas	66
4.2.2.2. Inclinômetros	67
4.2.3. Medidores de deslocamentos de superfície	68

4.2.3.1. De movimento angular (eletrônicos)	68
4.2.3.2. De abertura de juntas	72
4.2.3.3. Triortogonal de junta perimetral	73
4.2.3.4. Marcos topográficos	74
5. PROTÓTIPOS DE MEDIDORES DE DESLOCAMENTOS	75
5.1. Protótipo do Medidor Hidrostático de Recalques	75
5.2. Protótipo do Extensômetro de Hastes Múltiplas	84
6. CONCLUSÕES	87
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

Lista de figuras

Figura 1 - Seções transversais das barragens de enrocamento no período inicial.	20
Figura 2 - Seção transversal esquemática de BEVM.	22
Figura 3 - Face de concreto da barragem de Foz do Areia (Cruz, 1996).	22
Figura 4 - Seção transversal típica da Barragem de Foz do Areia (Cruz, 1996).	23
Figura 5 - Seção Transversal esquemática de BEVC.	24
Figura 6 - Seção típica da Barragem Francisco Saboya, PE, Brasil.	25
Figura 7 - Seção transversal típica da Barragem de Serra da Mesa (Castro, 1996).	26
Figura 8 - Esquema de uma seção instrumentada de BEFC (Oliveira e Sayão, 2004).	28
Figura 9 - Esquema de uma seção instrumentada de BENA (Oliveira e Sayão, 2004).	29
Figura 10 - Localização das células de recalque na seção 13+20,00 da Barragem de Foz do Areia (Marques Filho et al., 1985).	31
Figura 11 - Curvas de recalque equivalente (em centímetros), antes do enchimento (Marques Filho et al., 1985).	32
Figura 12 - Módulo de compressibilidade antes do enchimento do reservatório (Marques Filho et al., 1985).	33
Figura 13 - Recalques totais - Curvas tensão x deformação para o período de construção (Marques Filho et al., 1985).	33
Figura 14 - Recalques entre células - Curvas tensão x deformação para o período de construção (Marques Filho et al., 1985).	34
Figura 15 - Comparação entre acurácia e precisão (Dunnicliff, 1988).	38
Figura 16 - Relação entre o número de instrumentos específicos e o total de instrumentos instalados (Kanji e Figueira, 1990).	44
Figura 17 - Transdutor pneumático fechado com dois tubos e leitura de fluxo de gás (Dunnicliff, 1988).	51
Figura 18 - Esquema do sensor de corda vibrante (Dunnicliff, 1988).	51
Figura 19 - Esquema de LVDT (Dunnicliff, 1988).	53
Figura 20 - Medidor Magnético de Recalque (Cruz, 1996).	54
Figura 21 - Operação de Leitura no Medidor Magnético de Recalque.	54

Figura 22 - Medidor de Recalques tipo KM (Cruz, 1996).	55
Figura 23 - Medidor de Recalques Telescópico IPT (Cruz, 1996).	57
Figura 24 - Seções de barragens instrumentadas com caixas suecas (Oliveira e Sayão, 2004).	59
Figura 25 - Esquema de funcionamento do medidor hidrostático de recalques (Oliveira e Sayão, 2004).	61
Figura 26 - Seqüência de montagem da célula de recalque no campo (Belitardo e Pereira, 2001).	63
Figura 27 - Detalhes de instalação de caixas suecas e extensômetros.	64
Figura 28 - Painel de leitura de caixas suecas.	64
Figura 29 - Cabine de leitura em concreto pré-moldado, concentra os pontos de leitura de caixas suecas e extensômetros horizontais de hastes múltiplas.	65
Figura 30 - Componentes do Extensômetro Horizontal de Hastes Múltiplas (Belitardo e Pereira - 2001, com modificações).	67
Figura 31 - Princípio de operação do inclinômetro (Dunnicliff, 1988).	68
Figura 32 - Variação da altura do líquido eletrolítico entre os eletrodos (Wha, 1999).	69
Figura 33 - Funcionamento do eletrônível (Wha, 1999).	70
Figura 34 - Cilindro metálico para proteção da ampola, cabos elétricos e leitora.	71
Figura 35 - Detalhes da proteção da ampola do eletrônível.	71
Figura 36 - Localização dos eletrôníveis na face de concreto de barragem de enrocamento (Wha, 1999).	72
Figura 37 - Medidor de abertura de juntas.	73
Figura 38 - Medidor triortogonal.	73
Figura 39 - Protótipo do Medidor Hidrostático de Recalques.	76
Figura 40 - Aparelho composto de bomba de pressão e vácuo e câmaras pressurizadas para circulação de água.	79
Figura 41 - Esquema do Sistema do Protótipo do Medidor Hidrostático de Recalques.	80
Figura 42 - Variação na leitura causada pela dilatação térmica dos tubos (Oliveira, 2004).	81
Figura 43 - Teste de estabilização do nível d'água em tubo com DI=6,3mm (Oliveira, 2004).	82
Figura 44 - Teste de estabilização do nível d'água em tubo com DI=4,3mm (Oliveira, 2004).	83
Figura 45 - Instalação e detalhe do protótipo.	84

Figura 46 - Detalhes do dispositivo de movimentação das hastes e painel de leitura. 85

Figura 47 - Relação entre os deslocamentos impostos e medidos para o protótipo. 86

Lista de tabelas

Tabela 1 - Fatores que influenciam características geomecânicas de enrocamentos (Albuquerque Jr, 1993 – com modificações).	17
Tabela 2 - Materiais da seção transversal da Barragem de Foz do Areia (Cruz, 1996).	24
Tabela 3 - Evolução da Instrumentação em Barragens de Terra-Enrocamento no Brasil.	38
Tabela 4 - Porcentagens usuais dos principais instrumentos em projetos de instrumentação.	43
Tabela 5 - Correspondência entre fase de projeto, objetivos e tipo de instrumentação de barragens (adaptado de CBDB, 1996).	45
Tabela 6 - Freqüências mínimas recomendadas para a instrumentação de barragens de terra-enrocamento (CBDB, 1996).	47