

## *Apresentação*

O livro de João Francisco Alves Silveira, *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*, que tenho a oportunidade de ler em primeira mão, remete-nos a algumas reflexões essenciais.

A primeira é a importância de documentar em livro, em um texto único, toda informação publicada em fragmentos, como anais de congressos, revistas especializadas e inúmeros CDs. O trabalho de João Francisco de reunir essa informação, de forma aprazível e precisa, é referência para todos aqueles que se dedicam a projetar, instrumentar, construir e analisar o desempenho das barragens de terra e enrocamento.

A segunda é que as barragens são obras de vida longa, que envelhecem com o passar dos anos, precisam ser conservadas, e, periodicamente, reavaliadas quanto à segurança. Nesse aspecto, a instrumentação ocupa um lugar de destaque.

Na década de 1950, quando teve início a construção dos grandes aproveitamentos hidrelétricos brasileiros, talvez não houvesse ainda a consciência de que os piezômetros, as células de pressão e de recalques das barragens tivessem de ser projetados e instalados para durarem 20, 30, 50 anos.

Por outro lado, nesses últimos 50 anos, a tecnologia relacionada à instrumentação de barragens vem se modificando e se aperfeiçoando, como é mostrado em detalhe em cada capítulo deste livro e com a acuidade de um pesquisador como João Francisco, que discute e documenta com exemplos e performances de cada tipo de piezômetro, de medidores de recalque, de extensômetros, de células de pressão total, de inclinômetros e medidores de vazão, além dos problemas de cabos, tubulações, fibras óticas e outros meios de levar por centenas de metros os registros dos instrumentos às caixas de leitura. E “sonha”, no final, com as instrumentações sem cabos, e até com controle remoto, equipadas com baterias de longa duração, não sujeitas à ação de campos magnéticos e descargas atmosféricas.

Passando do geral ao particular, chamaram a minha atenção alguns relatos de obras e de medidas de grandeza que gostaria de destacar.

No Capítulo 3, são apresentados dados de piezometria que permitem avaliar a

evolução das redes de percolação que se estabelecem nos maciços compactados e nas fundações das barragens. Confirma-se o fato, de difícil previsão, de que nossos solos compactados, embora não saturados e de baixa permeabilidade, e com pressões neutras construtivas em geral muito pequenas, alcançam um estado de equilíbrio de fluxo em um período de dois a três anos.

A seguir, Silveira discute as variações das permeabilidades nas fundações das barragens, com variações para menos nos trechos centrais, e para mais nas proximidades dos pés dos taludes, e o seu reflexo no fluxo subterrâneo e nos sistemas internos de drenagem.

No Capítulo 6, o autor dá especial importância à instrumentação dirigida para registrar pressões totais e de poros, em núcleos delgados de barragens de enrocamento, bem como em trincheiras de fundação em vales fechados rochosos, voltados ao problema do arqueamento, responsável por vários acidentes em barragens.

Nos capítulos seguintes, discute em detalhes a instrumentação destinada a medidas de deslocamentos verticais e, principalmente, horizontais, tanto no sentido longitudinal como transversal das barragens, responsáveis pelos estados de compressão e tração que se estabelecem nos maciços de terra e enrocamento.

Apresenta em detalhes as medidas feitas em duas barragens na Áustria, Gepatsch – de 153 metros, de enrocamento com núcleo de terra, em que foram instalados 32 piezômetros e 52 células de pressão total – e Finstertal – enrocamento com núcleo delgado de asfalto, em que foram instaladas 83 células de pressão total.

Ainda no tema de pressões, totais a obra mostra que os drenos verticais de areia formam verdadeiras paredes rígidas dentro dos aterros compactados e que devem, por isso, ser substituídos por drenos inclinados em barragens com mais de 25 a 30 metros de altura, como já defendido por Victor de Mello em sua Rankine Lecture.

Nos Capítulos 8 e 10, João Francisco fornece dados sobre recalques e deslocamentos horizontais medidos em fundações e nos maciços compactados de solos e enrocamento das barragens. Nas tabelas desses capítulos, a diferença entre valores medidos e previstos representa as dificuldades de se prever tais grandezas, mesmo dispondo de recursos sofisticados de cálculos.

E, para o meu deleite, que, nos últimos 35 anos, leciono Fluxo em Meios Contínuos e Descontínuos na Escola Politécnica da USP, encontro nos Capítulos 12 e 13 as medidas de vazões nos maciços, principalmente nas fundações das barragens de terra de enrocamento e de face de concreto.

Vazões de 0,5 a 3,0 litros/minuto/metro em barragens de terra e enrocamento com núcleo e de até 20 litros/minuto/metro em barragens de enrocamento com face de concreto são valores de controle. Se excedidos, deve-se identificar a causa e procurar corrigi-la.

Esses são apenas alguns destaques dentre muitos relatados pelo autor. Parabéns!

*Prof. Paulo Teixeira da Cruz*  
Consultor em Geotecnia

# 3

## *Piezometria – Instrumentos de Medida*

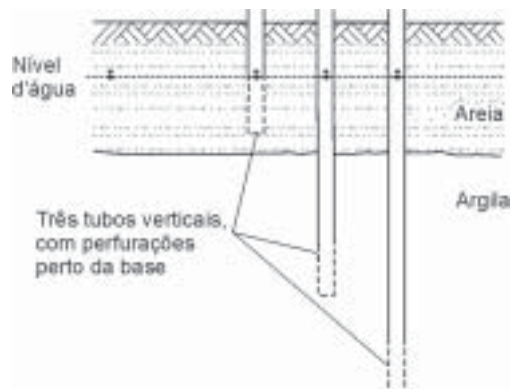
*Teton dam and its foundation were not instrumented sufficiently to enable the Project Construction Engineers and his forces to be informed fully of the changing conditions in the embankment and its abutments.*

Painel de consultores que analisou as causas da ruptura da barragem de Teton, nos Estados Unidos, 1976

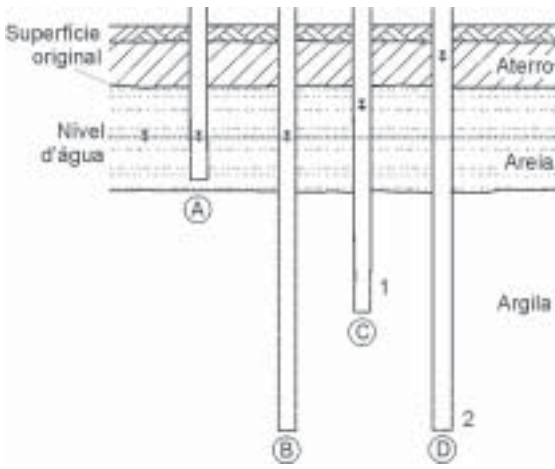
### 3.1 Diferença entre poropressão e nível freático

O nível freático é definido como a superfície superior de um corpo d'água subterrâneo, na qual a pressão corresponde à atmosférica.

A Fig. 3.1 ilustra três tubos perfurados, instalados em um solo, no qual não ocorre fluxo d'água; entretanto, a pressão hidrostática aumenta uniformemente com a profundidade. Quando existir tal condição de equilíbrio, o nível d'água dentro do tubo subirá até o nível freático, independentemente da localização da perfuração.



**Fig. 3.1** *Nível freático quando não há fluxo d'água subterrânea (Dunnicliff, 1993)*



**Fig. 3.2** *Nível freático e poropressões quando há fluxo d'água (Dunnicliff, 1993)*

perfurado ao longo de toda a sua extensão, enquanto os outros tubos são perfurados apenas no trecho inferior. Por causa da alta permeabilidade da areia, o excesso de poropressão nesse material se dissipa quase que imediatamente e deixa de existir. O tubo (A) indica o nível freático. Os tubos (C) e (D) indicam as poropressões na camada de argila, nos locais (1) e (2). O nível d'água no tubo (C) é mais baixo que no tubo (D) por causa da maior dissipação da poropressão no nível (1), em relação ao nível (2), devido à maior proximidade da camada superior de areia, que auxilia na dissipação das poropressões. No caso ilustrado nessa figura, o tubo (B) provavelmente está indicando o nível freático, porque a permeabilidade da areia é substancialmente maior que a da argila, de tal maneira que a poropressão excedente na argila provoque um fluxo ascendente de água da argila para a areia, através da tubulação do instrumento. Dessa forma, o fluxo dissipa-se rapidamente.

Verifica-se, desse modo, que a instalação de uma tubulação perfurada através de duas ou mais camadas, mesmo que protegidas por uma camada de areia em toda a extensão da tubulação, criará uma conexão vertical indesejável entre essas camadas, e o nível d'água no interior do tubo indicará usualmente um valor errôneo. O tubo (B) é normalmente designado de *poço de observação* ou *medidor de nível d'água*, enquanto que os tubos (C) e (D) indicam as poropressões, e sua dissipação dentro da camada de areia ou argila, sendo designados de *piezômetros*. Detalhes desses dois tipos de instrumentos serão apresentados mais adiante.

### 3.2 Poropressões positiva e negativa

Normalmente, as poropressões registradas abaixo do nível d'água são positivas e, como mostrado na Fig. 3.2, as mesmas podem aumentar em um solo, pela aplicação

Na Fig. 3.2, ilustra-se a situação decorrente da sobrecarga de um aterro em uma camada de areia, imediatamente após sua execução. Nessa situação, a consolidação da areia ainda não está terminada, o que gera uma elevação da poropressão na camada de argila e faz com que o nível freático também não se encontre em equilíbrio.

Os quatro tubos perfurados na Fig. 3.2 são instalados de tal modo que o solo se encontra em contato direto com o trecho perfurado dos tubos. O tubo (B) é

# 6

## *Pressões Medidas em Barragens de Terra e os Procedimentos de Análise*

*The great progress made over the last two decades in the design and construction of embankment dams is due to better knowledge of their bearing and deformation behaviour, to improved construction technologies and in large degree also to the substantial improvement of the measuring equipment used for dam surveillance during construction and operation.*

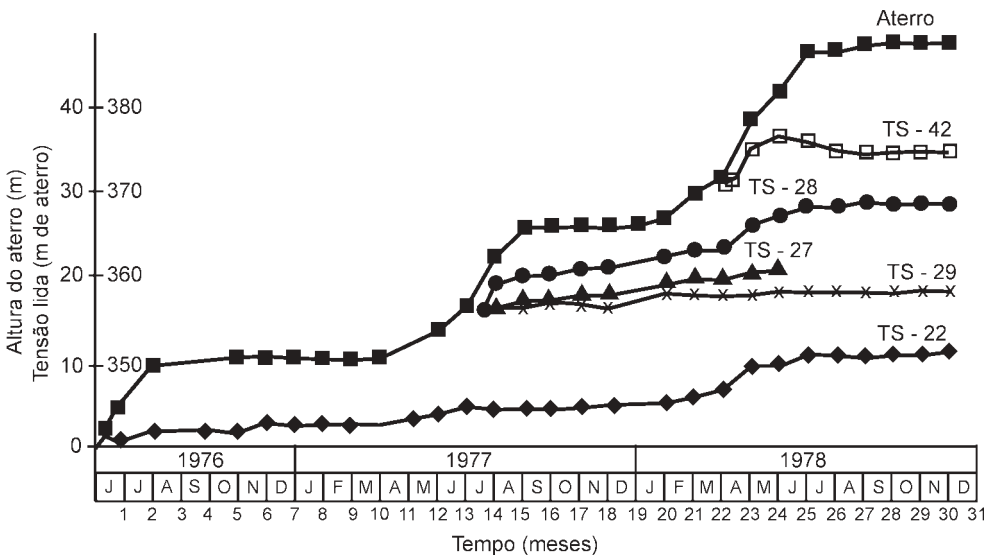
Schwab, H. e Pircher, W., 1982

Neste capítulo, apresentam-se alguns resultados típicos das medições de tensão realizadas em barragens de terra e enrocamento, durante os períodos construtivo, fase de enchimento do reservatório e operação, tendo por objetivo não apenas ressaltar a importância dessas observações na supervisão do comportamento da barragem, como também mostrar os vários tipos de análises que podem ser realizadas com os dados obtidos, as formas mais usuais de representação gráfica dos resultados, os modelos de análise matemática normalmente empregados, procurando-se ilustrar com alguns resultados interessantes sobre as tensões medidas no aterro de barragens e nas interfaces entre o núcleo e as estruturas de concreto. Procurou-se dar preferência aos exemplos de barragens instrumentadas no Brasil; porém, tratando-se de grandes barragens de enrocamento com núcleo impermeável, foram utilizados exemplos de algumas barragens de grande porte instrumentadas na Áustria, na Noruega e nos Estados Unidos, em função dos bons resultados obtidos, assim como da detalhada análise realizada sobre dados obtidos.

## 6.1 Processamento e apresentação dos dados

As células de pressão total são geralmente utilizadas para a medição das tensões aplicadas pelo aterro sobre os muros laterais de vertedouro, muros de transição, galerias de desvio etc., conforme foi analisado no capítulo precedente. No interior do aterro, as células são empregadas individualmente para a medição da concentração de tensões verticais em determinadas zonas da barragem, ou então são instaladas em grupo, constituindo uma roseta, para permitir o cálculo das tensões principais. A instalação das células de pressão total no interior de um aterro, aliada ao processo de instalação, acaba sempre interferindo no campo das tensões aplicadas, o que exige especiais cuidados ao se proceder à seleção, calibração e instalação desses instrumentos. Já as células instaladas embutidas nas estruturas de concreto, para a medição das tensões aplicadas na interface solo-concreto, não afetam usualmente de modo expressivo as tensões medidas, desde que sejam selecionados tipos apropriados de células e os instrumentos sejam adequadamente embutidos no concreto. Ao se proceder à escavação e reaterro dos recessos na superfície do aterro, deve-se tomar todo o cuidado necessário a fim de se evitar que o solo fique mais rígido ou mais deformável que o aterro adjacente, para não alterar o nível das tensões medidas.

As leituras das células de pressão devem inicialmente ser transformadas em unidades de tensão, por meio das curvas de calibração realizadas em laboratório. A seguir, devem ser representadas em gráficos que indiquem as tensões medidas em função do tempo, com o nível de subida do aterro sobre a célula e o nível de subida do reservatório, conforme ilustrado na Fig. 6.1.



**Fig. 6.1** Pressão medida versus tempo, com a elevação do aterro no abraço esquerdo da barragem de Água Vermelha