

2 INSTRUMENTAÇÃO E SEGURANÇA DE BARRAGENS

2.1. Introdução

O interesse crescente pela segurança de barragens tem levado, em um número apreciável de países, à implementação de normas e critérios específicos para o projeto, construção, observação, inspeção e acompanhamento da operação de barragens e outras obras da engenharia geotécnica. Neste contexto, o monitoramento hidráulico-mecânico de barragens através da instalação de um adequado sistema de instrumentação desempenha um papel fundamental na avaliação do comportamento destas estruturas, tanto durante o período de construção quanto no regime de plena operação. Através da leitura de valores de cargas de pressão, dos deslocamentos, vazões e tensões desenvolvidas no corpo da barragem propriamente dita, ou no maciço de fundação, é possível comparar-se quantidades experimentalmente medidas com aquelas previstas pelo projeto (fase de construção) ou estimadas para uma operação segura da barragem, sujeita, durante sua vida útil, a várias mudanças de carregamento causadas por flutuação do nível do reservatório, oscilações de temperatura, etc.

Este capítulo faz uma revisão geral dos objetivos básicos da instrumentação de barragens e do papel fundamental que um adequado monitoramento e interpretação dos dados de instrumentação desempenha no controle de segurança da estrutura.

2.2. Objetivos básicos da instrumentação de barragens

Segundo o manual de instrumentação de barragens da U.S. Army Corps of Engineers (1995) os principais objetivos da instrumentação geotécnica podem ser agrupados dentro de quatro categorias, a saber: avaliações analíticas, previsão do desempenho futuro, avaliações legais e desenvolvimento e verificação de futuros

empreendimentos. As avaliações analíticas consistem na análise dos dados obtidos a partir da instrumentação geotécnica para verificar parâmetros de projeto, hipóteses de modelagem e técnicas de construção, bem como estimar os efeitos de eventos adversos. As previsões de desempenho futuro referem-se às diversas formas de tratamento dos dados de instrumentação, executando-se previsões que podem confirmar condições normais de operação ou indicar riscos potenciais para a barragem. Os dados da instrumentação podem também ser bastante importantes no caso de avaliações legais e em litígios relacionados com a construção da barragem como, por exemplo, nas eventuais mudanças ocorridas nas condições de fluxo sub-superficial. O aspecto sobre o desenvolvimento e verificação de futuros empreendimentos se refere à análise do desempenho de uma barragem tanto na etapa de construção quanto na fase de operação, com o propósito de aperfeiçoar o estado-da-arte do projeto e da construção de barragens.

O Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (1996) estabeleceu como objetivos básicos da instrumentação os seguintes tópicos, agrupados de acordo com a etapa de desenvolvimento da barragem: construção, primeiro enchimento e operação.

Período de construção:

- Alertar sobre a ocorrência de possíveis anomalias no comportamento da barragem como, por exemplo, condições térmicas que possam dar origem a fissuras em estruturas de concreto ou tensões de tração que possam causar fissuras transversais em aterros compactados.
- Possibilitar soluções menos conservadoras, permitindo economia significativa para a obra. As barragens de Água Vermelha (entre Minas Gerais e Goiás) e Corumbá I (Goiás) foram construídas, totalmente a primeira e parcialmente a segunda, sobre espessas camadas de solo residual cuja remoção implicaria em elevados custos construtivos. Ambos os casos foram acompanhados da instalação de um abrangente programa de instrumentação para verificar o comportamento das obras sob tais maciços de fundação.

Fornecer informações, por retro-análise dos dados de instrumentação, a respeito dos valores dos parâmetros dos materiais que constituem a barragem e sua fundação.

- Possibilitar revisões do projeto durante o período construtivo, decorrentes, por exemplo, de análises térmicas do concreto versus intervalos de lançamento ou do acompanhamento do comportamento dos taludes de escavação.

Período de enchimento:

- Alertar sobre a ocorrência de possíveis anomalias que possam colocar em risco a segurança da estrutura como, por exemplo, desenvolvimento de pressões neutras elevadas indicando possíveis problemas com o sistema de drenos.
- Possibilitar avaliação do desempenho estrutural, geotécnico e hidráulico da obra, em função das comparações entre grandezas medidas “*in-situ*” e aquelas previstas por modelos teóricos ou experimentais de análise.
- Verificar a adequação das simplificações introduzidas nas hipóteses de projeto. Através de retro-análises com base nos dados de instrumentação é possível fazer-se uma análise dos modelos constitutivos selecionados para simular o comportamento dos materiais bem como verificar a eficiência da modelagem matemática e das técnicas numéricas empregadas para a sua solução.

Período de operação:

- Verificar se a barragem está apresentando um desempenho geral satisfatório, conforme previsto em projeto.
- Caracterizar o comportamento no tempo dos solos e/ou do maciço rochoso de fundação determinando o prazo necessário para a estabilização dos deslocamentos, tensões, sub-pressões, vazões, etc.
- Caracterizar o comportamento no tempo das estruturas da barragem, levando-se também em conta os efeitos das condições termo-ambientais.

2.3. Instrumentação e segurança de barragens

A segurança de uma barragem está intimamente relacionada aos aspectos de projeto, construção, instrumentação/inspeção, operação e manutenção. A fase de projeto de uma barragem e de suas estruturas anexas é sem dúvida uma das mais importantes, uma vez que um projeto bem concebido é fundamental para garantir uma obra tecnicamente segura, sem prescindir, obviamente, de uma operação e manutenção cuidadosas. Durante a construção da barragem, o papel desempenhado pela equipe de fiscalização é de vital importância para assegurar que a mesma seja executada de acordo com as especificações de projeto, e também permitir a introdução de pequenas modificações ou adaptações em campo sempre que necessárias. É claro que por melhores que tenham sido o projeto de uma barragem e a fiscalização de sua construção, só será possível exercer um eficiente controle das condições de segurança da barragem se a mesma estiver sendo adequadamente inspecionada e monitorada através de instrumentação apropriada, operada por equipe treinada. Durante a vida útil da barragem, são necessárias obras periódicas de manutenção com a finalidade de preservar em bom estado as várias estruturas, assegurar superfícies hidráulicas satisfatórias e garantir a operacionalidade dos equipamentos eletromecânicos e dos instrumentos de auscultação. No caso de barragens de enrocamento, as obras de manutenção mais usuais são:

- Limpeza de canaletas de drenagem, de caixas de dissipação e poços de saída do sistema de drenagem interna.
- Conservação do *rip-rap* e dos gramados de proteção dos taludes.
- Tratamento das surgências d'água junto ao pé do talude de jusante.
- Tratamento de trincas na superfície dos taludes ou na crista da barragem.
- Recomposição do enrocamento de pé quando da ocorrência de erosões provocadas por condições extremas de operação do vertedouro.
- Limpeza e manutenção dos instrumentos de auscultação.

As lições aprendidas com as rupturas de barragens têm revelado que um longo período de operação normal não é jamais garantia de condições futuras de segurança, uma vez que tem havido casos de ruptura brusca após 10 e 20 anos de

operação normal. A barragem em arco de Zeuzier, na Suíça, com 156 metros de altura, operou durante 21 anos sem qualquer problema aparente, quando em novembro de 1978 as informações fornecidas pelos pêndulos direitos passaram a indicar deslocamentos que ultrapassavam os valores elásticos anteriormente observados. A crista da barragem começou a apresentar deslocamentos contínuos para montante, apesar do reservatório estar totalmente cheio, enquanto as medições geodésicas indicavam movimentos de aproximação entre as ombreiras da barragem e recalques do maciço de fundação em toda a região da barragem. Fissuras no concreto, com abertura de 10mm, desenvolveram-se junto às ombreiras, exigindo um intenso tratamento através de injeção de resina epóxi. As investigações realizadas, auxiliadas pelos dados fornecidos pela instrumentação, vieram indicar que os problemas observados estavam associados à escavação de um túnel rodoviário, afastado 1400 metros da barragem. A barragem encontra-se hoje em operação normal, após paralisação da construção do túnel e a execução das obras de reparo.

O planejamento da instrumentação de barragens de terra e/ou enrocamento é fundamentalmente influenciado pelas características dos materiais de construção e das fundações, bem como da geometria do núcleo impermeável, se espesso ou delgado, central ou inclinado. Os instrumentos devem ser localizados racionalmente para assegurar uma quantidade máxima de informações a um custo mínimo. Instrumentos mais complexos e dispendiosos somente devem ser instalados se eles forem realmente capazes de prever a ocorrência de eventos danosos à segurança, possibilitando assim uma intervenção antecipada para evitar ou minimizar seus efeitos. É usual localizar-se uma quantidade maior de instrumentos em uma ou mais seções principais, tais como a seção de altura máxima, seções em zonas de discontinuidades ou junto a ombreiras abruptas. As grandezas medidas são normalmente os deslocamentos, tensões, cargas de pressão (pressões neutras) e vazões de percolação.

Em alguns empreendimentos, os medidores de vazão são instalados em um ou mais locais para monitorar a percolação através e sob a barragem. Tais medidores, devido a sua indiscutível importância, podem ser equipados com dispositivos sensores e transmissores de dados via radio, micro-ondas ou cabos, encaminhando assim o fluxo de informações constantemente aos sistemas de aquisição de dados.

Em muitos casos, os valores de vazão constituem-se em importantes evidências da ocorrência de problemas no comportamento geotécnico de barragens, sendo muito natural, portanto, que a instalação destes medidores seja uma prática de longa data na construção de barragens no Brasil e no exterior. Legislações de vários países, como Japão, Noruega e França, impõem a instalação de medidores de vazão como componente essencial de um projeto de instrumentação de barragens.

As medidas de poro-pressões são importantes no estudo de estabilidade de barragens, na avaliação da eficiência dos drenos (uma ascensão progressiva da linha freática pode indicar colmatação nos sistemas de drenagem) e na verificação da possibilidade da ocorrência de fraturamento hidráulico. No caso da barragem de Corumbá I, com núcleo argiloso relativamente pouco espesso em relação aos espaldares de enrocamento, as cargas de pressão medidas no núcleo não têm qualquer influência na estabilidade da barragem, com coeficiente de segurança estimado em 2,25 para o talude de jusante sob condição de nível d'água máximo no reservatório.

2.4. Análise dos dados de instrumentação

A previsão do comportamento de barragens a curto prazo (construção e primeiro enchimento do reservatório, tipicamente) geralmente é baseada em um método determinístico, analítico ou numérico, no qual um modelo matemático do comportamento da estrutura, incluindo relações constitutivas dos diferentes materiais, geometria do problema, condições iniciais e de contorno, etc., é selecionado *a priori*. As estimativas de comportamento hidráulico e mecânico são feitas com grau de precisão variável, dependendo da qualidade dos dados disponíveis e da complexidade do modelo utilizado, variando desde simples formulações empíricas a sofisticadas simulações numéricas.

A previsão do comportamento de barragens a longo prazo em geral envolve a análise de uma quantidade considerável de dados, provenientes das leituras da instrumentação ao longo de grandes períodos de tempo, cuja interpretação é mais convenientemente executada através de métodos estatísticos e/ou probabilísticos.

Fairbairn et al. (1999), com auxílio de redes neurais e elementos finitos, utilizam séries temporais de medidas de deslocamento para estimativa da evolução das propriedades elásticas da barragem de concreto de Funil (RJ); Quintiliano et al. (1999) fazem o mesmo tipo de estudo desta barragem, empregando porém uma abordagem probabilística (retroanálise Bayesiana).