

CADERNOS DO IME – Série Estatística

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
ISSN impresso 1413-9022 / ISSN on-line 2317-4536 - v. 40, p.1 - 18, 2016
DOI: 10.12957/cadest.2016.20040

MONITORAMENTO CONJUNTO DOS DESLOCAMENTOS DAS ESTRUTURAS DOS BLOCOS DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO

Sheila Regina Oro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
sheilaro@utfpr.edu.br

Anselmo Chaves Neto
Universidade Federal do Paraná
anselmo@ufpr.br

Cláudio Neumann Júnior
Itaipu Binacional
neumann@itaipu.gov.br

Resumo

A avaliação das respostas das estruturas de uma barragem é um problema complexo, que requer o uso de métodos confiáveis e eficazes. Neste estudo faz-se uso da análise fatorial, séries temporais e cartas de controle, para a análise conjunta dos dados de monitoramento, visando a diminuição da dimensão do problema, auxiliar o diagnóstico e a tomada de decisão sobre os deslocamentos das estruturas da barragem e prever os valores a médio prazo. O Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem, resultante da aplicação do método, permite a avaliação global do comportamento de dois blocos de contrafortes de uma barragem, na presença de variabilidade nas condições ambientais. Os resultados obtidos indicam que o processo está sob controle, é estável e previsível.

Palavras-chave: Monitoramento de Barragens, Deslocamentos, Condições Ambientais, Análise Fatorial, Séries Temporais, Cartas de Controle.

1. Introdução

O conceito de monitoramento estrutural está associado ao desenvolvimento e à aplicação de estratégias para acompanhar o comportamento de sistemas estruturais. Um monitoramento eficiente deve visar identificar danos em um estágio inicial, o que está geralmente relacionado a fenômenos locais, com pequena magnitude (SANTOS *et al.*, 2013).

O processo de monitoramento estrutural de barragens inclui a avaliação dos deslocamentos, medidos por pêndulos, bases de alongâmetro, medidores triortogonais e extensômetros múltiplos de hastes (CARVALHO; ROMANEL, 2007; CRUZ, 2006; MATOS, 2002).

As medidas dos deslocamentos horizontais da crista da barragem até sua fundação são aferidas através da associação dos valores observados nos pêndulos diretos e invertidos. As bases de alongâmetro e os medidores triortogonais medem os deslocamentos relativos horizontais e verticais entre juntas e juntas de blocos da barragem. Os extensômetros múltiplos de hastes informam a deformabilidade de maciços rochosos e/ou os deslocamentos de blocos de estruturas de concreto (MATOS, 2002; VASCONCELOS, 1978).

As alterações das condições ambientais, tais como, temperatura ambiente no entorno da barragem, nível de água do reservatório e temperatura dos blocos de concreto, estão associadas à ocorrência dos deslocamentos das estruturas de barragens de concreto (CARVALHO; ROMANEL, 2007; MATA, 2011; VASCONCELOS, 1978).

A segurança estrutural de uma barragem é determinada principalmente pelas operações normais da estrutura e levando-se em consideração os benefícios sociais e econômicos que ela proporciona, bem como a segurança pessoal e patrimonial dos residentes na área do reservatório (CHENG; ZHENG, 2013). Sendo assim, é importante adotar métodos confiáveis e eficazes para monitorar a segurança dessa barragem.

A avaliação das respostas das estruturas de uma barragem, por considerar os dados da instrumentação e levar em conta a interação com o meio ambiente, é um problema composto por várias dimensões. Nesse sentido, é necessária a utilização de técnicas que possibilitem a análise conjunta dos dados de monitoramento, diminuam a dimensão do problema e auxiliem a tomada de decisão.

Nos últimos anos vários pesquisadores dedicaram-se ao estudo e desenvolvimento de modelos com essas finalidades. Em especial, os modelos que envolvem técnicas de estatística multivariada são utilizados principalmente para a representação do sistema (GUEDES; DE FARIA, 2007; RODRIGUES *et al.*, 2015; YU-QING; YAN-LIANG, 2012), o estudo das relações entre as respostas da barragem e as variáveis ambientais (CHENG; ZHENG, 2013; DENG; WANG; SZOSTAK-CHRZANOWSKI, 2008), o reconhecimento de padrões (VILLWOCK *et al.*, 2013), o cálculo da probabilidade de ocorrência de eventos (BANDO; MARQUES; PATIAS, 2015), a identificação dos fatores que influenciam as respostas da barragem e a previsão de valores (BUZZI, 2007; CARVALHO; ROMANEL, 2007; GU *et al.*, 2011; LI; WANG; LIU, 2013; MATA, 2011; YU *et al.*, 2010), o estabelecimento de valores de controle (FUSARO, 2007; KUPERMAN *et al.*, 2005).

O objetivo principal deste trabalho é avaliar de forma global as respostas dos blocos de contrafortes de uma barragem, por meio da análise multivariada dos dados dos sensores de deslocamentos. Para tanto, criou-se uma variável denominada Índice de Monitoramento Contínuo, utilizando como parâmetros os fatores associados à variabilidade nas medições da instrumentação instalada nas estruturas e fundações dos blocos e considerando os efeitos das condições climáticas.

2. Fundamentação Teórica

Uma coleção de n observações sobre p variáveis aleatórias distintas, tomadas de um mesmo item, compõe uma amostra multivariada, que pode ser representada na forma matricial (Eq. 1), onde cada vetor X_j contém as n observações da variável j , para todo $j = 1, 2, \dots, p$.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{ip} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} = [\underline{X}_1 \quad \underline{X}_2 \cdots \underline{X}_p] \quad (1)$$

A seguir, são apresentados os aspectos teóricos pertinentes à aplicação da análise fatorial, modelagem de séries temporais e construção de cartas de controle.

2.1 Análise Fatorial

A análise multivariada fornece métodos e técnicas para a interpretação teórica dessa amostra de forma conjunta. As principais finalidades que justificam o uso dos métodos e técnicas de análise multivariada são: redução de dados e simplificação estrutural; ordenação e agrupamento; investigação da dependência entre as variáveis; previsão; construção e testes de hipóteses.

A aplicação da técnica multivariada da análise fatorial permite a explicação das correlações entre as muitas variáveis de um conjunto de dados por meio de um número reduzido de variáveis aleatórias não observáveis, denominadas fatores (JOHNSON; WICHERN, 2007).

A verificação da viabilidade do uso do modelo fatorial é feita pela aplicação do Teste de Bartlett (Eq. 2), testando a hipótese de que a matriz de correlações é igual à matriz identidade, e a qualidade do ajuste do modelo ao conjunto de dados é estimada pelo Critério Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). O coeficiente KMO (Eq. 3) varia entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste do modelo fatorial aos dados.

$$T = - \left[n - \frac{1}{6}(2p+1) \right] \sum_{j=1}^p \ln \lambda_j \quad (2)$$

Onde:

T tem distribuição Qui-quadrado com v graus de liberdade, sendo $v = \frac{p}{2}(p-1)$;

λ_j é o j -ésimo autovalor da matriz de correlações.

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} q_{ij}^2} \quad (3)$$

Onde:

q_{ij} é o elemento pertencente à i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz Q definida por

$Q = DR^{-1}D$, em que R é a matriz de correlações amostrais e $D = (\sqrt{\text{diagonal}(R^{-1})})^{-1}$.

O modelo fatorial (Eq. 4) considera que cada variável pode ser escrita como uma combinação linear dos fatores comuns (F_k) e dos fatores específicos. Durante o processo de obtenção dos fatores são estimadas as cargas fatoriais (l_{ji}), as comunalidades (h_i), as variâncias específicas (ϵ_j) e os escores fatoriais (f_{jk}) que são medidas com propriedades explicativas de grande interesse para o pesquisador.

A carga fatorial é uma medida da correlação da variável com o fator. A comunalidade é a porção da variância de cada variável original proveniente dos fatores extraídos. O restante da variabilidade, que pode ser devida a outros fatores, é medida pela variância específica.

$$\begin{cases} X_1 = l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \dots + l_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ X_2 = l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \dots + l_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ X_j = l_{j1}F_1 + l_{j2}F_2 + \dots + l_{jm}F_m + \varepsilon_j \\ \vdots \\ X_p = l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \dots + l_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{cases} \quad (4)$$

Os escores fatoriais (Eq. 5) são estimativas para os valores dos fatores para cada elemento amostral. Podem ser utilizados para classificar os elementos amostrais ou como variáveis de entrada para outras análises estatísticas.

$$\underline{f}_i = (L'_z L_z)^{-1} L'_z (\underline{x}_i - \underline{x}), i=1,2, \dots, n \quad (5)$$

2.2 Séries Temporais

Um conjunto de observações (Z_t) acumuladas sequencialmente ao longo do tempo, com a característica de dependência serial, é denominado série temporal (BOX; JENKINS, 1976). Sua representação (Eq. 6) é realizada em função das componentes: tendência (T_t), sazonalidade (S_t), ciclo (C_t) e ruído aleatório (a_t).

$$Z_t = f(T_t, S_t, C_t, a_t) \quad (6)$$

A modelagem das séries temporais é realizada por meio de procedimentos computacionais que levam a equações de previsão de valores futuros, obtidas diretamente dos valores passados, sem o uso de uma teoria subjacente.

Modelos do tipo Autoregressivo Integrado Médias Móveis (ARIMA) de ordem (p, d, q) , conforme a Equação 7, com p parâmetros na porção autoregressiva, q parâmetros na parte de médias móveis e d diferenciações são indicados para a representação de séries temporais não estacionárias (BOX; JENKINS, 1976). Para séries temporais sazonais com correlação serial entre e dentro dos períodos sazonais é indicado o uso de modelos multiplicativos $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$. A não estacionariedade das séries temporais pode prejudicar a precisão dos modelos de previsão (LI; WANG; LIU, 2013). A utilidade da diferenciação é tornar a série estacionária na média. Para séries não

estacionárias na variância, a aplicação de uma transformação da família Box & Cox aos dados supre essa demanda (JOHNSON; WICHERN, 2007).

$$\phi(B)\nabla^d Z_t = \theta(B)a_t \quad (7)$$

Onde:

Z_t é a série temporal;

B é o operador de retardo;

$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ é o polinômio característico autoregressivo;

$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ é o polinômio característico média móveis;

a_t é o ruído aleatório;

$\nabla^d = (1 - B)^d$ é o operador de diferenciação.

A escolha do modelo que melhor representa uma série temporal, dentre os vários possíveis, deve ser feita com parcimônia. A utilização de um número elevado de parâmetros na modelagem pode não trazer benefícios quanto à qualidade do ajuste aos dados. Morettin (2004) indica a escolha do modelo que minimiza o Critério de Informação de Akaike (AIC), que, para modelos ARIMA (p, d, q), é calculado (Eq. 8) em função da estimativa da variância dos resíduos ($\hat{\sigma}_a^2$), do número de parâmetros do modelo (c) e do tamanho da série (n).

$$AIC = \ln(\hat{\sigma}_a^2) + c \frac{2}{n} \quad (8)$$

Após a definição do modelo para a série temporal, para gerar as previsões dos valores futuros, pode-se utilizar o procedimento incondicional *forecasting*. Enquanto que para prever os valores anteriores aos iniciais indica-se o procedimento *backforecasting*.

2.3 Cartas de Controle

Uma carta de controle é uma representação gráfica composta pelo gráfico de tendência da série de dados, a linha central (correspondente à média), o limite superior de controle (LSC) e o limite inferior de controle (LIC). Esses limites são escolhidos apropriadamente de acordo com a variabilidade do processo e o nível de confiança adotado, de maneira que, se o processo estiver sob controle, a totalidade dos pontos amostrais estará entre eles.

Na eventualidade de um ponto ficar fora dos limites, evidenciará que o processo está fora de controle, sendo necessária uma investigação e a correspondente ação corretiva para encontrar e eliminar a causa do problema. Outro indicativo de processo fora do controle é a localização de maneira sistemática ou não-aleatória dos pontos, mesmo dentro dos limites de controle. A distribuição de uma característica que está sob controle estatístico é estável e previsível (MONTGOMERY, 2009).

3. Metodologia

O método proposto neste trabalho tem por finalidade a elaboração de um Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem (IMCRB) que permita avaliar de forma global as respostas dos blocos de contrafortes de uma barragem, com base nos deslocamentos aferidos pela instrumentação e considerando a incidência de variação nas condições ambientais. As etapas do método encontram-se ilustradas na Figura 1 e são descritas a seguir.

A primeira etapa consiste na composição da matriz de dados amostrais, com a seleção dos instrumentos, a definição do período de tempo, a coleta de dados, o preenchimento de lacunas, identificação de valores atípicos e padronização dos dados, se necessário.

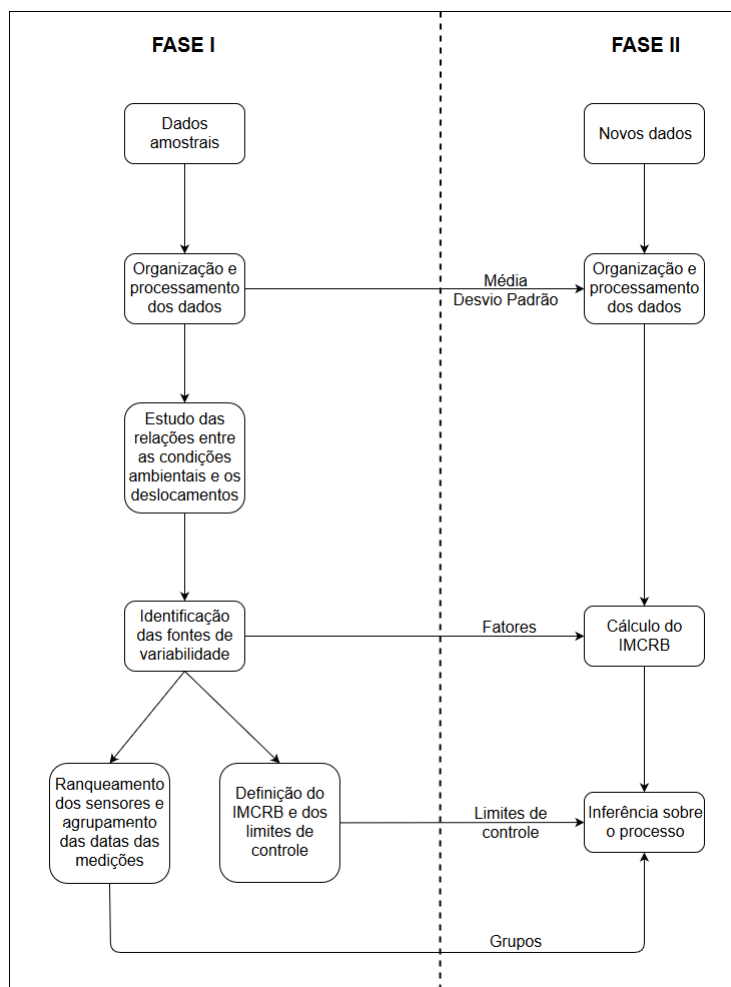
Na segunda, a matriz de dados amostrais é submetida à análise fatorial com a finalidade de estimar a influência das condições ambientais nos deslocamentos, realizar o ranqueamento dos instrumentos segundo a sua importância no modelo fatorial e identificar os fatores que mais influenciam a variabilidade dos dados.

O modelo para o IMCRB é elaborado na terceira etapa, por meio da combinação linear dos fatores, com valores estimados pelos escores fatoriais e pesos determinados pela média ponderada dos autovalores da matriz de correlação.

Em seguida, são criadas as cartas de controle para o IMCRB, com limites de confiança de 95% e 99%. Por fim, novos dados são inseridos e é realizada a avaliação do processo.

As análises e implementações foram realizadas com o auxílio do *software* livre R (R Core Team, 2015).

Figura 1: Fluxograma do método



Fonte: Elaborado pelos autores

4. Aplicação no contexto do monitoramento estrutural de barragens

O método proposto foi aplicado em um processo de monitoramento estrutural da Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada em Foz do Iguaçu-PR. O conjunto de dados utilizado era composto pelas observações registradas no período compreendido entre janeiro de 1990 e dezembro de 2013, que foram obtidas através das medições manuais da instrumentação instalada nos blocos chaves D7 e D8, blocos de contrafortes do Trecho D (Barragem Lateral Direita), e pelos dados hidrometeorológicos do mesmo período.

A instrumentação considerada era composta por 40 sensores (Tabela 1), entre pêndulos diretos, pêndulos invertidos, bases de alongâmetro, termômetros superficiais e extensômetros múltiplos de hastes. Também foram considerados os dados hidrometeorológicos: nível de água do reservatório e temperatura ambiente no entorno da

barragem. Sendo assim, foram computadas 42 variáveis, referentes aos sensores considerados neste estudo.

Tabela 1: Fenômenos monitorados pelos instrumentos e seus respectivos sensores

Fenômenos	Instrumentos	Sensores
Deslocamento radial	Pêndulos diretos	Z1, Z5
Deslocamento radial	Pêndulo invertido	Z3
Deslocamento tangencial	Pêndulos diretos	Z2, Z6
Deslocamento tangencial	Pêndulo invertido	Z4
Abertura e fechamento de juntas entre blocos	Bases de alongâmetro	Z7, Z9, Z11, Z13, Z15, Z17
Deslizamento horizontal entre blocos	Bases de alongâmetro	Z8, Z12, Z14, Z18
Recalque diferencial entre blocos	Bases de alongâmetro	Z10, Z16
Temperatura na superfície do bloco	Termômetros para concreto - jusante	Z19
Temperatura na superfície do bloco e da água do reservatório	Termômetros para concreto – montante	Z20
Deformações do maciço rochoso	Extensômetros múltiplos de hastes	Z21, ..., Z40
Temperatura ambiente	Termômetro	Z41
Nível de água do reservatório	Régua Limnimétrica	Z42

Fonte: Elaborado pelos autores

Dado que a periodicidade das medições aferidas junto aos diferentes instrumentos (sensores) não era a mesma, optou-se por utilizar as médias mensais das observações. A implementação de um procedimento computacional permitiu a geração das médias mensais das observações de cada um dos 42 sensores e identificar a existência e localização de lacunas, correspondentes a períodos (meses) em que não foram realizadas medições.

Constatou-se a existência de 8 séries incompletas, totalizando 15 lacunas, decorrentes da inexistência de medições em algum período. A previsão destes dados foi realizada utilizando modelos ARIMA e o procedimento *forecasting/backforecasting*.

Após completar as séries de dados dos sensores, procedeu-se à análise dos gráficos Box-Plot e de dispersão de cada série, em busca da ocorrência de valores atípicos. Foram identificados valores atípicos nos dados do nível de água do reservatório (Figura 2). A causa dessa ocorrência foi o baixo índice pluviométrico nos meses da estação do verão dos anos 1999/2000 e 2012/2013. Optou-se por manter os valores tal como observados, para verificar a influência desta ocorrência nas respostas da barragem.

A aplicação da análise fatorial por componentes principais resultou num modelo composto por cinco fatores, identificados com base nas maiores cargas fatoriais dos sensores, com capacidade de explicar 91,12% da variância do conjunto de observações (Tabela 2). Dessa forma, obteve-se a redução na dimensão do problema, com mínima

perda de informação, pois os fatores passaram a representar o conjunto de variáveis originais.

Figura 2: (a) Box-Plot e (b) Gráfico de dispersão do nível de água do reservatório (NAR) da barragem de Itaipu, no período compreendido entre jan/90 e dez/13

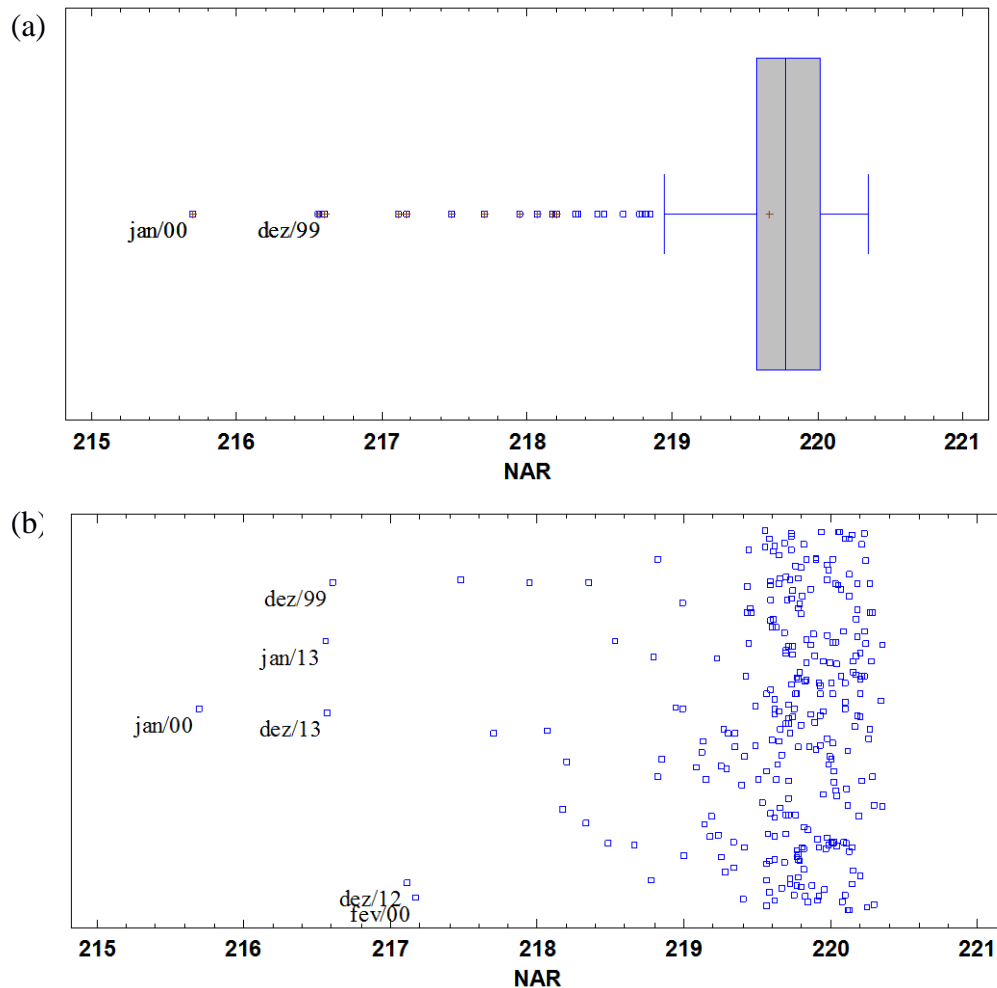


Tabela 2: Autovalores e variância explicada pelos principais fatores resultantes da aplicação da análise fatorial aos dados das 42 variáveis

Fator	Autovalor	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1	19,269	45,879	45,879
2	12,948	30,828	76,707
3	4,059	9,664	86,37
4	1,013	2,413	88,783
5	0,981	2,335	91,118
6	0,507	1,208	92,326
7	0,441	1,049	93,376

Fonte: Elaborado pelos autores

Os fatores foram nomeados de acordo com os sensores mais correlacionados com eles, isto é, conforme as maiores cargas fatoriais. O primeiro fator, por apresentar correlação positiva com a maioria dos sensores de extensômetros múltiplos de hastes, corresponde à “Movimentação da Fundação” (MF). Este foi o mais importante dos fatores identificados, pois responde por 45,88% da variabilidade observada no conjunto de dados.

O segundo fator, denominado “Movimentação Horizontal Relativa entre os Blocos D7 e D8” (MHRB), explicou 30,83% da variância e está associado às aberturas das juntas entre blocos da barragem e ao deslocamento horizontal no sentido normal (perpendicular ao sentido do fluxo da água).

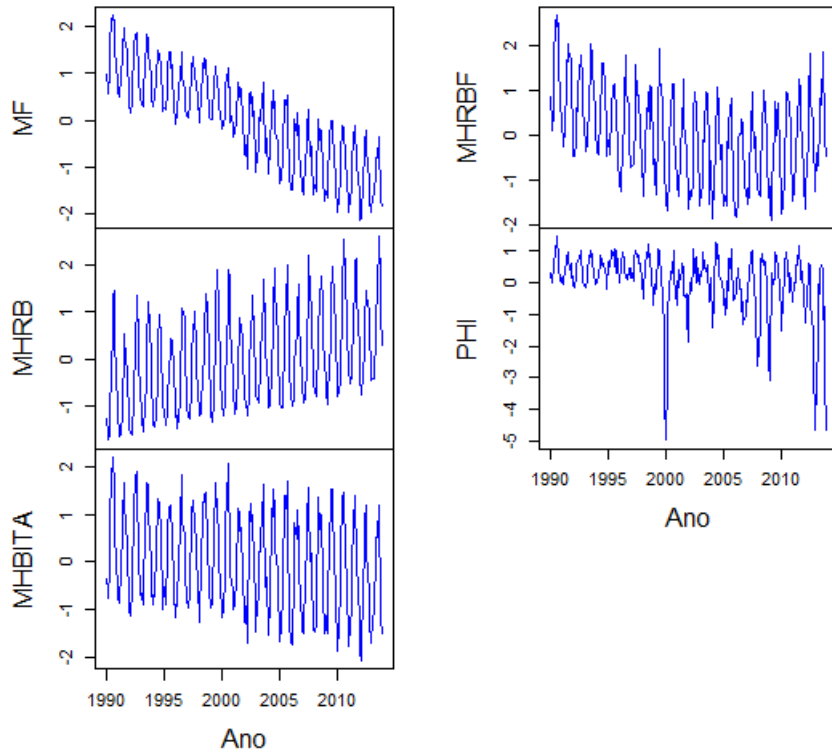
A “Movimentação Horizontal dos Blocos D7 e D8 por Influência Térmica Ambiental” (MHBITA), terceiro fator identificado, foi responsável por 9,66% da variabilidade. As variáveis dominantes neste fator foram os sensores das temperaturas e dos deslocamentos horizontais no sentido do fluxo da água do bloco D8.

O quarto e o quinto fatores, denominados “Movimentação Horizontal Relativa do Bloco D7 em relação à Fundação” (MHRBF) e “Pressão Hidrostática” (PHI), estavam relacionados aos deslocamentos horizontais no sentido do fluxo da água do bloco D7 e ao nível de água do reservatório, respectivamente. Além disso, o fator MHRBF respondeu por 2,41% da variabilidade total, enquanto que a influência de PHI foi de 2,34%.

A variabilidade presente nas leituras de cada sensor, advinda dos fatores identificados, foi estimada através da comunalidade. Utilizando esta como uma medida da importância de cada variável para o modelo fatorial, obteve-se o ranqueamento dos sensores. Assim os instrumentos mais importantes para os blocos D8 e D7 foram, respectivamente, as hastes de extensômetro múltiplo Z33, Z34, Z35 (mesmo furo de sondagem) e as bases de alongâmetro (abertura) Z7, Z9. Além disso, o nível de água do reservatório (Z42) foi a variável relacionada com as condições ambientais melhor classificada.

O fator, por ser uma variável latente, não pode ser medido diretamente. Sendo assim, os valores dos fatores, denominados escores fatoriais, foram estimados com base nas cargas fatoriais e nos valores dos sensores que dominam esse fator. A Figura 3 apresenta as séries temporais dos escores dos cinco fatores.

Figura 3: Séries temporais dos principais fatores que influenciaram os deslocamentos das estruturas de concreto da barragem de Itaipu, no período de jan/90 a dez/13



Fonte: Elaborado pelos autores

Por considerar que MF, MHRB, MHBITA, MHRBF e PHI são variáveis quantitativas que estão relacionadas com a variabilidade das respostas da barragem, esses fatores foram usados como parâmetros para a elaboração do Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da barragem (IMCRB). A formulação deste índice (Eq. 9) consistiu na combinação linear dos fatores, por meio da média ponderada dos escores fatoriais, com pesos estipulados pelos autovalores da matriz de correlação amostral (Eq. 10).

$$IMCRB = 0,46MF + 0,31MHRB + 0,10MHBITA + 0,0241MHRBF + 0,0233PHI \quad (9)$$

$$IMCRB_i = \frac{\sum_{k=1}^m \lambda_k f_{ik}}{p}, \text{ com } i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Onde:

λ_k é o k -ésimo autovalor da matriz de correlações;

f_{ik} é o i -ésimo escore do k -ésimo fator extraído;

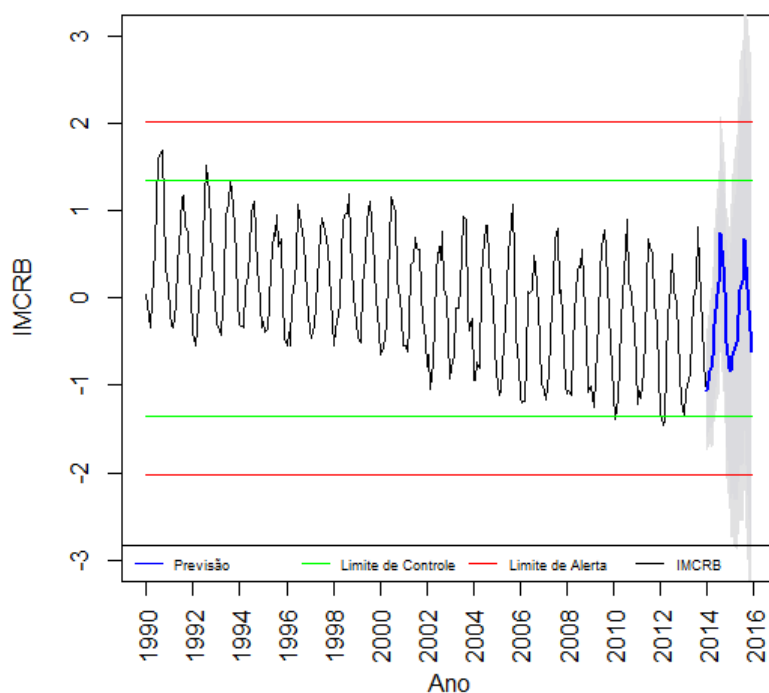
p é o número variáveis originais (sensores);

n é o número de observações tomadas para cada variável.

Este índice concentrou as informações dos fatores que, por sua vez, representaram o conjunto de observações dos sensores utilizados neste estudo. Portanto, o IMCRB apresentou grande potencial de informação a respeito do comportamento dos blocos D7 e D8 da barragem e pode ser utilizado no seu monitoramento.

Para tornar mais fácil o monitoramento desta nova variável, foi elaborada a carta de controle (Figura 4) para o IMCRB, com limites estipulados a dois e três desvios padrões, isto é, com 95% e 99% de probabilidade dos valores encontrarem-se entre esses limites, respectivamente. Observando a carta de controle, constatou-se que o processo estava sob controle (estável), o que permitiu a previsão dos valores para os próximos 24 meses.

Figura 4: Carta de controle para o Índice de Monitoramento Conjunto dos Blocos da Barragem



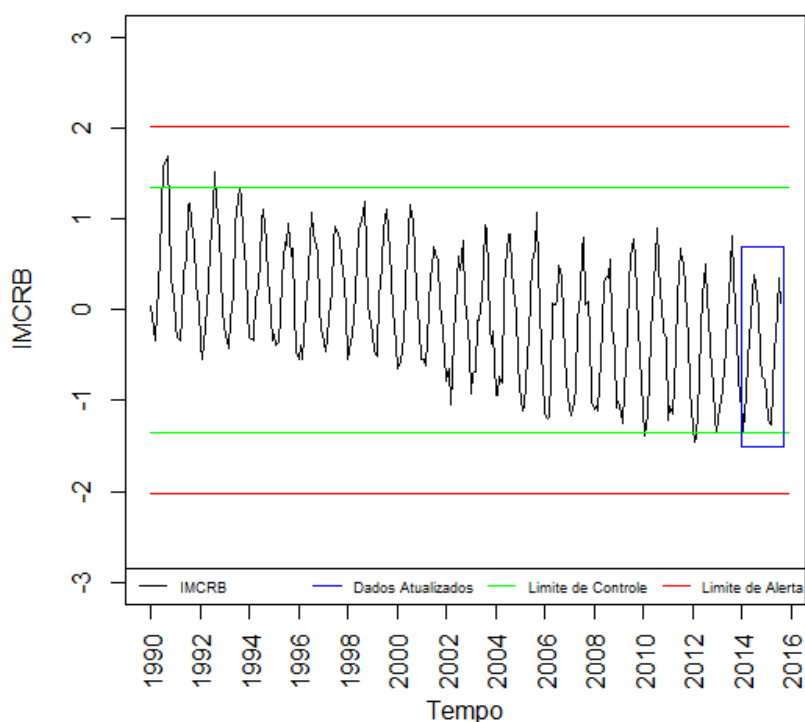
Fonte: Elaborado pelos autores

Para verificar a qualidade do ajuste do modelo, foram coletados novos dados, referentes aos meses de janeiro de 2014 a agosto de 2015, calculados os novos valores dos escores fatoriais e do IMCRB. Em seguida, os resultados obtidos foram plotados na carta de controle (Figura 5).

Os valores do IMCRB obtidos para os novos dados mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos e dentro do intervalo de confiança de previsão da série apresentada

na Figura 4. Portanto, o modelo foi considerado adequado para a representação das respostas dos blocos D7 e D8 da barragem, sujeitos à incidência de variações de temperatura e do nível de água do reservatório. Sendo assim, este índice pode ser utilizado para avaliação global do comportamento dos blocos.

Figura 5: Carta de controle do IMCRB atualizada



Fonte: Elaborado pelos autores

6. Conclusão

O método proposto neste artigo consiste na análise multivariada dos deslocamentos das estruturas e fundações de uma barragem de concreto, levando em consideração a influência das condições hidrometeorológicas.

Verificou-se que a maior parte da variabilidade dos dados das medições foi devida aos fatores: Movimentação da Fundação; Movimentação Horizontal Relativa entre os Blocos D7 e D8; Movimentação Horizontal dos Blocos D7 e D8 por Influência Térmica Ambiental; Movimentação Horizontal Relativa do Bloco D7 em relação à Fundação; Pressão Hidrostática.

O Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem, elaborado com base nesses cinco fatores identificados, mostrou-se adequado para a representação do comportamento estrutural de forma unificada dos dois blocos, e

apresentou-se como um processo estável e previsível. Este índice concentrou as informações, com mínima perda, de quatro condições hidrometeorológicas (temperatura ambiente, temperatura superficial do bloco a montante e a jusante e nível de água do reservatório) e de 38 sensores da instrumentação, os quais medem os possíveis deslocamentos das estruturas e fundações de dois blocos de contrafortes da barragem. Adicionalmente, o IMCRB permitiu a detecção de anormalidades no conjunto de dados.

A principal contribuição deste trabalho foi a proposição de um método para a análise conjunta dos dados dos deslocamentos das estruturas de uma barragem de concreto, das temperaturas e do nível de água do reservatório, que fornece informações úteis para o monitoramento da segurança estrutural da barragem, permite a identificação de anormalidades nos dados e auxilia a tomada de decisão quanto ao estado do processo. Salienta-se que os resultados obtidos retringem-se aos dois blocos de contrafortes da barragem e às variáveis consideradas no estudo. Para inferir a respeito da segurança estrutural da barragem em sua totalidade, sugere-se a aplicação do método com o conjunto de variáveis referentes às condições ambientais ampliados, considerando outros fenômenos e a replicação para outros blocos da barragem.

Agradecimentos

Os autores agradecem as contribuições das seguintes instituições:

- CEASB – Itaipu Binacional: suporte técnico e disponibilização dos dados;
- PROPPG – UTFPR: viabilização deste estudo via Portaria nº. 0398/2014;
- PPGMNE – UFPR: suporte teórico e incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

Referências

BANDO, F. M.; MARQUES, J. M.; PATIAS, J. Análise probabilística de árvore de falhas na gestão de segurança de barragens – Bloco D38 da barragem de Itaipu. In: XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

BOX, E. L. K.; JENKINS, G. M. **Time Series Analysis: forecasting and control**. Holden-Day, 1976.

BUZZI, M. F. Avaliação das correlações de séries temporais de leituras de instrumentos de monitoração geotécnico-estrutural e variáveis ambientais em barragens - estudo de caso de Itaipu. **Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia)**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CARVALHO, J. V.; ROMANEL, C. Redes neurais temporais aplicadas ao monitoramento de barragens. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação**, n. 10, 2007.

CHENG, L.; ZHENG, D. Two online dam safety monitoring models based on the process of extracting environmental effect. **Advances in Engineering Software**, v. 57, p. 48–56, mar. 2013.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2006.

DENG, N.; WANG, J.-G.; SZOSTAK-CHRZANOWSKI, A. Dam Deformation Analysis Using the Partial Least Squares Method. **In:** 13th FIG Int. Symp. on Deformation Measurements and Analysis & 4th IAG Symp. on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Lisbon, 2008.

FUSARO, T. C. Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piauí. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica)**, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GU, C. S.; Zhao, E.; Jin, Y.; Su, H. Singular value diagnosis in dam safety monitoring effect values. **Science China Technological Sciences**, v. 54, n. 5, p. 1169–1176, maio 2011.

GUEDES, Q. M.; DE FARIA, E. F. Modelo estatístico de controle do deslocamento monitorado na barragem casca da UHE Funil. **In:** XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belém, PA, 2007.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6. ed. Pearson, 2007.

KUPERMAN, S. C.; MORETTI, M. R.; CIFU, S.; CELESTINO, T. B.; RE, G.; ZOELLNER, K. **Criteria to establish limit values of instrumentation readings for old embankment and concrete dams**. 2005.

LI, F.; WANG, Z. Z.; LIU, G. Towards an error correction model for dam monitoring data analysis based on cointegration theory. **Structural Safety**, v. 43, p. 12–20, 2013.

MATA, J. Interpretation of concrete dam behaviour with artificial neural network and multiple linear regression models. **Engineering Structures**, v. 33, p. 903–910, 2011.

MATOS, S. F. Avaliação de instrumentos para auscultação de barragem de concreto. Estudo de caso: deformímetros e tensômetros para concreto na Barragem de Itaipu. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. Edgar Blücher, 2004.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. Disponível em <http://www.R-project.org/>. Acesso em 23 de maio de 2015.

RODRIGUES, S. B.; TEIXEIRA, L. L.; JÚNIOR, L. A. T.; DA SILVA, A. C. L.; SIQUEIRA, P. H.; FRANCO, E. M. C. Forecasting of the relative displacements in block II1 of the Itaipu hydroelectric plant dam through a ARIMA-SVR hybrid approach. **Espaço Energia**, n. 22, p. 28–37, 2015.

SANTOS, J. P.; CRÉMONA, C.; ORCESI, A. D.; SILVEIRA, P. Multivariate statistical analysis for early damage detection. **Engineering Structures**, v. 56, p. 273 – 285, nov. 2013.

VASCONCELOS, G. R. L. DE. **Plano de implantação e acompanhamento do instrumental de auscultação de estruturas de concreto - obra de Itaipu**. Itaipu Binacional, Divisão de Controle de Concreto,, 1978.

VILLWOCK, R.; STEINER, M. T. A.; DYMINSKI, A. S.; CHAVES NETO, A. Itaipu Hydroelectric Power Plant Structural Geotechnical Instrumentation Temporal Data Under the Application of Multivariate Analysis - Grouping and Ranking Techniques. **Multivariate Analysis in Management, Engineering and the Sciences**. InTech, 2013. p. 81–102.

YU, H. WU, Z. R.; BAO, T. F.; ZHANG, L. Multivariate analysis in dam monitoring data with PCA. **Science China Technological Sciences**, v. 53, n. 4, p. 1088–1097, 2010.

YU-QING, Z.; YAN-LIANG. Temperature Prediction of RCC Based on Partial Least-Squares Regression. **Energy Procedia**, v. 17, Part A, p. 326–332, 2012.

JOINT MONITORING OF THE STRUCTURAL DISPLACEMENTS OF THE BLOCKS OF A CONCRETE DAM

Abstract

The evaluation of the responses of the structures of a dam is a complex problem that requires the use of reliable and effective methods. This study makes use of factor analysis, time series and control charts for the joint analysis of monitoring data, aiming to reduce the size of the problem, help diagnose and decision making on the displacements of the structures of dam and predict the values in the medium term. The Joint Monitoring Index Blocks Responses resulting from the application of the method, enables global assessment of the behavior of the foothills blocks of a dam in the presence of variability in environmental conditions. The results indicate that the process is under control, it is stable and foreseeable.

Keywords: *Monitoring of Dams, Displacement, Environmental Conditions, Factor Analysis, Time Series, Control Charts.*