

## Modelagem do IMCRB pelo método da máxima verossimilhança aplicado aos blocos de uma barragem de concreto.

### IMCRB modelling by the maximum likelihood method applied to the blocks of a concrete dam.

#### RESUMO

O monitoramento de barragens é efetuado a partir de um conjunto de técnicas na qual a interpretação de dados e respostas de instrumentos, informa a situação da estrutura mecânica da barragem. Para isto, são utilizados instrumentos como: piezômetros, extensômetros múltiplos de hastes, bases de alongômetro e pêndulos, com o objetivo em comum de medir os deslocamentos relativos e absolutos das estruturas da barragem. Visto a elevada quantidade de instrumentos utilizados, um grande conjunto de leituras dos instrumentos são gerados, necessitando de uma análise conjunta para retirar informações dos dados. Para a avaliação do comportamento da barragem é indicado o uso do índice de monitoramento conjunto das respostas dos blocos da barragem (IMCRB), que representa a globalidade das leituras dos instrumentos. Este índice é formulado por meio da análise fatorial, um método multivariado que sintetiza um conjunto de variáveis em um grupo de fatores com iguais características. Neste artigo foi modelado o IMCRB de três blocos de concreto de uma barragem, por meio do método da máxima verossimilhança para extração das cargas fatoriais, possibilitando a análise da variabilidade dos dados dos três blocos estudados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise fatorial. Instrumentação. Segurança de barragens.

#### ABSTRACT

Dam monitoring is based on a set of techniques in which the interpretation of data and instrument responses informs the situation of the dam's mechanical structure. For this, instruments such as Piezometers, Extensometer, Deformeter and Pendulums are used, with the common objective of measuring the relative and absolute displacements of the dam structures. Given the large number of instruments used, a large set of instrument readings are generated, requiring a joint analysis to extract information from the data. To evaluate the dam behavior, it is indicated the use of the dam monitoring block joint monitoring index (IMCRB), which represents the overall readings of the instruments. This index is formulated through factor analysis, a multivariate method that synthesizes a set of variables into a group of factors with equal characteristics. In this paper, the IMCRB of three concrete blocks of a dam was modeled by the maximum likelihood method for factor load extraction, allowing the analysis of data variability of the three studied blocks.

**KEYWORDS:** Factorial Analysis. Instrumentation. Safety of Dam and Structural .

**Guilherme Lopes de Campos**  
[guilherme\\_lopescampos@hotmail.com](mailto:guilherme_lopescampos@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil

**Sheila Regina Oro**  
[sheilaro@utfpr.edu.br](mailto:sheilaro@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil

**Tereza Rachel Mafioleti**  
[mafioleti@utfpr.edu.br](mailto:mafioleti@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Auscultação é o conjunto de procedimentos e instrumentos que permitem avaliar as condições físicas e mecânicas da barragem. Dentre esses instrumentos, há os piezômetros, para monitoramento das subpressões, os pêndulos diretos que medem os deslocamentos horizontais relativos da crista do bloco, os extensômetros múltiplos de hastes que registram o recalque e as bases de alongâmetro que medem abertura, deslizamento e recalque entre blocos. (SILVEIRA,2006)

O índice de monitoramento conjunto das respostas dos blocos da barragem (IMCRB), é um índice estatístico que representa o comportamento global dos instrumentos de uma barragem de concreto. Para modelar o IMCRB, são utilizados dados referentes aos instrumentos previamente selecionados, os quais são submetidos à análise fatorial (ORO,2016).

O objetivo deste estudo foi realizar a modelagem do IMCRB para três blocos de uma barragem, com cargas fatoriais estimadas pelo método da máxima verossimilhança e analisar a variabilidade dos dados de cada bloco.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo foram disponibilizados pelo Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens, referente às leituras obtidas manualmente, no período de 1991 a 2018, dos instrumentos instalados nos blocos chaves D38, D54 e D57. A tabela 1 apresenta a quantidade de instrumentos de cada bloco considerados neste estudo.

Tabela 1: Tipos de instrumentos e quantidade submetidos à análise fatorial

Bloco	Piezômetro	Extensômetro	Base de Alongâmetro	Pêndulo Direto
D38	11	6	6	4
D54	8	8	6	8
D57	9	8	6	8

Fonte : Autoria própria (2019).

Inicialmente os dados de cada bloco foram organizados numa matriz, contendo as médias mensais das leituras padronizadas dos instrumentos. Em seguida, foram aplicados os testes de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de normalidade. O teste para normalidade multivariada de dados foi efetuado através do gráfico da distância quadrada dos escores em função da estatística qui-quadrada dos escores fatoriais obtidos após aplicação da análise fatorial. Para verificação da normalidade multivariada o gráfico deve apresentar relação linear, divergindo dessa característica, os dados não apresentam normalidade multivariada.

Cada matriz de dados foi, então, submetida à análise fatorial, com as cargas fatoriais estimadas por máxima verossimilhança. Para a estimação dos escores fatoriais, utilizou-se o método de Thomson. A determinação do número de fatores foi feita com base na Análise Paralela de Horn e Critério de Kaiser, sendo escolhido o método que apresentasse o menor número de fatores. Por fim, procedeu-se à modelagem do IMCRB para cada bloco, por meio da média ponderada dos fatores, com pesos estimados com base nos autovalores da matriz de correlação.

As análises e implementações foram realizadas com o apoio do software *MATLAB* versão 2018.b com *Toolbox : Statistics and Machine Learning Toolbox (Mathworks,2019)*.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adequação dos dados para aplicabilidade da análise fatorial foi verificada pelo KMO, índice que varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo da unidade, melhor a adequação. Os valores obtidos para o KMO (Tabela 2) indicaram que os três blocos apresentavam dados adequados para a realização da análise fatorial.

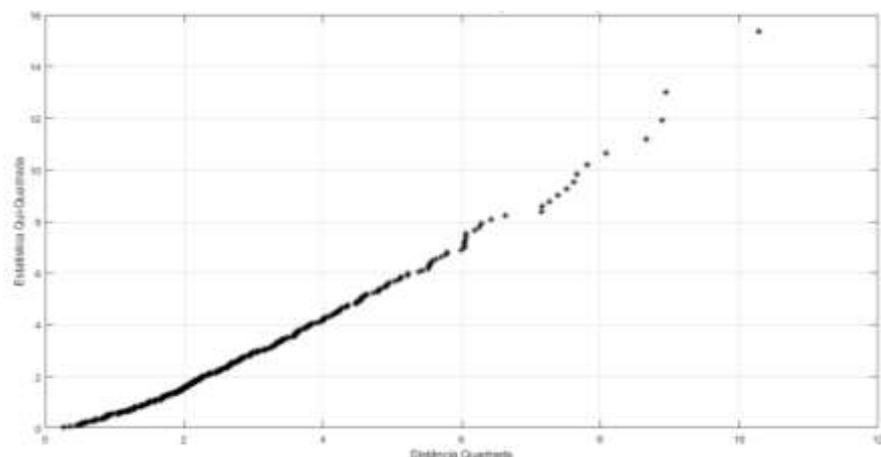
Tabela 2: Medidas de adequação dos dados para a análise fatorial

Bloco Chave	Índice KMO
D37	0.8379
D54	0.8488
D57	0.8500

Fonte : Aatoria própria (2019).

A aplicação da análise fatorial pelo método da máxima verossimilhança requer a verificação da normalidade multivariada dos dados. Os dados dos três blocos apresentaram característica linear aceitando, portanto, a hipótese de normalidade multivariada dos dados. A Figura 1 apresenta o gráfico que comprova a normalidade multivariada do bloco D54.

Figura 1: Teste de aderência Qui-Quadrado da normalidade multivariada do bloco-chave D54



Fonte: Aatoria própria (2019).

Procedeu-se, então à quantificação do número de fatores a serem extraídos. O método da APH indicou que nos blocos D37 e D54 3 fatores seriam suficientes e 4 fatores no D57.

Comprovada a aplicabilidade da análise fatorial e obtenção do número de fatores, aplicou-se o modelo fatorial nos dados, obtendo os escores fatorais necessários para o IMCRB e os pesos de cada fatores. Modelou-se, então, o IMCRB para cada bloco, conforme as equações (1), (2) e (3).

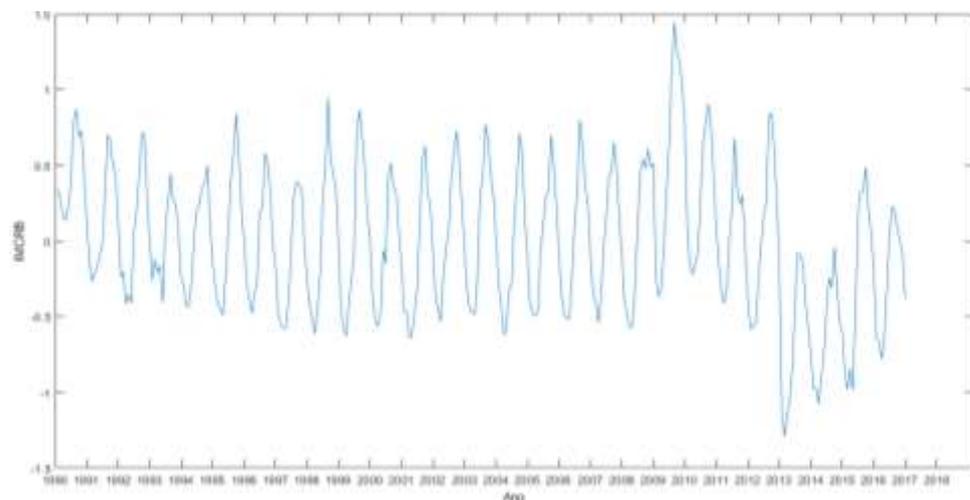
$$IMCRB_{D38} = 0.39E_1 + 0.28E_2 + 0.09E_3 \quad (1)$$

$$IMCRB_{D54} = 0.36E_1 + 0.28E_2 + 0.10E_3 \quad (2)$$

$$IMCRB_{D57} = 0.39E_1 + 0.29E_2 + 0.08E_3 + 0.06E_4 \quad (3)$$

A partir da equação (1), juntamente com os escores fatorais, obteve-se série temporal do IMCRB do bloco D38 (Figura 2). O modelo fatorial representou 76% da variabilidade dos dados dos instrumentos deste bloco, sendo considerado um ótimo resultado. As oscilações do IMCRB indicaram, como esperado, a ocorrência de sazonalidade nos períodos verã-inverno, de iguais magnitudes no período de 1990 a 2010, com alteração no perfil a partir de 2011.

Figura 2 : Série temporal do IMCRB do bloco-chave D38

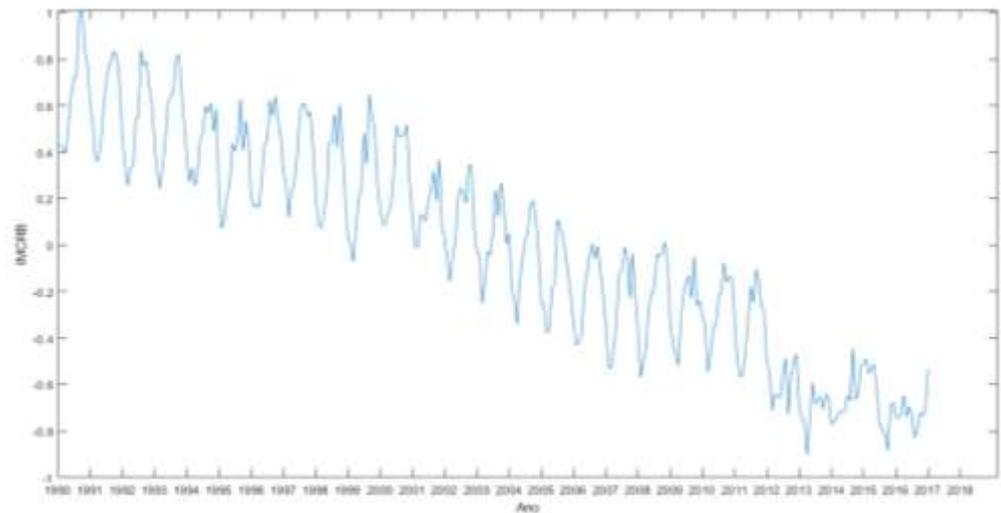


Fonte : Autoria própria (2019).

Analogamente, utilizou-se a equação (2), com os respectivos escores fatorais, obteve-se a série temporal do bloco D54 (Figura 3). Os dados apresentaram tendência decrescente, com estacionariedade na variância e não na média. As amplitudes de oscilações são constantes até o período de 2014, havendo mudança de padrão a partir de 2015. O modelo fatorial representou 74% da variabilidade dos dados desse bloco.

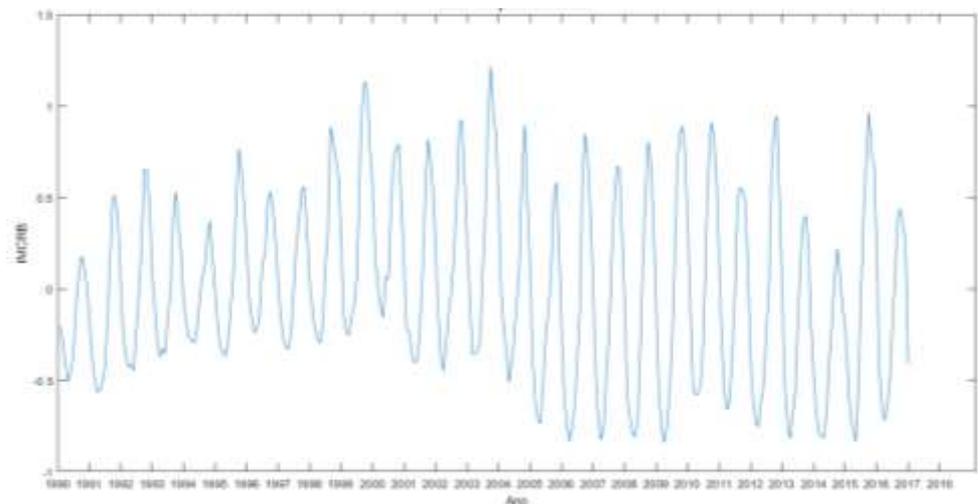
A partir da equação (3), foi gerada a série do IMCRB do bloco D57 (Figura 4). As amplitudes das oscilações mostraram-se crescentes, com sazonalidade de verão-inverno. O índice deste bloco apresentou estacionariedade na média e não na variância. O modelo fatorial representou 81,6% da variabilidade dos dados.

Figura 3: Série temporal do IMCRB do bloco-chave D54



Fonte : (Autores,2019)

Figura 4: Série temporal do IMCRB do bloco chave D57



Fonte : (Autores,2019)

## CONCLUSÃO

Analisando os resultados do IMCRB para os três blocos estudados, foi possível observar que o método da máxima verossimilhança para extração das cargas fatoriais, foi eficaz devido a qualidade da representação e agrupamentos de dados, visto pelo alto índice KMO e pela variabilidade total explicada em cada bloco. Sendo que, em média, o modelo fatorial representou 77,5% da variabilidade das leituras dos instrumentos. A metodologia do IMCRB, possibilitou o agrupamento de sensores com medidas correlacionadas e formulação do índice para cada um dos três blocos. O alto valor da variabilidade explicada pelo IMCRB, infere-se que o modelo fatorial resulta em pouca perda de informação na redução das variáveis.

### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Parque Tecnológico Itaipu (PTI) e do Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB).

### REFERÊNCIAS

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ORO, S. R. **Índice de Monitoramento do Comportamento Estrutural dos Blocos de Concreto de Barragens – Uma Abordagem Multivariada**. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia). UFPR, Curitiba, 2016.

MathWorks. *Statistics and Machine Learning Toolbox – Documentation*. Disponível em : < <https://www.mathworks.com/products/statistics.html> > Acesso em: 12 ago 2019.