

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO ORO LUCINI

**CORRELAÇÃO ENTRE OS INSTRUMENTOS DE SEGURANÇA PRESENTES NO
BLOCO CHAVE F35/36 DA BARRAGEM PRINCIPAL DE ITAIPU COM O IMCRB**

PATO BRANCO

2021

LEONARDO ORO LUCINI

**CORRELAÇÃO ENTRE OS INSTRUMENTOS DE SEGURANÇA PRESENTES NO
BLOCO CHAVE F35/36 DA BARRAGEM PRINCIPAL DE ITAIPU COM O IMCRB**

**Correlation between the safety instruments present in key block f35/36 of the
main itaipu dam with the JMIBR**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa

PATO BRANCO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LEONARDO ORO LUCINI

**CORRELAÇÃO ENTRE OS INSTRUMENTOS DE SEGURANÇA PRESENTES NO
BLOCO CHAVE F35/36 DA BARRAGEM PRINCIPAL DE ITAIPU COM O IMCRB**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado como requisito para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 24/dezembro/2021

Ney Lyzandro Tabalipa

Doutorado em Geologia pela Universidade Federal do Paraná
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco

Danilo Rinaldi Bisconsini

Doutorado em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco

José Ilo Pereira Filho

Doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco

PATO BRANCO

2021

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Parque Tecnológico Itaipu (PTI), do Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB) e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Brasil.

Aos meus pais Karen e Clóvis, pela paciência e por entenderem minhas ausências.

Ao professor orientador, Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa, pelos ensinamentos, atendimentos e por acreditar na minha capacidade.

À banca examinadora, composta pelo Prof. Dr. Danilo Rinaldi Bisconsini e também pelo Prof. Dr. Ilo Pereira Filho, que estiveram dispostos a conhecer do trabalho realizado.

EPÍGRAFE

A vontade de se preparar tem que ser maior do
que a vontade de vencer. Vencer será
consequência da boa preparação.
(Bernardino)

RESUMO

O tema segurança de barragens vem sendo muito debatido atualmente. É necessário encontrar métodos que auxiliem no monitoramento delas. Para isso, existem técnicas estatísticas de análise multivariada que aliadas às técnicas de monitoramento, visam avaliar a confiabilidade da estrutura. O Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem (IMCRB) foi obtido neste estudo com base na análise fatorial dos dados das leituras coletadas entre os anos de 2001 e 2019 nos instrumentos de segurança instalados no bloco chave F35/36 da barragem principal de Itaipu. O objetivo principal deste estudo foi de compreender quais são os instrumentos mais correlacionados com a modelagem, e a partir disso identificar os possíveis fenômenos aos quais o bloco chave está suscetível. Por fim, identificou-se que os instrumentos mais correlacionados foram os Pêndulos Diretos, Bases de Alongâmetro, Medidores Triortogonais e os Extensômetros Múltiplos de Hastes, resultando assim nos fenômenos citados ao fim do trabalho.

Palavras-chave: Monitoramento de Barragens; Instrumentação de Segurança; Análise Fatorial; IMCRB.

ABSTRACT

The issue of dam safety has been much discussed nowadays. It is necessary to find methods to help monitoring them. For this, there are statistical techniques of multivariate analysis that, together with monitoring techniques, aim to assess the reliability of the structure. The Joint Monitoring Index Blocks Responses (JMIBR) was obtained in this study based on the factor analysis of data from the informations collected between the years 2001 and 2019 of the safety instruments installed in the F35/36 key block of the main Itaipu dam. The main objective of this work was to understand which instruments are most correlated with modeling, and from that to identify the possible events the key block is susceptible. Finally, it was identified that the most correlated instruments were the Direct Pendulums, Elongometer Bases, Triorthogonal Gauges and Multiple Rod Extensometers, thus resulting in the events mentioned at the end of the work.

Keywords: Dam Monitoring; Security Instrumentation; Factor Analysis; JMIBR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Barragem Principal de Itaipu (Trecho F)	14
Figura 2 - Correlação entre tipos de instrumentos e deterioração de barragens de concreto	15
Figura 3 - Base de Alongômetro e respectivos componentes e acessórios	16
Figura 4 - Esquema de instalação de um extensômetro múltiplo de hastes	17
Figura 5 - Esquema de instalação de pêndulos direto e invertido	18
Figura 6 - Esquema do medidor triortogonal de juntas do tipo Sinco	19
Figura 7 - Esquema de um piezômetro de tubo aberto	19
Figura 8 - Fluxograma do estudo	22
Figura 9 - Corte bloco chave F35/36	23
Figura 10 - Script para padronização dos dados tabulados	24
Figura 11 - Script e resultado para o Teste de Bartlett	25
Figura 12 - Script e resultado para o Critério de Kaiser-Meyer-Olkin	25
Figura 13 - Script e resultado da Análise Paralela de Horn	26
Figura 14 - Script da Análise Fatorial	26
Figura 15 - Gráficos das séries temporais obtidos pela APH	30
Figura 16 - Gráfico da série temporal do IMCRB	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Precisão dos principais métodos de extração de fatores	21
Tabela 2 - Comunalidade de cada instrumento	27
Tabela 3 - Cargas fatoriais de cada instrumento	28
Tabela 4 - Proporções explicativas da modelagem.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
1.2	JUSTIFICATIVA	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Barragens	14
2.2	Segurança de barragens	15
2.3	INSTRUMENTOS DE MONITORAMENTO	16
2.3.1	Bases de Alongâmetro	16
2.3.2	Extensômetros Múltiplos de Hastes.....	16
2.3.3	Pêndulo Direto e Invertido	17
2.3.4	Medidores Triortogonais	18
2.3.5	Piezômetros.....	19
2.4	ANÁLISE FATORIAL	20
2.5	ÍNDICE DE MONITORAMENTO CONJUNTO DAS RESPOSTAS DOS BLOCOS DA BARRAGEM	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1	Teste de Bartlett e Critério de Kaiser-Meyer-Olkin	25
4.2	Análise fatorial aplicada no conjunto de dados	26
4.3	ÍNDICE DE MONITORAMENTO CONJUNTO DAS RESPOSTAS DOS BLOCOS DA BARRAGEM para o bloco chave f35/36	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

As estruturas construídas transversalmente a um rio ou talvegue que tem como objetivo elevar seu nível d'água e/ou de criar um reservatório de acumulação de água seja de regulação das vazões do rio, seja de outro fluido, recebem o termo de Barragem (MSIB, 2002, p.15). Barragens são consideradas obras primas da engenharia, portanto requerem extremos cuidados ao se tratar de segurança. Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens do Ministério da Integração Nacional da Agência Nacional de Águas (MSIB, 2002, p.18), “uma barragem segura é aquela cujo desempenho satisfaça as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais”.

Segurança de barragens consiste num programa de vigilância, que deve ter um planejamento e uma implantação cuidadosa (AHMADINEDUSHAN, 2002). Segundo o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas (ANA,2016, p.76) “o Plano de Monitoramento e Instrumentação deve ser elaborado na fase de projeto e adaptado nas fases posteriores, de modo a incorporar as alterações que forem necessárias”. O Manual ainda afirma que,

a localização exata e os detalhes de instalação dos instrumentos devem ser fornecidos e complementados com desenhos de plantas, vistas e seções transversais. Devem também ser indicadas, para cada um dos instrumentos, a respectiva leitura inicial, valores de referência para futuras medições, dados e requisitos para calibração, faixas normais de operação e níveis de alarme, valores para os quais uma revisão detalhada das leituras é necessária (p.76).

Através da instrumentação, e da interpretação dos dados obtidos, é possível estudar ações que tem como objetivo remediar efeitos indesejados por meio do enfraquecimento de suas causas (SILVEIRA, 2003).

A Análise Fatorial, que é fruto da Análise Multivariada, é uma das técnicas estatísticas que aliadas a instrumentação, permite compreender o comportamento da barragem ao longo do tempo (HAIR et al, 2009). A partir dessa técnica que foi desenvolvido o Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem (IMCRB), que tem como objetivo representar o conjunto de observações

dos sensores utilizados em um mesmo estudo, reduzindo ao máximo a perda de informação (ORO, 2016).

Portanto, com base nas observações realizadas pelos instrumentos do bloco chave F35/36 presente na Barragem Principal de Itaipu, o objetivo principal deste estudo é correlacionar a importância da instrumentação com a modelagem do IMCRB para o bloco. Com isso, será possível compreender o comportamento do bloco da barragem ao longo do tempo, bem como os principais fenômenos que impactaram nos deslocamentos sofridos por ele.

Para tanto, este trabalho foi desenvolvido nos seguintes capítulos, o primeiro abrange a introdução ao tema, justificativa, e os objetivos; o segundo contemplou o referencial teórico, que abordou o tema segurança de barragens, instrumentação e também o IMCRB; no terceiro capítulo foi apresentado a metodologia, onde é explicado desde a etapa de estudo sobre instrumentação, passando pelo levantamento de dados e finalizando com a modelagem do índice; e por fim os resultados e as devidas interpretações deste trabalho, finalizando com as considerações finais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo analisar os dados da Instrumentação de Barragens de Concreto com a modelagem do ÍNDICE DE MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS BLOCOS DE CONCRETO DE BARRAGENS (IMCRB) para um Bloco Chave localizado na Barragem Principal da Usina de ITAIPU.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Modelar o IMCRB para o Bloco Chave;
- Identificar os instrumentos que apresentam maior correlação com o modelo;
- Verificar os fenômenos que implicaram nos principais deslocamentos sofridos pelo bloco da barragem.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segurança de barragens é um tema muito discutido atualmente. Uma vez que barragens são obras de grande magnitude, sendo necessário extremos cuidados em relação a sua segurança. Com isso, a instrumentação de barragens aliada a técnicas estatísticas, permitem compreender o comportamento da barragem ao longo do tempo.

O monitoramento de barragens abrange desde a instrumentação até as inspeções visuais de segurança, permitindo assim o controle das condições da estrutura. O IMCRB, que foi desenvolvido por Oro (2016) em sua tese “Índice de monitoramento do comportamento estrutural dos blocos de concreto de barragens – uma abordagem multivariada”, vem para auxiliar as técnicas já existentes de monitoramento de barragens.

Para a realização deste trabalho foi necessário entrar em contato com o Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (Ceasb) – Parque Tecnológico de Itaipu (PTI), com o intuito de ser voluntário da instituição. Com isso, se fez possível a obtenção dos dados de monitoramento dos instrumentos de segurança presentes no Bloco Chave que será estudado. Por fim, com o auxílio de softwares, onde o *R* é grátis e o *MatLab* tem licença disponibilizada para alunos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, foi possível a realização da modelagem do IMCRB.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Barragens

Segundo o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas (2016, p.16), é classificado como barragem “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”.

Atualmente, há diversos tipos de barragens, caracterizadas de acordo com o projeto e o objetivo específico, como por exemplo, barragens de enrocamento, de terra, de concreto do tipo gravidade, gravidade aliviada, em arco, etc. O estudo realizado trata-se da análise de um bloco de uma barragem de concreto do tipo gravidade aliviada (Figura 1), e portanto, o foco será mantido neste exemplo de barragem.

Barragens do tipo gravidade aliviada são as que apresentam espaços vazios em seu núcleo visando a redução do volume de concreto empregado. Quando comparada à gravidade maciça de concreto, contata-se a economia no volume e diminuição das áreas sobre as quais podem existir subpressões e a pressão intersticial (SCHREIBER, 1977). Entretanto, o autor destaca a inconveniência do grande número de juntas de vedações necessárias na barragem de gravidade aliviada.



Figura 1 - Barragem Principal de Itaipu (Trecho F)

Fonte: Autoria própria, 2021.

2.2 Segurança de barragens

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens do Ministério da Integração Nacional (2002, p.18), “uma barragem segura é aquela cujo desempenho satisfaça as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais”. Pode-se garantir a segurança de uma barragem por meio de:

- Correção de qualquer deficiência prevista ou constatada;
- Operação segura, continuada, manutenção e inspeção;
- Preparação adequada para emergências.

É dever do proprietário assegurar que as atividades de operação, manutenção, monitoramento, instrumentação e inspeção sejam realizadas de acordo com as normas vigentes, e realizadas por profissionais qualificados (MSIB, 2002).

A respeito do monitoramento de barragens, o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens diz que:

O monitoramento de barragens inclui a instrumentação do corpo da barragem e das estruturas extravasoras, bem como das respectivas fundações, de modo a permitir a medição de um conjunto de grandezas criteriosamente selecionado, que em conjunto com as inspeções de segurança, permita controlar as condições de segurança dessas estruturas... (2016, p. 76).

A Figura 2 traz um esquema que representa os principais instrumentos utilizados e seus respectivos fenômenos monitorados.

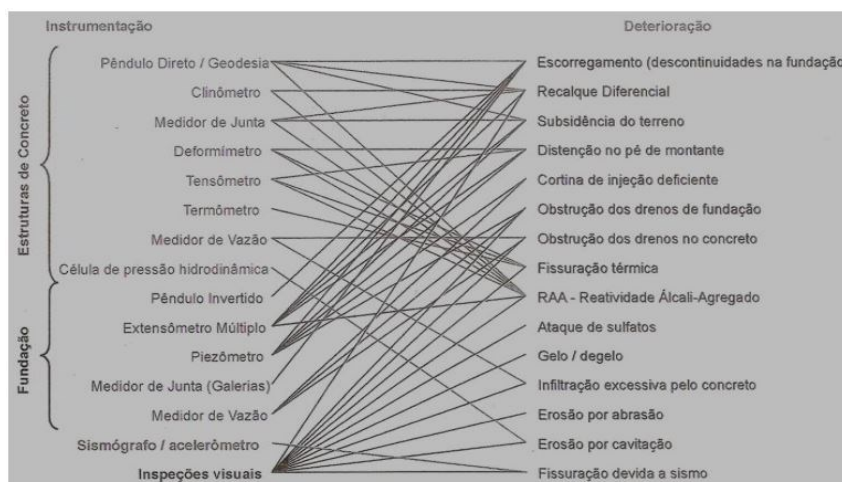


Figura 2 - Correlação entre tipos de instrumentos e deterioração de barragens de concreto

Fonte: Silveira, 2003.

2.3 INSTRUMENTOS DE MONITORAMENTO

2.3.1 Bases de Alongômetro

São instrumentos que possibilitam medir deslocamentos relativos horizontais e verticais entre as juntas dos blocos da barragem. A leitura é realizada por um dispositivo acoplado a um relógio comparador. A Base de Alongômetro (Figura 3) é responsável pela medição dos deslocamentos de abertura-fechamento e deslizamento de juntas ou fissuras (MARTINS, 2016).



Figura 3 - Base de Alongômetro e respectivos componentes e acessórios

Fonte: MARTINS, 2016.

2.3.2 Extensômetros Múltiplos de Hastes

O Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da ANA (2016, p.90), define esses extensômetros como instrumentos “constituídos por hastes metálicas ou cabos em fibra de vidro, instalados em furos de sondagem na fundação e ancorados a uma determinada profundidade”. No mesmo furo podem ser colocados diversas hastes, ancoradas a diferentes profundidades.

Rosetas de três extensômetros de haste (Figura 4), sendo um vertical e dois inclinados a 30° em relação à vertical, podem ser utilizados para mensurar os deslocamentos da fundação em relação ao ponto de ancoragem (SILVEIRA, 2003). A haste na vertical é responsável pela medição diretamente do recalque da fundação, enquanto as inclinadas medem deslocamentos angulares.

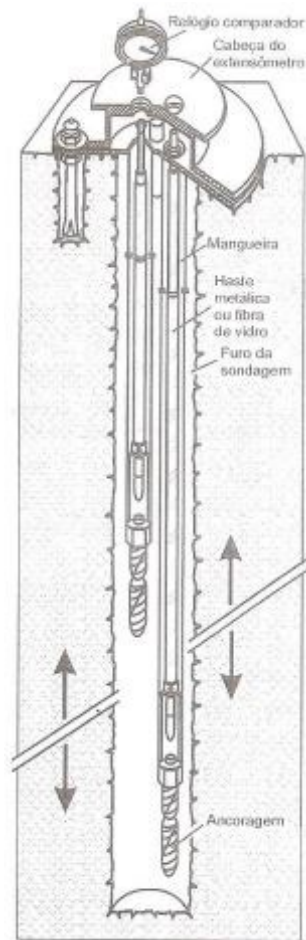


Figura 4 - Esquema de instalação de um extensômetro múltiplo de hastes

Fonte: Silveira, 2003.

2.3.3 Pêndulo Direto e Invertido

Por meio da associação dos valores observados entre os pêndulos diretos e invertidos (Figura 5) é possível medir os deslocamentos horizontais da barragem, sendo que o pêndulo direto é indicado para a medição dos deslocamentos horizontais da crista, enquanto para os deslocamentos cisalhantes da base da barragem são usados os pêndulos invertidos (SILVEIRA, 2003).

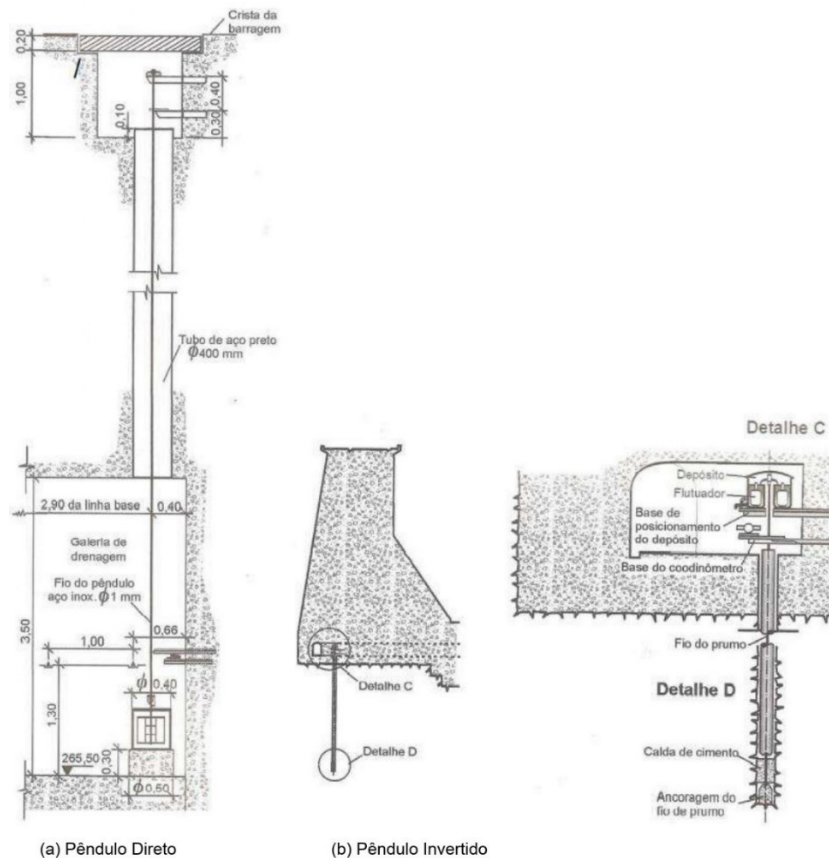


Figura 5 - Esquema de instalação de pêndulos direto e invertido

Fonte: Adaptado de SILVEIRA, 2003.

2.3.4 Medidores Triortogonais

O medidor triortogonal (Figura 6) tem a finalidade de registrar os deslocamentos diferenciais em juntas e fissuras de barragens. Segundo o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da ANA (2016, p.91) “estes instrumentos, colocados em locais facilmente acessíveis (crista, pisos, galerias, zonas acessíveis do paramento de jusante), permitem medir as três componentes do movimento relativo entre os bordos da junta”.

Os deslocamentos medidos pelos medidores triortogonais podem ser:

- Recalques diferenciais entre blocos;
- Deslocamentos cisalhantes horizontais;
- Movimentos de abertura-fechamento de juntas.

Além disso, é importante ressaltar que, os medidores triortogonais são instrumentos que vem substituindo as bases de alongâmetro, uma vez que possuem a capacidade de medir deslocamentos nas três direções, ao invés de apenas duas.

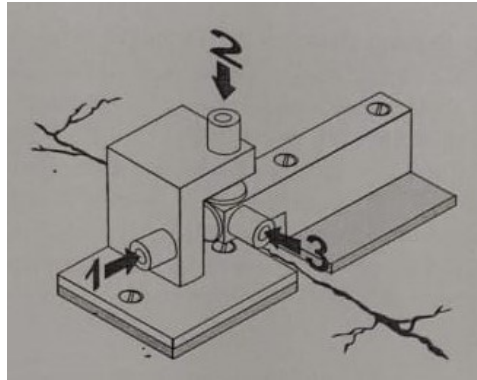


Figura 6 - Esquema do medidor triortogonal de juntas do tipo Sinco

Fonte: SILVEIRA, 2003.

2.3.5 Piezômetros

Os piezômetros permitem a medição das pressões da água no interior do corpo da barragem ou na fundação, e podem ser de diversos tipos. Dentre eles, o piezômetro *standpipe* é um dos que mais ganha destaque.

Os piezômetros *standpipe*, ou também conhecido como “piezômetro de tubo aberto” (Figura 7), são um dos instrumentos mais confiáveis para a observação das poropressões e das subpressões em barragens de terra (SILVEIRA, 2006), porém também são utilizados em fundações de barragens de concreto. Segundo Silveira (2003), “para uma boa locação desse instrumento, deve-se proceder a realização de testes de perda d’água ao longo de trechos com 3 m de comprimento, durante a perfuração das sondagens”.

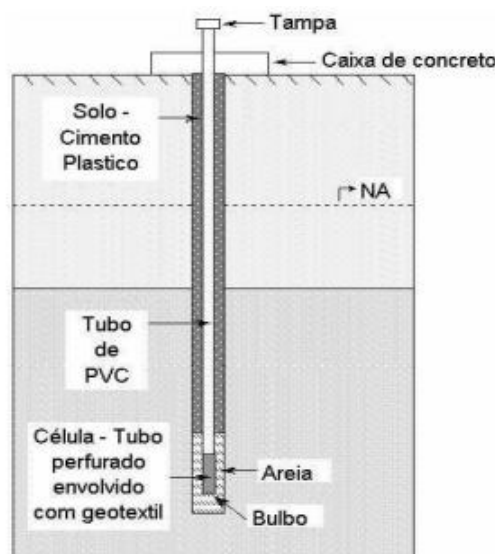


Figura 7 - Esquema de um piezômetro de tubo aberto

Fonte: Fonseca, 2003.

2.4 ANÁLISE FATORIAL

Segundo Lattin, Carrol e Green (2011, p.8), “a análise fatorial, diz respeito à identificação de fontes subjacentes de variação comuns a duas ou mais variáveis (chamadas fatores comuns)”. Os autores também afirmam que “o objetivo da análise fatorial exploratória é identificar esses fatores comuns (separados dos fatores específicos) e explicar sua relação com os dados observados”. Com isso, por meio da análise fatorial grande números de variáveis observáveis são reduzidas a um menor número de fatores comuns, permitindo assim uma melhor interpretação da correlação dessas variáveis.

Conforme Ferreira (2018, p. 460), “os fatores comuns são responsáveis pela explicação tanto das variâncias quanto das covariâncias, enquanto as variáveis específicas contribuem somente para as variâncias das variáveis originais consideradas no modelo”. De acordo Silva, Marques e Nieradka (2015), “a análise fatorial possibilita o tratamento das leituras dos instrumentos como variáveis aleatórias, permitindo gerar fatores altamente correlacionados e encontrar relações entre eles que não são facilmente observáveis”.

Entretanto, para que seja possível aplicar a Análise Fatorial, é necessário que a amostra seja aprovada em dois testes estatísticos, são eles: Teste de Esfericidade de Bartlett (Equação 1) e o Critério Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). O teste de Esfericidade de Bartlett tem como objetivo rejeitar a hipótese nula de que a matriz de correlações é igual à matriz identidade. O coeficiente KMO (Equação 2) varia entre 0 e 1 e quanto mais próximo de 1 melhor a adequação da amostra.

$$T = - \left[n - \frac{1}{6} (2p + 11) \right] \sum_{j=1}^p \ln \hat{\lambda}_j \quad (1)$$

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} r^2_{i \neq j}}{\sum_{i \neq j} r^2_{i \neq j} + \sum_{i \neq j} q^2_{i \neq j}} \quad (2)$$

Existem diferentes procedimentos para realizar a extração de fatores para a análise fatorial. Laros (2012) detalha sobre a utilização e a precisão desses métodos, apresentados na Tabela 4. Apesar da Análise Paralela de Horn (APH) ser o mais preciso, devido à falta de conhecimento a seu respeito e de não estar disponível nos principais pacotes estatísticos existentes, ele é pouco utilizado (ORO, 2016).

Tabela 1 - Precisão dos principais métodos de extração de fatores

MÉTODO	PRECISÃO	COMENTÁRIO
CK	22%	Tendência a superestimação
Scree	57%	Tendência a superestimação
MMCPV	84%	Tendência a subestimação
APH	92%	Tendência a superestimação

Fonte: Adaptado de LAROS (2012)

2.5 ÍNDICE DE MONITORAMENTO CONJUNTO DAS RESPOSTAS DOS BLOCOS DA BARRAGEM

O Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem (IMCRB) tem como objetivo concentrar as informações dos fatores que, por sua vez, representam um conjunto de observações dos sensores utilizados neste trabalho, com mínima perda de informação (ORO, 2016). O IMCRB é formulado (Equação 3) por meio da média ponderada dos escores fatoriais, com pesos estipulados pelos autovalores da matriz de correlação amostral.

$$IMCRB = \frac{\sum_{k=1}^m \lambda_k f_{ik}}{p} \text{ com } i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

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 de variáveis originais (sensores);

n é o número de observações tomadas para cada variável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho busca correlacionar a instrumentação de um bloco da barragem principal de Itaipu com a modelagem do Índice de monitoramento do comportamento estrutural dos blocos de concreto de barragens.

A pesquisa irá apresentar caráter quantitativo-qualitativo. Quantitativa referente a modelagem dos dados dos instrumentos de segurança por meio de *software*. Já na qualitativa pela compreensão da importância da instrumentação de barragens, bem como a localização e a função de cada um dos instrumentos presentes no bloco em estudo.

Ao se tratar dos objetivos da pesquisa, pode-se classificá-la como exploratória, uma vez que ela se baseia em pesquisa bibliográfica atrelada a um estudo específico de técnicas estatísticas. Os dados dos instrumentos de segurança serão disponibilizados pelo Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (Ceasb – PTI). A seguir, será apresentado um fluxograma, onde o intuito é uma melhor visualização do trabalho em si.

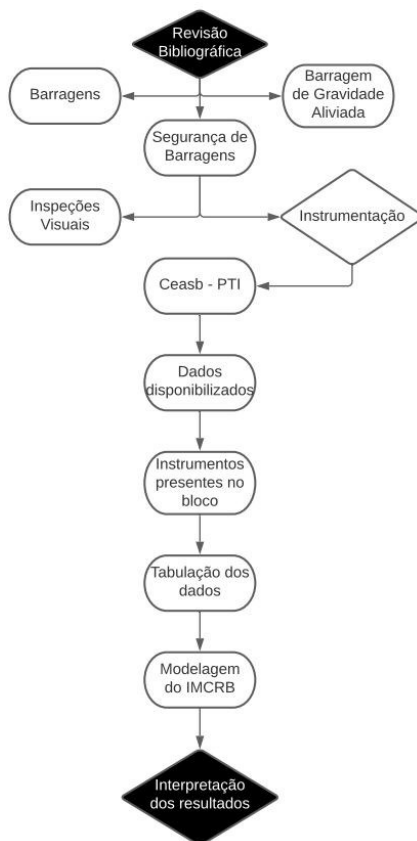


Figura 8 - Fluxograma do estudo

Fonte: Autoria Própria, 2021.

A primeira etapa do trabalho constituiu-se em uma revisão bibliográfica acerca de barragem de gravidade aliviada e segurança de barragens, onde será possível compreender a importância da instrumentação delas.

Na segunda etapa, estudou-se quais os instrumentos presentes no bloco em estudo. Nesta etapa, será possível identificar a função de cada instrumento, assim como a sua localização no bloco. Com isso, será iniciado o procedimento de tabulação dos dados para a última etapa.

Por fim, a última etapa do trabalho, resumiu-se na modelagem dos dados tabelados, e na interpretação dos resultados obtidos.

Para a realização do presente trabalho, foi necessário entrar em contato com o Ceasb-PTI para o recebimento dos dados a serem trabalhados. Os dados se referem as leituras dos instrumentos de segurança presentes no bloco chave F35/36 da Barragem Principal de Itaipu.

O bloco em estudo possui 110 m de altura sem tomada d'água ou conduto forçado e não tem uma cavidade completamente fechada e está localizado na Barragem Principal de Itaipu.

Os instrumentos que estão localizados no Bloco Chave F35/36 e que foram considerados neste trabalho são: bases de alongâmetro, extensômetros múltiplos de hastes, pêndulo direto e invertido, medidores triortogonais e piezômetros. A Figura 9 representa um corte do bloco da barragem com a localização dos instrumentos instalados no mesmo.

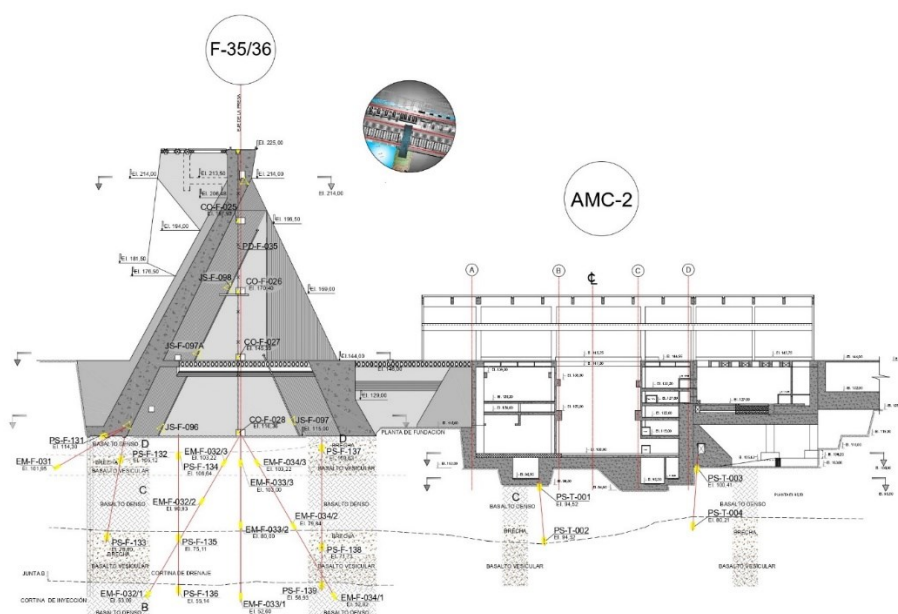


Figura 9 - Corte bloco chave F35/36

Fonte: CEASB-ITAIPU, 2015.

Após o recebimento dos dados, alguns procedimentos tiveram de ser feitos, uma vez que a modelagem não é realizada com os dados brutos recebidos.

O primeiro procedimento realizado foi a determinação da série temporal que seria utilizada no estudo, e por meio de interpretações nos gráficos dos instrumentos, buscando o maior período de tempo e que englobasse o maior número de instrumentos, foi determinado que o estudo seria de janeiro de 2001 a dezembro de 2019, englobando 39 instrumentos. Com isso, pode-se elaborar a matriz de médias mensais da série temporal, etapa que foi realizada com auxílio do *software* MatLab (2020). A matriz de médias mensais, como o próprio nome já diz, realiza as médias das leituras mensais de um mesmo instrumento, quando este apresentar mais de uma leitura em um mesmo mês.

Feito isso, é necessário realizar a padronização dos dados, uma vez que o trabalho vai englobar diferentes instrumentos de segurança, e que possuem diferentes unidades de medida. Para isso, implementou-se o script (Figura 10) abaixo no *software* R, este que representa a Equação 4.

$$Z_i = \frac{X_i - \hat{X}}{s} \quad (4)$$

Onde a variável Z (adimensional) será igual a razão entre uma amostra de uma variável menos média amostral pelo desvio padrão.

```
22 #Padronizacao dos dados
23
24 x <- apply(dados,2,mean)
25 y <- apply(dados,2,sd)
26 dados <- scale(dados,x,y)
27 dados
```

Figura 10 - Script para padronização dos dados tabulados

Fonte: Software R, 2021.

O último procedimento realizado foi a identificação e o ajuste de valores atípicos, estes que podem prejudicar a modelagem. E por meio do *software* R (2020), utilizando a sintaxe *tsoutliers*, foram identificados e ajustados 132 valores. Além de identificar estes valores, o próprio *software* também realiza uma previsão de quais valores seriam mais adequados.

Feito esses procedimentos, o conjunto de dados está pronto para a aplicação do Teste de Esfericidade de Bartlett e o Critério Kaiser-Meyer-Olkin, e a partir da aprovação nesses testes será possível a aplicação da Análise Fatorial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão divididos em três etapas. A primeira se refere ao teste de Bartlett e ao Critério de Kaiser-Meyer-Olkin, ou seja, pré análise fatorial. Após isso, serão apresentadas informações que são provenientes da análise fatorial, sendo elas: comunalidades e cargas fatoriais dos instrumentos, e a explicação acumulativa do modelo. Por fim, será apresentado o gráfico dos fatores obtidos, assim como também o gráfico do IMCRB, com suas respectivas interpretações.

4.1 Teste de Bartlett e Critério de Kaiser-Meyer-Olkin

Para aplicar estes dois testes estatísticos utilizou-se do *software* R (2020), onde foi implementado os seguintes *scripts* (Figura 11 e 12).

```
34 ### VIABILIDADE DA ANALISE FATORIAL ###
35
36 # Teste de esfericidade de Bartlett
37 # H0: R = I H1: R != I
38 # Se Tcalc >= T_95 rejeita-se H0 ao nivel de significancia de 5%
39 # verifica-se que as variaveis respostas sao correlacionadas (nao sao independentes)
40
41 n <- nrow(dados); # total de observacoes
42 p <- ncol(dados); # total de variaveis
43 auto <- eigen(R); # autovalores e autovetores da matriz de correlacoes
44 a <- log(auto$values); # $values sao os autovalores, $vectors sao os autovetores
45 um <- cbind(rep(1,p));
46 lambda = a%%um;
47 Tcalc = -(n-(1/6)*(2*p+11))*(lambda); Tcalc
48 g1=(1/2)*p*(p-1);
49 T_95 <- qchisq(0.95,g1); T_95
50
> Tcalc = -(n-(1/6)*(2*p+11))*(lambda); Tcalc
[1,] 17550.77
> g1=(1/2)*p*(p-1);
> T_95 <- qchisq(0.95,g1); T_95
[1] 805.438
```

Figura 11 - Script e resultado para o Teste de Bartlett

Fonte: *Software* R, 2021.

```
66 # coeficiente KMO quanto mais proximo de 1 maior a adequacao
67 # se KMO < 0,5 inadecuado
68 iddiag <- seq(1, by = p + 1, length = p);
69 somar2 <- sum((as.numeric(R)[-idiag])^2);
70 cat("\n KMO = ",somar2 / (somar2 + sum((as.numeric(matcorp)[-idiag])^2)))
71
72 # indice de adequacao amostral por variavel. valores aceitaveis > 0,5
73 for (j in 1:p) {
74 somar2j <- sum(R[j, -j]^2)
75 cat("\n MAA", j, "=", somar2j / (somar2j + sum(matcorp[j, -j]^2)))
76 }
77
KMO = 0.9307899
```

Figura 12 - Script e resultado para o Critério de Kaiser-Meyer-Olkin

Fonte: *Software* R, 2021.

Pode-se observar que, no resultado do Teste de Bartlett foi obtido que $T_{calc} > T_{.95}$ (destacados pelos retângulos vermelhos na Figura 10), ou seja, fica comprovado que a matriz de correlações é diferente da matriz identidade. Em seguida, o coeficiente KMO obtido foi de aproximadamente 0,93, e uma vez que quanto mais próximo da unidade melhor a adequação da amostra, pode-se afirmar que a amostra selecionada é devidamente adequada.

Portanto, a partir dos resultados obtidos é possível aplicar a análise fatorial no conjunto de dados.

4.2 Análise fatorial aplicada no conjunto de dados

A análise fatorial foi aplicada para um conjunto de 5 fatores, onde este número foi obtido a partir da implementação do *script* abaixo (Figura 13).

```
78 ### SELECAO DO NUMERO DE FATORES ###
79 ## Análise Paralela de Horn - APH ##
80 Rep <- 1000;
81 Cent <- 0.95;
82 library(nFactors); #Carrega o pacote que possui a funcao "parallel"
83 ap <- parallel(subject=n,var=p,rep=Rep,cent=Cent);
84 apAutovet <- ap$eigen;
85 results <- nscee(eig = auto$values,aparallel=apAutovet$gevpea); results
```

	noc	naf	nparallel	nkaiser
1	5	1	5	6

Figura 13 - Script e resultado da Análise Paralela de Horn

Fonte: Software R, 2021.

Como é possível observar, a partir da Análise Paralela de Horn (APH) foi obtido o número de 5 fatores, enquanto para o Critério de Kaiser obteve-se 6 fatores, ambos destacados pelo retângulo vermelho. Com o intuito de melhor concentrar as informações, optou-se por trabalhar com o menor número de fatores entre os obtidos.

Após a definição do número de fatores foi aplicado a análise fatorial a partir do seguinte *script* (Figura 14), e com isso obteve-se as informações citadas no início deste capítulo.

```
library(psych)
af<-fa(dados, nfactors=k, fm = "ml",rotate = "varimax")
summary(af)
```

Figura 14 - Script da Análise Fatorial

Fonte: Software R, 2021.

A comunalidade representa o quão bem o instrumento está correlacionado com a modelagem, e para isso é necessário que o valor da mesma esteja

preferencialmente acima de 0,5. Os valores das comunalidades de cada um dos instrumentos envolvidos no trabalho estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Comunalidade de cada instrumento

Instrumentos	Comunalidades	Instrumentos	Comunalidades
x1	0,296	x21	0,689
x2	0,700	x22	0,299
x3	0,912	x23	0,991
x4	0,854	x24	0,756
x5	0,799	x25	0,940
x6	0,459	x26	0,832
x7	0,762	x27	0,982
x8	0,801	x28	0,987
x9	0,874	x29	0,988
x10	0,855	x30	0,984
x11	0,882	x31	0,946
x12	0,889	x32	0,924
x13	0,290	x33	0,804
x14	0,239	x34	0,881
x15	0,971	x35	0,944
x16	0,907	x36	0,608
x17	0,846	x37	0,982
x18	0,896	x38	0,963
x19	0,967	x39	0,960
x20	0,182		

Fonte: Autoria própria, 2021.

Analisando a tabela, nota-se que 5 instrumentos apresentaram comunalidade abaixo do valor recomendado. Estes instrumentos que representam 1 Piezômetro e 4 Extensômetros Múltiplos de hastes. Com isso, é necessário tomar uma decisão, seja de retirá-los da modelagem ou de mantê-los. Neste caso, por se tratar de um número reduzido de instrumentos em relação ao total envolvido no estudo optou-se por mantê-los a fim de aproveitar o maior número de informações possíveis.

Em contrapartida, a carga fatorial representa o quão bem o instrumento está correlacionado com cada um dos fatores obtidos. Nesse caso, quanto mais próximo de 1 ou -1, melhor correlacionado está o instrumento com aquele determinado fator. Na Tabela 3, é possível visualizar os valores das cargas fatoriais obtidas para cada um dos instrumentos.

Tabela 3 - Cargas fatoriais de cada instrumento

Instrumentos	Fatores/Cargas Fatoriais				
	F1	F2	F3	F4	F5
x1		0,161		0,261	-0,443
x2	-0,179	0,468	0,523	-0,405	0,107
x3	-0,240	0,670	0,442	-0,140	0,438
x4	-0,268	0,748	0,459		
x5	-0,228	0,784	0,280	-0,205	-0,112
x6	-0,388	0,513			-0,187
x7	0,779	-0,236	-0,187	-0,217	-0,129
x8	0,813	-0,347		0,123	
x9	0,917			0,112	-0,129
x10	0,859	-0,249		0,221	
x11	0,916			0,125	-0,146
x12	0,872			0,334	-0,111
x13	0,204		-0,149	0,421	-0,211
x14	-0,166				0,438
x15	-0,238	0,315	0,304		0,847
x16	-0,191	0,292	0,223		0,857
x17	-0,266	0,791	0,264	-0,271	
x18	-0,266	0,857	0,197	-0,225	
x19	-0,267	0,849	0,293	-0,230	0,192
x20		-0,101	-0,377		0,169
x21	-0,122	0,794	-0,158		-0,133
x22		0,508			0,201
x23	0,145	-0,393		0,848	-0,134
x24	0,167	0,840		0,141	
x25	0,385	-0,258		0,848	
x26	0,110	-0,880	-0,127	0,172	
x27	0,980				
x28	-0,727	0,606	0,211	-0,130	0,174
x29	0,978			0,129	-0,114
x30	-0,814	0,502	0,132	-0,148	0,173
x31	0,568	-0,143	-0,721	0,101	-0,269
x32	0,666		-0,606	0,117	-0,309
x33		-0,767	0,399	0,206	
x34	0,466		-0,679	0,288	-0,334
x35	0,564	-0,314	-0,583	0,312	-0,300
x36	0,231		0,605	0,341	0,259
x37	-0,685	0,638	0,235	-0,149	0,170
x38	0,931	-0,199	-0,117	0,189	
x39	-0,812	0,451	0,168	-0,209	0,161

Fonte: Autoria própria, 2021.

Cada instrumento pode ou não estar correlacionado com cada um dos fatores. Um exemplo disso, é o instrumento x9, que está muito bem correlacionado com o primeiro fator (F1), porém não há correlação com o segundo e terceiro Fator. As cargas fatoriais destacadas na tabela representam qual o principal fator que cada um dos instrumentos está mais bem correlacionado.

Foi realizado a plotagem dos gráficos das séries temporais dos 5 fatores (Figura 15), onde é possível visualizar o comportamento dele.

Finalizando esta etapa, outra informação que é importante ressaltar é a porcentagem de explicação do modelo. Na Tabela 4 é possível verificar a porcentagem proporcional e acumulativa da modelagem realizada.

Tabela 4 - Proporções explicativas da modelagem

Fatores	F1	F2	F3	F4	F5
Explicação proporcional	0,305	0,237	0,096	0,077	0,076
Explicação acumulada	0,305	0,542	0,638	0,715	0,791

Fonte: Aatoria própria, 2021.

Nota-se que, a explicação acumulativa resultou em 79,1%, resultado que pode ser considerado muito bom. Além disso, é importante citar que apenas os fatores 1 e 2 já são responsáveis pela explicação de aproximadamente 54,2% da modelagem.

Por fim, foi realizado a plotagem dos gráficos das séries temporais dos 5 fatores obtidos (Figura 17) com o intuito de visualizar o comportamento de cada um deles, bem como as características que eles transferem para o gráfico do IMCRB, que será apresentado no próximo tópico.

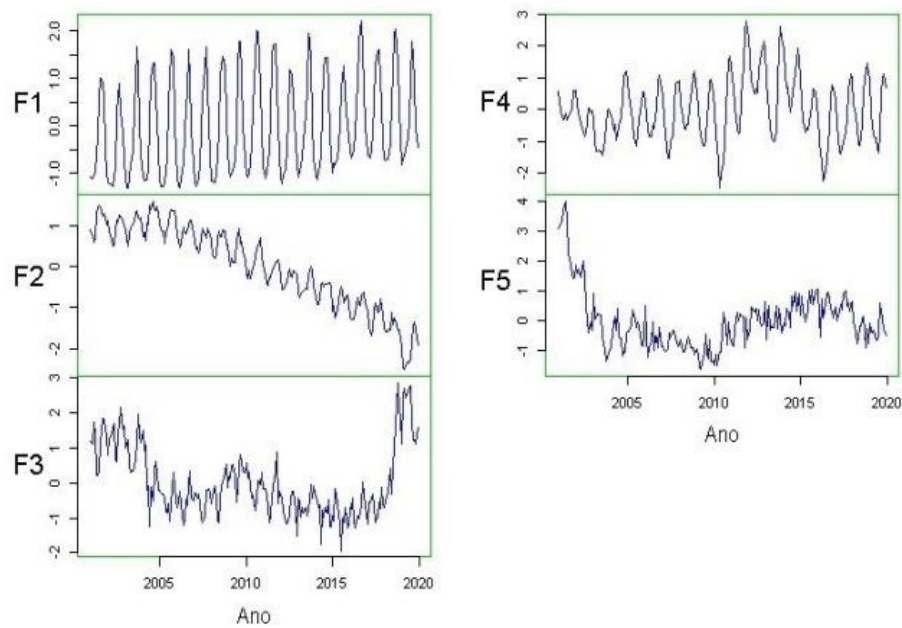


Figura 15 - Gráficos das séries temporais obtidos pela APH

Fonte: Software R, 2021.

Pode-se observar que o primeiro fator (F1) apresenta a característica de sazonalidade inverno-verão bem definida. E com base na tabela de cargas fatoriais, nota-se que os instrumentos que mais estão correlacionados com este fator são x9, x11, x27, x29 e x38. Estes códigos representam pêndulos diretos, bases de alongâmetro e medidores triortogonais.

Por outro lado, o segundo fator (F2) apresenta característica decrescente. E de forma análoga ao primeiro fator, os instrumentos que mais estão correlacionados a este fator são x18, x19, x24 e x26. Neste caso, os códigos representam extensômetros múltiplos de hastes e bases de alongâmetro.

A mesma análise foi realizada para os outros fatores, porém como os dois primeiros são de maior significância, apenas será citado diretamente os instrumentos com maior correlação com cada um deles. Portanto, para o terceiro, quarto e quinto fator, os instrumentos que mais se destacaram foram bases de alongâmetro, medidores triortogonais e extensômetros múltiplos de hastes respectivamente.

4.3 ÍNDICE DE MONITORAMENTO CONJUNTO DAS RESPOSTAS DOS BLOCOS DA BARRAGEM para o bloco chave f35/36

Após a interpretação das informações provenientes da análise fatorial, é realizado a implementação do IMCRB com base nas proporções que cada um dos fatores explica o modelo. Com isso, obtém-se o gráfico da série temporal do IMCRB (Figura 16).

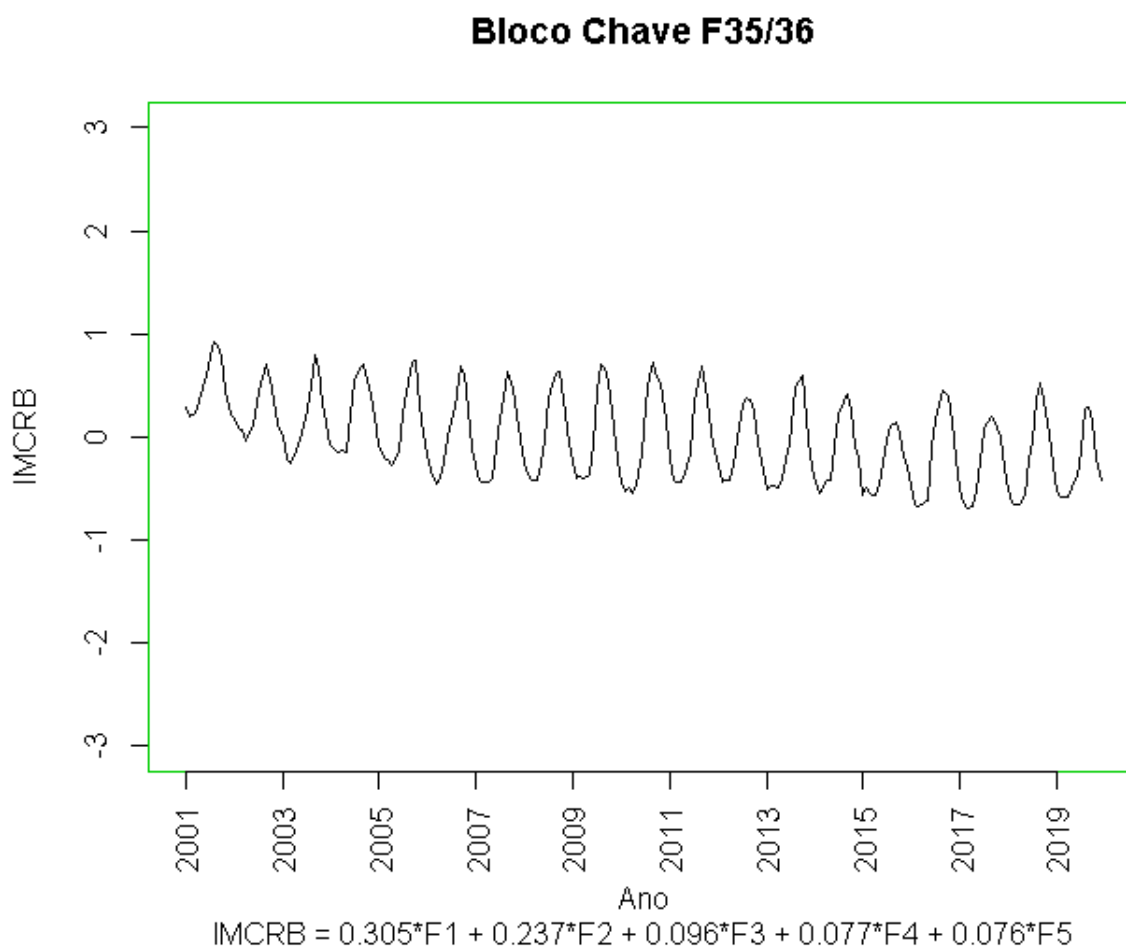


Figura 16 - Gráfico da série temporal do IMCRB

Fonte: Software R, 2021.

Como era de se esperar, o comportamento dos gráficos dos fatores é transferido para o IMCRB de maneira proporcional. Por este motivo que apenas é possível visualizar as características dos dois primeiros fatores, sendo elas a sazonalidade e a tendência decrescente respectivamente. No gráfico do IMCRB, diferentemente do segundo fator, a tendência decrescente é muito leve, portanto, podemos afirmar que o IMCRB para o bloco chave F35/36 é estável na média a

curto/médio prazo. Em relação a variabilidade, o gráfico permanece estável até mesmo a longo prazo, uma vez que apresenta a característica de sazonalidade bem definida.

Uma vez que conhecemos os instrumentos que melhor representam cada um dos fatores, é possível afirmar também os instrumentos que melhor estão correlacionados com o IMCRB. Ou seja, os instrumentos mais correlacionados com o IMCRB modelado são as bases de alongâmetro, extensômetros múltiplos de hastes, pêndulos diretos e medidores triortogonais.

Sabendo disso, é possível ter uma noção dos principais fenômenos causadores dos deslocamentos sofridos pelo bloco em estudo, estes que estão dispostos a seguir.

- Pêndulos Diretos: Deflexão da estrutura de concreto, rotação da base da estrutura devido à deformabilidade da fundação, influências térmicas ambientais;
- Bases de Alongâmetro: A variação do nível do reservatório, influências térmicas ambientais e eventuais deformações permanentes;
- Medidores triortogonais: Recalques diferenciais entre blocos, deslocamentos cisalhantes horizontais e movimento de abertura-fechamento das juntas;
- Extensômetros múltiplos de hastes: Recalque diferencial da fundação e deslocamentos angulares.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A instrumentação de barragens é indiscutivelmente importante para a segurança delas. Por meio dos instrumentos instalados é possível acompanhar os deslocamentos sofridos por ela.

Com isso, este estudo vem para auxiliar no monitoramento de barragens de concreto, principalmente na tomada de decisões finais pelo corpo de engenheiro responsáveis. Uma vez que a interpretação de um gráfico (IMCRB) que represente o comportamento global do bloco em estudo torna-se mais viável do que analisar dezenas de gráficos individuais de instrumentos de segurança, o trabalho realizado tem a sua importância validada.

De fato, é importante também analisar individualmente os gráficos dos instrumentos, a fim de identificar possíveis falhas. Entretanto, por meio do IMCRB, a análise do comportamento global da estrutura torna-se mais adequada, acelerando o processo de tomada de decisão.

Além disso, com o IMCRB modelado é possível realizar diferentes outros estudos. Um deles é a geração de diferentes tipos de carta de controle, sendo elas, com base na média móvel, na variância e exponencialmente amortecidas. Outro estudo que também pode ser realizado é a modelagem de previsões do comportamento do bloco para um futuro próximo. Ambos os estudos fazem parte de projetos de pesquisa propostos pelo CEASB-PTI.

6 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (Brasil). **Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens** -- Brasília: ANA, 2016.

CRUZ, Wander da. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas: estudo de caso: UHE Mauá**. 2015.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. 3. ed. Lavras: Ed. UFLA, 2018. 624p.

FONSECA, Alessandra da Rocha. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - Estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2003.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2009. 688 p.

ITAIPU Binacional. **Descrição de Funcionamento – Pêndulo direto/invertido**. Foz do Iguaçu, 1992.

LAROS, J. A. **O uso da análise fatorial: algumas diretrizes para pesquisadores**. In: PASQUALI, L. (Ed.). **Análise fatorial para pesquisadores**. Brasília: LabPAM Saber e Tecnologia, 2012. p. 141–160.

LATTIN, J. M.; CARROL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados**. Cengage Learning, 2011.

MARTINS, Luís Lages et al. **MEDIÇÃO DO MOVIMENTO DE ABERTURA-FECHO E DESLIZAMENTO DE JUNTAS EM BARRAGENS DE BETÃO. O ENSINO DA METROLOGIA E A METROLOGIA NO ENSINO**, p. 24, 2016.

MSIB. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p.

ORO, S. R. **Índice de monitoramento do comportamento estrutural dos blocos de concreto de barragens: uma abordagem multivariada**. 139f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

R Core Team (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SCHREIBER, G. P., **Usinas Hidrelétricas**, ENGEVIX S.A., ed. Edgard Blücher Ltda., Brasil, 1977.

SILVA, Orlando Catarino; MARQUES, Jair Mendes; NIERADKA, Itamar Pena. **Testes Estatísticos e Análise Multivariada na Determinação dos Modos de Falha**

Monitorados Pelos Instrumentos em Blocos de Concreto da Barragem de Itaipu.
HOLOS, v. 5, p. 3-21, 2015.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto.** São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento.** Oficina de Textos, 2006.

The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts, 9.8.0.1359463 (R2020a) Update 1 -
License Number: STUDENT, 2020.