



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# **ESTUDO DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE NAS MEDIÇÕES NOS SISTEMAS DE OBSERVAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO**

**Aplicação à barragem do Alto Lindoso**





LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# ESTUDO DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE NAS MEDIÇÕES NOS SISTEMAS DE OBSERVAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO

Aplicação à barragem do Alto Lindoso

Trabalho realizado no âmbito do projeto RESTATE

Lisboa • setembro 2023

**I&D** BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 311/2023 – **DBB/NO**

## **Título**

### **ESTUDO DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE NAS MEDIÇÕES NOS SISTEMAS DE OBSERVAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO**

Aplicação à barragem do Alto Lindoso

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

### **Juan Tomé Caires da Mata**

Investigador Auxiliar, Núcleo de Observação

### **António Luís Henriques Tavares de Castro**

Investigador Principal, Chefe do Núcleo de Observação

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

### **Luís Filipe Lages Martins**

Investigador Auxiliar, Núcleo de Qualidade Metrológica

### **Álvaro Silva Ribeiro**

Investigador Principal, Chefe do Núcleo de Qualidade Metrológica

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Relatório 311/2023

Proc. 0403/1102/20970

## ESTUDO DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE NAS MEDIÇÕES NOS SISTEMAS DE OBSERVAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO

Aplicação à barragem do Alto Lindoso

### Resumo

---

Neste estudo são quantificadas, através da análise da variância (ANOVA), as componentes de incerteza da repetibilidade e da reprodutibilidade associadas à medição de grandezas no sistema de observação da barragem do Alto Lindoso.

Palavras-chave: Barragens de betão / Sistemas de observação / Incerteza de medição / Análise da variância (ANOVA)

## STUDY OF REPEATABILITY AND REPRODUCIBILITY IN MONITORING SYSTEMS MEASUREMENTS OF CONCRETE DAMS

Application to the Alto Lindoso dam

### Abstract

---

This study quantifies, using the analysis of variance (ANOVA), the uncertainty components of repeatability and reproducibility related to the measurement of quantities in the monitoring system of the Alto Lindoso dam.

Keywords: Concrete dams / Monitoring systems / Measurement uncertainty / Analysis of variance (ANOVA)



## Índice

1	Introdução .....	1
2	Incertezas nos sistemas de medição .....	3
2.1	Considerações iniciais .....	3
2.2	Análise de um sistema de medição .....	4
2.2.1	Aspetos gerais .....	4
2.2.2	Análise da variância (ANOVA) para o estudo R&R .....	5
2.2.3	Análise de resíduos .....	10
2.3	Propagação de incertezas de medição.....	10
2.4	Avaliação do sistema de medição .....	11
3	Descrição do caso de estudo: barragem do Alto Lindoso .....	13
3.1	Considerações iniciais .....	13
3.2	Breve descrição da barragem do Alto Lindoso e do seu sistema de observação.....	13
3.3	Procedimento experimental .....	15
3.4	Medição de movimentos relativos em bases de alongâmetro.....	16
3.5	Medição de deslocamentos horizontais em fios de prumo.....	18
3.6	Medição de deslocamentos com extensómetros de varas.....	20
3.7	Medição de subpressões em piezómetros manométricos.....	22
4	Resultados dos estudos de repetibilidade e de reprodutibilidade na observação da barragem do Alto Lindoso.....	23
4.1	Considerações iniciais .....	23
4.2	Movimentos de abertura-fecho e de deslizamento em bases de alongâmetro.....	23
4.2.1	Aspetos gerais .....	23
4.2.2	Dados primários - leitura do lado 1 .....	23
4.2.3	Dados primários - leitura do lado 2 .....	25
4.2.4	Dados primários - leitura do lado 3 .....	27
4.2.5	Resultados finais.....	29
4.3	Deslocamentos radial e tangencial em fios de prumo .....	30
4.3.1	Aspetos gerais .....	30
4.3.2	Dados primários - leitura radial ao fio .....	30
4.3.3	Dados primários - leitura radial ao cone .....	32
4.3.4	Dados primários - leitura tangencial ao fio .....	34
4.3.5	Dados primários - leitura tangencial ao cone .....	36
4.3.6	Resultados finais.....	38
4.4	Deslocamentos com extensómetros de varas na fundação.....	39
4.4.1	Aspetos gerais .....	39
4.4.2	Dados primários.....	39
4.4.3	Resultados finais.....	41
4.5	Subpressões em piezómetros manométricos.....	42
4.5.1	Aspetos gerais .....	42
4.5.2	Dados primários.....	42
4.5.3	Resultados finais.....	44
5	Considerações finais.....	45
	Referências bibliográficas .....	47

## Índice de figuras

Figura 1.1 – Interação das variáveis num processo de controlo de segurança de uma barragem .....	1
Figura 2.1 – Representação dos conceitos de repetibilidade (a) e de reprodutibilidade (b) em sistemas de medição.....	5
Figura 2.2 – Representação das componentes da variação devidas ao sistema de medição .....	5
Figura 3.1 – Barragem do Alto Lindoso. Vista de jusante a partir da margem esquerda, em novembro de 2020 (LNEC;2021) .....	13
Figura 3.2 – Localização dos instrumentos considerados no estudo R&R.....	16
Figura 3.3 – Medição de movimentos relativos em bases de alongâmetro: a) base de alongâmetro no paramento de uma barragem; b) alongâmetro, pernos e invar; c) numeração das leituras.....	16
Figura 3.4 – Movimentos relativos de abertura/fecho em juntas observados desde 2010 nas bases de alongâmetro selecionadas para o estudo R&R .....	17
Figura 3.5 – Movimentos relativos de deslizamento em juntas observados desde 2010 nas bases de alongâmetro selecionadas para o estudo R&R .....	17
Figura 3.6 – Medição de deslocamentos com fios de prumo: a) base de coordenómetro e respetivo cilindro; e b) coordenómetro ótico.....	18
Figura 3.7 – Posição das bases de coordenómetro e correspondentes fatores $F_R$ e $F_T$ .....	19
Figura 3.8 – Deslocamentos radiais observados desde 2010 nas bases de coordenómetro selecionadas para o estudo R&R .....	20
Figura 3.9 – Deslocamentos tangenciais observados desde 2010 nas bases de coordenómetro selecionadas para o estudo R&R .....	20
Figura 3.10 – Cabeça de leitura de um extensómetro de varas, onde estão colocados um defletómetro e um dispositivo de recolha automática.....	21
Figura 3.11 – Deslocamentos observados desde 2010 nos extensómetros de varas selecionados para o estudo R&R .....	21
Figura 3.12 – Manómetro e dispositivo de recolha automática de um piezómetro, instalado na fundação de uma barragem de betão.....	22
Figura 3.13 – Subpressões observadas desde 2010 nos manómetros dos piezómetros selecionados para o estudo R&R .....	22
Figura 4.1 – Efeito do local, operador e sequência de medição (lado 1).....	24
Figura 4.2 – Resíduos associados à análise da variância da medição dimensional do lado 1 .....	25
Figura 4.3 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (lado 2) .....	26
Figura 4.4 – Resíduos associados à análise da variância da medição dimensional do lado 2 .....	27
Figura 4.5 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (lado 3) .....	28
Figura 4.6 – Resíduos associados à análise da variância da medição dimensional do lado 3 .....	29
Figura 4.7 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (componente radial ao fio) .....	31
Figura 4.8 – Resíduos associados à análise de variância da medição da componente radial ao fio... ..	32
Figura 4.9 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (componente radial ao cone) .....	33
Figura 4.10 – Resíduos associados à análise de variância da medição da componente radial ao cone .....	34
Figura 4.11 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (componente tangencial ao fio) .....	35
Figura 4.12 – Resíduos associados à análise de variância da medição da componente tangencial ao fio .....	36
Figura 4.13 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (componente tangencial ao cone) .....	37



Figura 4.14 – Resíduos associados à análise de variância da medição da componente tangencial ao cone .....	38
Figura 4.15 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional em extensómetros de varas .....	40
Figura 4.16 – Resíduos associados à análise da variância da medição dimensional em extensómetros de varas .....	41
Figura 4.17 – Efeito do local, operador e sequência de medição de subpressões .....	43
Figura 4.18 – Resíduos associados à análise da variância da medição de subpressões .....	44

## Índice de quadros

Quadro 2.1 – Matriz de dados para o estudo R&R .....	7
Quadro 2.2 – Matriz de cálculo ANOVA .....	8
Quadro 3.1 – Sistema de observação instalado na barragem (LNEC; 2022).....	14
Quadro 3.2 – Identificação dos locais de medição por tipo de instrumento .....	15
Quadro 4.1 – Leituras no lado 1 das bases de alongâmetro (em mm).....	23
Quadro 4.2 – Resultados da análise da variância em bases de alongâmetro (lado 1), com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador .....	24
Quadro 4.3 – Resultados da análise da variância em bases de alongâmetro (lado 1), sem efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador .....	24
Quadro 4.4 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional do lado 1 .....	25
Quadro 4.5 – Amostra de valores dimensionais medidos no lado 2 (em mm) .....	26
Quadro 4.6 – Resultados da análise da variância em bases de alongâmetro (lado 2), com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador .....	26
Quadro 4.7 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional do lado 2 .....	27
Quadro 4.8 – Amostra de valores dimensionais medidos no lado 3 (em mm) .....	27
Quadro 4.9 – Resultados da análise da variância em bases de alongâmetro (lado 3), com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador .....	28
Quadro 4.10 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional do lado 3 .....	28
Quadro 4.11 – Incertezas de medição da repetibilidade e reprodutibilidade da medição do movimento de abertura fecho e deslizamento em bases de alongâmetro.....	30
Quadro 4.12 – Amostra de valores dimensionais medidos no fio de prumo – componente radial ao fio (em mm).....	30
Quadro 4.13 – Resultados da análise de variância com correlação entre os fatores Grandeza e Operador (componente radial ao fio).....	31
Quadro 4.14 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional da componente radial ao fio.....	31
Quadro 4.15 – Amostra de valores dimensionais medidos no fio de prumo – componente radial ao cone (em mm).....	32
Quadro 4.16 – Resultados da análise de variância com correlação entre os fatores Grandeza e Operador (componente radial ao cone).....	33
Quadro 4.17 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional da componente radial ao cone .....	33
Quadro 4.18 – Amostra de valores dimensionais medidos no fio de prumo – componente tangencial ao fio (em mm).....	34
Quadro 4.19 – Resultados da análise de variância com correlação entre os fatores Grandeza e Operador (componente tangencial ao fio) .....	35
Quadro 4.20 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional da componente tangencial ao fio .....	35
Quadro 4.21 – Amostra de valores dimensionais medidos no fio de prumo – componente tangencial ao cone (em mm).....	36
Quadro 4.22 – Resultados da análise de variância com correlação entre os fatores Grandeza e Operador (componente tangencial ao cone) .....	37
Quadro 4.23 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional da componente tangencial ao cone .....	37
Quadro 4.24 – Incertezas de medição da repetibilidade e reprodutibilidade da medição dos deslocamentos horizontais radial e tangencial em fios de prumo .....	39
Quadro 4.25 – Amostra de valores dimensionais medidos nos extensómetros de varas (em mm).....	39
Quadro 4.26 – Resultados da análise da variância com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador (deslocamentos em extensómetros de varas) .....	40

Quadro 4.27 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional em extensómetros de varas .....	40
Quadro 4.28 – Incertezas de medição da repetibilidade e reprodutibilidade da medição de deslocamentos em extensómetros de varas .....	42
Quadro 4.29 – Amostra de valores medidos de subpressão (em bar) .....	42
Quadro 4.30 – Resultados da análise da variância com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador (pressão em piezómetros).....	43
Quadro 4.31 – Resultados da análise da variância sem efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador (pressão em piezómetros).....	43
Quadro 4.32 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição de subpressões .....	44
Quadro 4.33 – Incertezas de medição da repetibilidade e reprodutibilidade da medição de subpressões em piezómetros .....	44



## 1 | Introdução

A tomada de decisões no âmbito do controlo de segurança de barragens é suportada na análise de dados provenientes das medições efetuadas com instrumentos integrantes dos sistemas de observação e de inspeções visuais, tendo em conta as previsões de modelos de comportamento estabelecidos na fase de projeto ou na fase de exploração, tendo em conta as propriedades dos materiais e as características geométricas das estruturas (Figura 1.1).

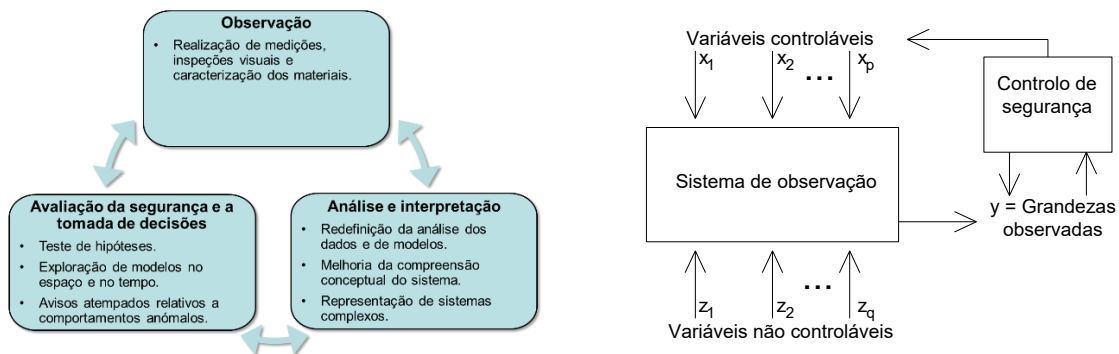


Figura 1.1 – Interação das variáveis num processo de controlo de segurança de uma barragem

Os documentos técnicos de apoio (APA; 2018) ao RSB – Regulamento de Segurança de Barragens (RSB; 2018) definem o sistema de observação como “o conjunto de dispositivos instalados para medição das grandezas selecionadas para o controlo de segurança da obra, relativas às ações, às propriedades dos materiais e às respostas das estruturas e suas fundações”.

De acordo com o VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia (IPQ; 2012), o resultado de uma medição corresponde a um “conjunto de valores atribuídos a uma mensuranda<sup>1</sup>, juntamente com toda outra informação pertinente disponível”, sendo expresso por uma estimativa e uma incerteza de medição. De acordo com o mesmo vocabulário, a incerteza de medição é um “parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma mensuranda, com base nas informações utilizadas”, incluindo componentes associadas a diversos fatores como o instrumento de medição, os operadores e o meio ambiente, entre outros.

O conhecimento desta incerteza é essencial para a avaliação da qualidade da medição, ou seja, do grau de satisfação do utilizador considerando os requisitos e as expetativas do contexto em que essa medição se insere como, por exemplo, no controlo de segurança de barragens.

O desenvolvimento de esforços para a obtenção e melhoria das incertezas de medição associadas às grandezas observadas no âmbito de estudos do comportamento de barragens contribui de forma

<sup>1</sup> Grandeza que se pretende medir.

decisiva, a par da contribuição proveniente dos modelos que caracterizam esse comportamento, para a qualidade de todo o processo de controlo de segurança.

O estudo apresentado neste relatório tem por objetivo caracterizar as incertezas associadas às medições realizadas através do sistema de observação da barragem do Alto Lindoso, em particular, no que se refere às efetuadas de forma manual, com intervenção direta de operadores. Nesse sentido, foram quantificadas as dispersões das medições de deslocamentos absolutos e relativos, em bases de alongâmetro, fios de prumo e extensómetros de varas, e de subpressões em piezómetros, através da realização de estudos de repetibilidade e reprodutibilidade com base na análise da variância (ANOVA). Não foram consideradas as medições de caudais, porque durante a campanha de medição realizada o número de drenos com caudal significativo não era suficiente.

A informação foi processada com o software estatístico R (R Development Core Team; 2012) e com folhas de cálculo do Microsoft Excel. Os resultados obtidos são apresentados em quadros e figuras relativos a:

- valores medidos pelos operadores;
- influência dos locais de medição, operadores e sequência de medições;
- resultados da análise de variância, considerando os fatores Grandeza, Operador e o efeito da correlação entre os fatores Grandeza e Operador;
- repetibilidade e reprodutibilidade dos valores medidos;
- resíduos, para avaliação da validade dos modelos estatísticos adotados; e
- propagação da repetibilidade e reprodutibilidade dos valores medidos para as grandezas de interesse, se aplicável, considerando intervalos de confiança de 68,26 %, 95,44 % e 99,74 %.

Este relatório está dividido em cinco capítulos: o capítulo 1 corresponde à presente introdução; o capítulo 2 é dedicado aos aspetos teóricos relacionados com a análise e a avaliação de um sistema de medição; o capítulo 3 descreve o caso de estudo e apresenta o procedimento experimental adotado na análise dos sistemas de medição; no capítulo 4 são apresentados os dados primários e os resultados do estudo por tipo de grandeza; e, no capítulo 5, apresentam-se as considerações finais. Por último, são apresentadas as referências bibliográficas.

## 2 | Incertezas nos sistemas de medição

### 2.1 Considerações iniciais

Os sistemas de medição são concebidos considerando requisitos metrológicos adequados aos contextos em que se inserem, tendo em conta os efeitos aleatórios e sistemáticos que afetam essas medições (ASCE; 2000). Em regra, pretende-se que a incerteza associada ao sistema de medição seja reduzida relativamente à amplitude dos valores medidos da grandeza observada.

Na medição de uma determinada grandeza pode não ser obtido o mesmo valor quando a medição é repetida, mesmo quando todas as variáveis de contexto permanecem as mesmas. Na dispersão total de valores observados são, em regra, consideradas duas contribuições, uma associada ao sistema de medição e outra à grandeza a ser medida. Esta dispersão de valores pode resultar de (Pillet e Duret; 2009):

- métodos e procedimentos inadequados;
- influência do operador;
- influência das condições ambientais;
- imperfeições nos instrumentos de medição; e
- variações espaciais e temporais da grandeza medida.

No caso particular das observações realizadas no interior das galerias das barragens, destacam-se as condições de iluminação, que devem ser adequadas à visualização das escalas de medição dos instrumentos, os pontos objeto, as marcações ou os cones (no caso dos fios de prumo), minimizando a probabilidade de ocorrência de erros de paralaxe. Em geral, estes erros devem-se a uma deficiente posição do operador no momento da leitura de instrumentos com indicador analógico, que origina uma falsa projeção da marcação na escala e uma errada estimativa da leitura.

A temperatura dos instrumentos de medição e a sua variação ao longo das campanhas de observação podem constituir um fator ambiental importante a ter em conta, uma vez que a variação dimensional de um corpo é proporcional ao seu coeficiente de dilatação térmica e à variação de temperatura. Deste modo, quando não consideradas de forma adequada, a temperatura dos instrumentos de medição e a sua variação ao longo do tempo podem afetar o funcionamento dos seus sistemas, gerando erros de medição significativos.

No conjunto de boas práticas de manuseamento e manutenção de instrumentos de medição importa destacar os seguintes cuidados:

- manter as superfícies de contacto limpas;
- manter as componentes móveis sem folgas excessivas e com deslizamento suave;
- utilizar de forma cuidadosa, sem pressão excessiva e evitando choques;
- efetuar uma conservação cuidada, sem sujidade e em estojos adequados; e
- armazenar em local que garanta uma proteção ambiental adequada.

A utilização de instrumentos de medição calibrados e inseridos em cadeias rastreáveis no Sistema Internacional de Unidades (SI) contribui decisivamente para o rigor e a confiança das medições efetuadas, pelo que é recomendável a calibração regular desses instrumentos e a consequente confirmação metrológica.

A rastreabilidade dos instrumentos de medição ao Sistema Internacional de Unidades (SI) assegura:

- o conhecimento dos erros sistemáticos e aleatórios da medição;
- a quantificação da deriva instrumental<sup>2</sup> ao longo do tempo;
- a identificação da necessidade de realização de operações de ajuste e de manutenção; e
- a comparabilidade das medições efetuadas em campanhas e locais distintos e com operadores ou instrumentos diferentes.

## 2.2 Análise de um sistema de medição

### 2.2.1 Aspetos gerais

A análise de um sistema de medição<sup>3</sup> corresponde a uma técnica estatística para a avaliação do desempenho de um sistema de medição (Montgomery; 1997).

Qualquer processo de medição de uma determinada grandeza envolve uma dispersão de valores que pode ser caracterizada, numa perspetiva probabilística, através de parâmetros estatísticos não negativos, como é o caso da variância ou do desvio padrão.

Neste estudo, considera-se que a dispersão total da medição,  $\sigma_{Total}^2$ , decorre de duas parcelas: a dispersão associada à grandeza,  $\sigma_{Grandeza}^2$ , e a dispersão associada ao sistema de medição,  $\sigma_{Sistema\ de\ medição}^2$ , o que se traduz matematicamente em

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Grandeza}^2 + \sigma_{Sistema\ de\ medição}^2 \quad (1)$$

Por sua vez, a variância associada ao sistema de medição<sup>4</sup> pode ser dividida em duas componentes, designadas por repetibilidade e reprodutibilidade.

A repetibilidade dos resultados de uma medição, que em geral é expressa por uma variância, é definida como a dispersão entre os resultados de medições sucessivas da mesma mensurada, efetuadas nas mesmas condições de medição, ou seja, com o mesmo procedimento de medição, operador, instrumento de medição usado nas mesmas condições, local e repetição num curto intervalo de tempo (Figura 2.1 (a)). Por sua vez, a reprodutibilidade também pode ser expressa por uma variância, sendo definida como a dispersão na média entre os resultados das medições da mesma mensurada efetuada por diferentes operadores sob as mesmas condições (Figura 2.1 (b)).

---

<sup>2</sup> Variação da indicação ao longo do tempo, contínua ou incremental, devida a variações nas propriedades metrológicas de um instrumento de medição.

<sup>3</sup> Do inglês *Measurement System Analysis* – MSA.

<sup>4</sup> Na literatura internacional o estudo da componente da variância devida ao sistema de medição é designado por “R&R study”, em que R&R são as siglas iniciais de *Repeatability* e *Reproducibility*.



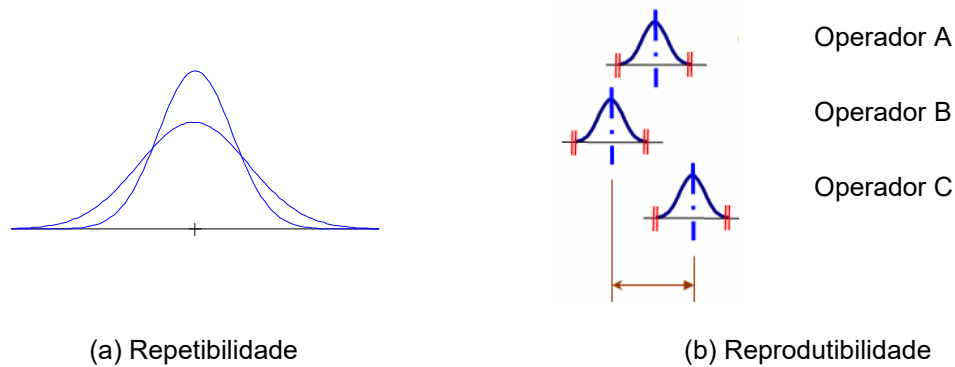


Figura 2.1 – Representação dos conceitos de repetibilidade (a) e de reprodutibilidade (b) em sistemas de medição

A consideração dos efeitos da repetibilidade e reprodutibilidade na variância associada ao sistema de medição (Pereira e Requeijo; 2008) encontra-se representada na expressão (2) e na Figura 2.2.

$$\sigma_{\text{Sistema de medição}}^2 = \sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{\text{Repetibilidade}}^2 + \sigma_{\text{Reprodutibilidade}}^2 \quad (2)$$

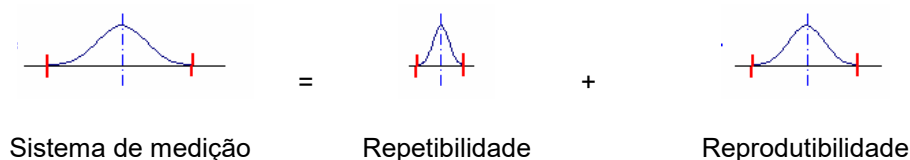


Figura 2.2 – Representação das componentes da variação devidas ao sistema de medição

Valores reduzidos das variâncias  $\sigma_{\text{Repetibilidade}}^2$  e  $\sigma_{\text{Reprodutibilidade}}^2$  são indicativos de resultados de medições com melhor repetibilidade e reprodutibilidade, respetivamente.

Uma análise mais detalhada das componentes de variância existentes nos processos de medição é apresentada na secção seguinte (2.1.1), dedicada à aplicação da análise da variância (ANOVA) no estudo R&R.

## 2.2.2 Análise da variância (ANOVA) para o estudo R&R

A análise de variância (ANOVA) consiste na separação da variância total de uma determinada grandeza (variável dependente) em duas componentes: a primeira associada ao modelo representativo da sua variação e a segunda relacionada com os resíduos (erros). Se forem replicadas determinadas experiências, a ANOVA permite decompor a variância dos resíduos numa componente relacionada com as aproximações do modelo e outra componente associada com o erro de replicação.

Na análise de variância consideram-se medições realizadas nas mesmas condições, com a exceção de dois fatores cujos efeitos são considerados aleatórios (Pereira e Requeijo; 2008): o Operador (indivíduo que realiza a medição) e a Grandeza (objeto da medição). No contexto da observação de barragens considera-se que o Operador é o observador e que a Grandeza corresponde à leitura efetuada no instrumento de observação.

Considere-se uma experiência em que  $o$  operadores  $O_j$  efetuam  $n$  medições em  $p$  instrumentos de medição. A  $k^{\text{ésima}}$  medição (designada por  $y_{ijk}$ ) realizada pelo Operador  $O_j$  à Grandeza  $P_i$  pode ser representada pela soma das seguintes parcelas, consideradas aleatórias e independentes:

$$y_{ijk} = x + P_i + O_j + PO_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

respeitando os índices  $i$ ,  $j$  e  $k$  às grandezas, aos operadores e às medições de cada operador, respetivamente. A cada uma das parcelas está associada uma dispersão de valores, de carácter aleatório, caracterizada pela respetiva variância. As componentes de variância são designadas por  $\sigma_P^2$ ,  $\sigma_O^2$ ,  $\sigma_{PO}^2$  e  $\sigma_E^2$ , que quantificam as dispersões associadas aos fatores Grandeza, Operador, ao efeito da correlação entre os fatores Grandeza e Operador, e à variável residual, respetivamente, onde,

- $x$  – é a média das medições (média populacional);
- $P_i \sim N(0, \sigma_P)$  – é o efeito aleatório devido ao  $i^{\text{ésimo}}$  nível do fator Grandeza;
- $O_j \sim N(0, \sigma_O)$  – é o efeito aleatório devido ao  $j^{\text{ésimo}}$  nível do fator Operador;
- $PO_{ij} \sim N(0, \sigma_{PO})$  – é o efeito aleatório devido à correlação entre os fatores Grandeza e Operador;
- $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_E)$  – é a componente aleatória devida à repetição das medições, ou seja, a variável residual.

Assim, a variância total,  $\sigma_{Total}^2$ , é dada pela expressão,

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_P^2 = \sigma_O^2 + \sigma_{PO}^2 + \sigma_E^2. \quad (4)$$

Nos estudos R&R, a variância devida ao fator Grandeza,  $\sigma_{Grandeza}^2$ , é expressa por  $\sigma_P^2$ , enquanto a variância devida à repetibilidade,  $\sigma_{Repetibilidade}^2$ , é dada por  $\sigma_E^2$ . Por sua vez, a variância devida à reprodutibilidade,  $\sigma_{Reprodutibilidade}^2$ , é obtida pela soma de  $\sigma_O^2$  e  $\sigma_{PO}^2$ , ou seja,

$$\sigma_{Grandeza}^2 = \sigma_P^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{Repetibilidade}^2 = \sigma_E^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{Reprodutibilidade}^2 = \sigma_O^2 + \sigma_{PO}^2 \quad (7)$$

As componentes  $\sigma_{Repetibilidade}^2$  e  $\sigma_{Reprodutibilidade}^2$  permitem determinar a variância associada ao sistema de medição. Por sua vez, a componente  $\sigma_{Grandeza}^2$  fornece informação sobre a dispersão de valores associada à medição de grandezas do mesmo tipo, mas efetuada em locais diferentes.

O cálculo das estimativas das componentes de variância, referidas anteriormente, segue um conjunto de etapas que se passa a descrever.

Em primeiro lugar, constrói-se uma matriz com os dados, tal como apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Matriz de dados para o estudo R&R

		Fator Operador			
		1	2	...	o
Fator Grandeza	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$	...	$y_{1o1}, y_{1o2}, \dots, y_{1on}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$	...	$y_{2o1}, y_{2o2}, \dots, y_{2on}$
	...	...	...	...	...
	p	$y_{p11}, y_{p12}, \dots, y_{p1n}$	$y_{p21}, y_{p22}, \dots, y_{p2n}$	...	$y_{po1}, y_{po2}, \dots, y_{pon}$

Se se considerar,

- $y_{i..} = \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n y_{ijk}$  – a soma total das observações referentes à Grandeza  $i$ ;
- $y_{.j.} = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^n y_{ijk}$  – a soma total das observações efetuadas pelo Operador  $j$ ;
- $y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk}$  – a soma das observações na  $ij^{\text{ésima}}$  célula do Quadro 2.1, correspondente à soma das  $n$  observações efetuadas pelo Operador  $j$  à Grandeza  $i$ .
- $y_{...} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n y_{ijk}$  – a soma total de todas as observações;
- $\bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{on}$  – a média de todas as observações efetuadas à Grandeza  $i$ ;
- $\bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{pn}$  – a média de todas as observações efetuadas pelo Operador  $j$ ;
- $\bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n}$  – a média das observações na  $ij^{\text{ésima}}$  célula do Quadro 2.1, correspondente à média de todas as observações efetuadas pelo Operador  $j$  à Grandeza  $i$ ;
- $\bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{pon}$  – a média de todas as observações;

então o total da soma dos quadrados dos desvios entre o valor de cada medição e o respetivo valor médio,  $SQ_{Total}$ , dado pela ANOVA, é obtido através de:

$$\begin{aligned}
 SQ_{Total} &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = on \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + \\
 &+ pn \sum_{j=1}^o (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 + n \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

O  $SQ_{Total}$  pode ser expresso pela adição das componentes  $SQ_P$ ,  $SQ_O$ ,  $SQ_{PO}$  e  $SQ_E$ , ou seja,

$$SQ_{Total} = SQ_P + SQ_O + SQ_{PO} + SQ_E,
 \tag{9}$$

em que,

- $SQ_P = on \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2$  – é a soma dos quadrados dos desvios associados ao fator Grandeza;
- $SQ_O = pn \sum_{j=1}^o (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2$  – é a soma dos quadrados dos desvios associados ao fator Operador;

$$SQ_{PO} = n \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \quad - \text{é a soma dos quadrados dos desvios associados à correlação entre os fatores Grandeza e Operador;}$$

$$SQ_E = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \quad - \text{é a soma dos quadrados dos desvios associados à variação residual.}$$

Os correspondentes graus de liberdade da decomposição são dados por,

$$pon - 1 = (p - 1) + (o - 1) + (p - 1)(o - 1) + po(n - 1). \quad (10)$$

Após o cálculo dos termos apresentados nas expressões (8) e (9), interessa testar, através da ANOVA, as seguintes hipóteses acerca do efeito dos fatores Grandeza e Operador e da interação entre eles,

$$H_0 : \sigma^2_{P_1} = \sigma^2_{P_2} = \dots = \sigma^2_{P_p} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1 : \text{Pelo menos um } \sigma^2_{P_i} > 0$$

$$H_0 : \sigma^2_{O_1} = \sigma^2_{O_2} = \dots = \sigma^2_{O_o} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1 : \text{Pelo menos um } \sigma^2_{O_i} > 0$$

$$H_0 : \sigma^2_{PO_{ij}} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1 : \text{Pelo menos um } \sigma^2_{PO_{ij}} > 0$$

Se no último teste apresentado a hipótese nula for verdadeira, todos os efeitos devido à correlação dos fatores Grandeza e Operador são considerados não significativos.

Para testar que não existem efeito do fator Grandeza, efeito do fator Operador ou efeito da correlação entre os fatores Grandeza e Operador, calcula-se a correspondente estatística de teste apresentada na coluna  $F_0$  do Quadro 2.2. Neste quadro  $MQ_P$ ,  $MQ_{PO}$ ,  $MQ_O$ ,  $MQ_E$  são os desvios quadráticos médios associados à Grandeza, à correlação Grandeza-Operador, ao Operador e ao erro aleatório, respetivamente.

Cada um destes rácios segue a distribuição  $F$ , com um número de graus de liberdade igual ao número de graus de liberdade do numerador e do denominador, quando a hipótese nula (não existindo efeito de grupo) é verdadeira.

Quadro 2.2 – Matriz de cálculo ANOVA

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Desvios quadráticos médios	$F_0$
Grandeza	$SQ_P$	$p - 1$	$MQ_P = \frac{SQ_P}{p - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_P}{MQ_{PO}}$
Operador	$SQ_O$	$o - 1$	$MQ_O = \frac{SQ_O}{o - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_O}{MQ_{PO}}$
Interação	$SQ_{PO}$	$(p - 1)(o - 1)$	$MQ_{PO} = \frac{SQ_{PO}}{(p - 1)(o - 1)}$	$F_0 = \frac{MQ_{PO}}{MQ_E}$
Erro	$SQ_E$	$po(n - 1)$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{po(n - 1)}$	
Total	$SQ_{Total}$	$pon - 1$		

A hipótese nula pode ser rejeitada se o valor de  $F$  obtido exceder o valor tabelado para um nível de significância<sup>5</sup> especificado, ou se o  $p$ -value<sup>6</sup> for menor do que um nível de significância especificado (Montgomery e Runger; 1994). Por exemplo, no caso do teste relativo ao efeito da interação entre os fatores, se  $F_0$  for superior a  $F_{\alpha; (p-1)(o-1); po(n-1)}$ <sup>7</sup>, a hipótese nula será rejeitada, concluindo-se que a correlação entre os dois fatores é significativa.

Salienta-se que, quando existe correlação entre dois fatores, o efeito de um deles depende do outro. Na presença de uma interação significativa o efeito isolado de cada um dos fatores pode ser mascarado pela correlação e, conseqüentemente, os testes à significância da influência de cada um dos fatores podem ficar desprovidos de sentido. Por esta razão, deve fazer-se em primeiro lugar o teste relativo à correlação, isto é, deve testar-se a hipótese nula de que não existe correlação entre os dois fatores. Assim, a primeira  $H_0$  a testar é a que se refere à correlação entre os fatores Grandeza e Operador. A sua rejeição significa que os fatores são não-aditivos, isto é, os dois fatores interagem. Nesta situação tem pouco interesse testar as  $H_0$  referentes aos efeitos principais Grandeza e Operador.

As componentes de variância podem ser estimadas (Pereira e Requeijo; 2008) através das expressões (11) a (15):

$$\hat{\sigma}_P^2 = \frac{MQ_P - MQ_{PO}}{on} \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}_O^2 = \frac{MQ_O - MQ_{PO}}{pn} \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_{PO}^2 = \frac{MQ_{PO} - MQ_E}{n} \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}_{Repetibilidade}^2 = MQ_E \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}_{Reprodutibilidade}^2 = \hat{\sigma}_O^2 + \hat{\sigma}_{PO}^2 \quad (15)$$

No caso de alguma componente de variância tomar um valor negativo, o valor desta componente é considerado nulo (Pan; 2006). Se a correlação não for significativa, então a soma dos quadrados e os graus de liberdade devem ser somadas aos respetivos termos da variância residual.

Se se considerar que não existe correlação entre os dois fatores, o modelo estatístico apresentado na expressão (3) pode ser ajustado, como indicado na expressão (16), sendo o termo da interação omitido,

<sup>5</sup> O nível de significância representa a probabilidade de se incorrer no erro de rejeitar  $H_0$  quando esta hipótese é de facto verdadeira.

<sup>6</sup> O  $p$ -value constitui uma medida do grau com que os dados amostrais contradizem a  $H_0$ . Quanto menor for o  $p$ -value maior será o grau com que a  $H_0$  é contradita.

<sup>7</sup>  $F_{\alpha; (p-1)(o-1); po(n-1)}$  é uma distribuição Fisher-Snedcor com  $(p-1)(o-1)$  e  $po(n-1)$  graus de liberdade para um nível de significância igual a  $\alpha$ .

$$y_{ijk} = x + P_i + O_j + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (16)$$

e as estatísticas de teste obtidas por  $F_0 = \frac{MQ_P}{MQ_E}$  e  $F_0 = \frac{MQ_O}{MQ_E}$ . Neste caso, as componentes de variância são definidas pelas expressões (17) e (18):

$$\hat{\sigma}_P^2 = \frac{MQ_P - MQ_E}{on} \quad (17)$$

$$\hat{\sigma}_O^2 = \frac{MQ_O - MQ_E}{pn} \quad (18)$$

### 2.2.3 Análise de resíduos

A análise dos resíduos é efetuada com o objetivo de validar os pressupostos implícitos ao modelo estatístico considerado na análise da variância (Pereira e Requeijo; 2008). Uma forma simples de realizar esta análise consiste na elaboração das seguintes representações gráficas: (i) distribuição dos resíduos; (ii) resíduos em função da ordem aleatória da execução das medições, e (iii) resíduos *versus* valores previstos.

Considerando apenas dois fatores, os valores previstos correspondem às médias das respostas obtidas para cada combinação dos fatores ( $\bar{y}_{ij}$ ), como indicado na seguinte expressão,

$$\hat{y}_{ijk} = \hat{x} + \hat{P}_i + \hat{O}_j + \widehat{PO}_{ij} = \bar{y}_{ij}, \quad (19)$$

onde as estimativas dos parâmetros, apresentadas nas expressões (20) a (23), são (Pereira e Requeijo; 2008),

$$\hat{x} = \bar{y}_{..} \quad (20)$$

$$\hat{P}_i = \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{..} \quad (21)$$

$$\hat{O}_j = \bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{..} \quad (22)$$

$$\widehat{PO}_{ij} = \bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{..} \quad (23)$$

Desta forma, os valores dos resíduos serão dados pelas diferenças entre os valores observados e os valores previstos para a variável  $y$ , conforme indicado na seguinte expressão,

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ij.} \quad (24)$$

## 2.3 Propagação de incertezas de medição

Nos sistemas de observação de barragens é possível distinguir dois tipos de medições de grandezas físicas:

- medições diretas, como é o caso da medição da subpressão em piezómetros, onde não é necessário recorrer a algoritmos de cálculo da grandeza de interesse;
- medições indiretas, como são os casos da medição do deslocamento a partir dos valores lidos em bases de alongâmetro e de coordinómetro (fios de prumo) e em extensómetros de varas, em que se recorre a algoritmos de cálculo que permitem calcular as grandezas de interesse (grandezas de saída) a partir das grandezas medidas (grandezas de entrada).

No caso das medições indiretas, a avaliação da incerteza de medição pode ser suportada numa abordagem funcional de propagação das incertezas de medição desde as grandezas de entrada (valores dimensionais lidos nos instrumentos em diferentes épocas) até à grandeza de saída (deslocamento), tendo em conta os respetivos algoritmos que as relacionam.

A linearidade ou a reduzida não linearidade desses algoritmos permite que na definição das expressões de cálculo da incerteza de medição da grandeza de saída se aplique o teorema da aditividade nas distribuições normais<sup>8</sup>, segundo o qual (Montgomery e Runger; 1994), se existirem  $n$  variáveis aleatórias independentes  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), onde  $X_i \in N(\mu_i, \sigma_i^2)$ , então a variável  $S = \sum_{i=1}^n X_i$  tem a seguinte distribuição,

$$S = \sum_{i=1}^n X_i \in N\left(\sum_{i=1}^n \mu_i, \sum_{i=1}^n \sigma_i^2\right) \quad (25)$$

Como resultados da aplicação deste teorema pode concluir-se

1. A variável aleatória  $X = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$ , com  $a_i \in \mathbb{R}$  ( $i = 1, \dots, n$ ), tem distribuição normal de média  $\mu_X = a_1\mu_1 + a_2\mu_2 + \dots + a_n\mu_n$  e variância  $\sigma_X^2 = a_1^2\sigma_1^2 + a_2^2\sigma_2^2 + \dots + a_n^2\sigma_n^2$ .
2. Se  $X_1 \in N(\mu_1, \sigma_1^2)$  e  $X_2 \in N(\mu_2, \sigma_2^2)$  forem independentes então  $X_1 + X_2 \in N(\mu_1 + \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$  e  $X_1 - X_2 \in N(\mu_1 - \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$ .

## 2.4 Avaliação do sistema de medição

Uma vez estimada a variância ou a incerteza do sistema de medição, é possível efetuar a sua classificação mediante um indicador do nível de qualidade metrológica, como, por exemplo, a percentagem da variação devida à repetibilidade e à reprodutibilidade, %R&R, relativa à incerteza de medição total, dada pela expressão,

$$\%R\&R = \frac{6\hat{\sigma}_{\text{Sistema de medição}}}{6\hat{\sigma}_{\text{Total}}} = \frac{\hat{\sigma}_{\text{Sistema de medição}}}{\hat{\sigma}_{\text{Total}}} \quad (26)$$

de onde se conclui que um valor elevado de %R&R pode indicar que uma parte significativa da incerteza de medição provém do sistema de medição.

<sup>8</sup> Corresponde à Lei de Propagação da Incerteza descrita em (GUM; 1995).

No âmbito deste trabalho será considerado como indicador do nível de qualidade metrológica o valor dos efeitos da repetibilidade e reprodutibilidade na variância associada ao sistema de medição,  $\sigma_{R\&R}^2$ , para um nível de confiança de 99,74%.



## 3 | Descrição do caso de estudo: barragem do Alto Lindoso

### 3.1 Considerações iniciais

As metodologias descritas no capítulo anterior foram aplicadas ao estudo das incertezas no processo de medição de algumas das grandezas observadas no âmbito do controlo de segurança da barragem do Alto Lindoso. Este estudo foi desenvolvido em duas fases: a primeira, na obra, onde três observadores realizaram um conjunto de medições no conjunto selecionado de instrumentos; e a segunda, em gabinete, onde os dados recolhidos no campo foram tratados, de acordo com as metodologias referidas.

Nos subcapítulos seguintes apresenta-se uma breve descrição da barragem do Alto Lindoso e do seu sistema de observação e referem-se, em detalhe, os procedimentos adotados no trabalho de campo deste estudo.

### 3.2 Breve descrição da barragem do Alto Lindoso e do seu sistema de observação

O aproveitamento hidroelétrico do Alto Lindoso situa-se no Parque Nacional da Peneda-Gerês, junto à fronteira com Espanha, no distrito de Viana do Castelo. É constituído por uma barragem (Figura 3.1) no rio Lima, localizada entre a freguesia do Lindoso, concelho de Ponte da Barca, na margem esquerda, e a freguesia do Soajo, concelho de Arcos de Valdevez, na margem direita, por um circuito hidráulico e por uma central. A albufeira formada pela barragem tem uma capacidade útil de 347,9 hm<sup>3</sup> e estende-se por zonas dos concelhos referidos e por território espanhol (LNEC; 2021).



Figura 3.1 – Barragem do Alto Lindoso. Vista de jusante a partir da margem esquerda, em novembro de 2020 (LNEC; 2021)

A barragem, de betão, tipo abóbada de dupla curvatura (arcos parabólicos), tem 110 m de altura e 21 m de espessura máxima. O coroamento está à cota 339 m e tem um desenvolvimento de 297 m, que permite ligar por estrada os concelhos de Ponte da Barca e Arcos de Valdevez. A descarga de fundo é

constituída por duas condutas que atravessam o corpo da barragem, cada uma com uma capacidade de descarga de 200 m<sup>3</sup>/s. Na margem direita do rio situa-se o descarregador de cheias, constituído por dois túneis, com a extensão em planta de 238 m e 268 m, o qual, em conjunto com a descarga de fundo, permitem a vazão de um caudal máximo de 3170 m<sup>3</sup>/s que, conjugada com a gestão da albufeira, permite controlar uma cheia com probabilidade de ocorrência de uma vez em cada 1000 anos, cujo caudal de ponta foi calculado em 3500 m<sup>3</sup>/s. Os caudais descarregados são restituídos na margem direita do rio cerca de 200 m a jusante da barragem (LNEC;2021).

Para além de uma galeria geral de drenagem (GGD), que acompanha toda a inserção da abóbada na fundação, a barragem dispõe de três galerias de visita horizontais (GV1, GV2 e GV3), às cotas 325 m, 293 m e 261 m, respetivamente, que penetram cerca de 50 m na fundação em ambas as margens, e cinco galerias radiais, situadas próximo dos poços dos fios de prumo, junto à galeria geral de drenagem.

O primeiro enchimento da albufeira iniciou-se em janeiro de 1992, com a água na albufeira à cota 234,0 m, tendo o NPA, à cota 338 m, sido atingido em abril de 1994.

O sistema de observação instalado na barragem permite a monitorização de grandezas relacionadas com as ações e as respostas térmica, estrutural e hidráulica. No Quadro 3.1 apresenta-se uma síntese atualizada do sistema de observação da barragem com recolha manual de dados (LNEC;2021).

**Quadro 3.1 – Sistema de observação instalado na barragem (LNEC; 2022)**

<b>Grandeza</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Inoperacionais</b>
Nível da albufeira	Escala de níveis	1	-
Deslocamentos horizontais	Fios de prumo (bases de leitura)	23	-
	Geodesia – Poligonais (bases)	46	-
Deslocamentos verticais	Extensómetros de varas na fundação	18	-
	Geodesia – Nivelamento	57	-
Movimentos de juntas	Bases de alongâmetro	106	-
	Medidores de movimentos de juntas	192	9
Temperaturas no betão	Termómetros de resistência elétrica	70	-
Tensões no betão	Tensómetros de resistência elétrica	10	-
Deformabilidade no betão	Células de fluência	6	4
	Extensómetros de resistência elétrica	236	8
Pressão da água nos poros do betão	Medidores de pressão de resistência elétrica	6	-
Subpressões na fundação	Piezómetros	22	-
Caudais drenados e infiltrados	Drenos de fundação e bicas totalizadoras	55	5

### 3.3 Procedimento experimental

As metodologias descritas foram aplicadas a processos de medição de quatro tipos de grandeza – deslocamentos medidos em bases de alongâmetro, em fios de prumo e em extensómetros de varas, e subpressões em piezómetros – tendo como objetivo caracterizar, para cada um, os seguintes efeitos:

- (i) fator Grandeza, com  $p=10$  (10 locais de medição);
- (ii) fator Operador, com  $o=3$  (3 observadores);
- (iii) efeito da interação entre os fatores Grandeza e Operador, e;
- (iv) variação dos resíduos.

No Quadro 3.2 e na Figura 3.2 são indicados, para cada tipo de instrumento de medição, os dez locais de medição que foram selecionados. O procedimento experimental aplicado em cada tipo de instrumento de medição compreendeu as seguintes etapas:

1. escolha de uma amostra de dez grandezas do mesmo tipo em locais distintos (Figura 3.2) da obra; embora fosse desejável que os locais de medição não fossem conhecidos pela equipa de operadores, como se trata de pontos fixos da barragem, tal não foi possível;
2. utilização de uma amostra de operadores com dimensão igual a três (A, B e C), representativos da população de operadores do dono de obra, conhecedora das práticas de medição adotadas;
3. medição e registo, pelo operador A, das leituras nos dez locais selecionados (da grandeza 1 à grandeza 10). Repetição das medições pelos operadores B e C sem que tenham conhecimento das leituras efetuadas pelos restantes operadores;
4. repetição das medições do ciclo anterior, adotando um percurso diferente do seguido na etapa anterior; e
5. repetição da etapa 4, adotando um percurso diferente.

Verifica-se, assim, que cada observador efetua três leituras em cada local de medição.

Admite-se que todas as medições se realizam num intervalo de tempo suficientemente curto de modo que as variações das ações e das condições ambientais não induzam variações significativas nas grandezas medidas.

Quadro 3.2 – Identificação dos locais de medição por tipo de instrumento

Local	Base de alongâmetro	Fio de prumo	Extensómetro de varas	Piezómetro
1	BA90	FPI1-326,5	M5-6 (40)	P4/5
2	BA92	FPI2-326,5	M5-6 (15)	P7/8
3	BA94	FPI3-326,5	M8-9 (35)	P8/9
4	BA96	FPI4-326,5	M8-9 (15)	P9/10
5	BA98	FPI5-326,5	M11-12 (45)	P12/13
6	BA11	FPI1-294,7	M11-12(15)	P13/14
7	BA100	FPI2-294,7	M14-15(35)	P15/16
8	BA102	FPI3-294,7	M14-15 (15)	P16/17
9	BA104	FPI4-294,7	M17-18 (30)	P17/18
10	BA106	FPI5-294,7	M17-18 (15)	P18/19

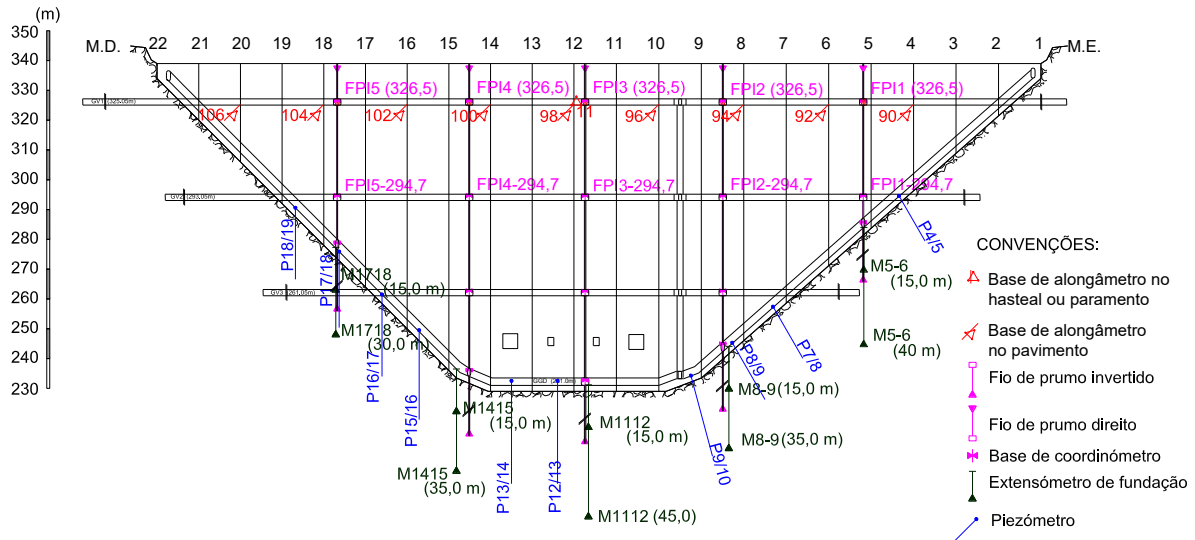


Figura 3.2 – Localização dos instrumentos considerados no estudo R&R

### 3.4 Medição de movimentos relativos em bases de alongâmetro

As bases de alongâmetro (Figura 3.3) são constituídas por três pernos, instalados nos dois lados de uma junta, fenda ou outra descontinuidade, que permitem medir, com um instrumento de leitura denominado de alongâmetro, movimentos relativos na normal a essa descontinuidade (movimentos de abertura e fecho) e segundo a sua orientação do seu plano (movimentos de deslizamento).

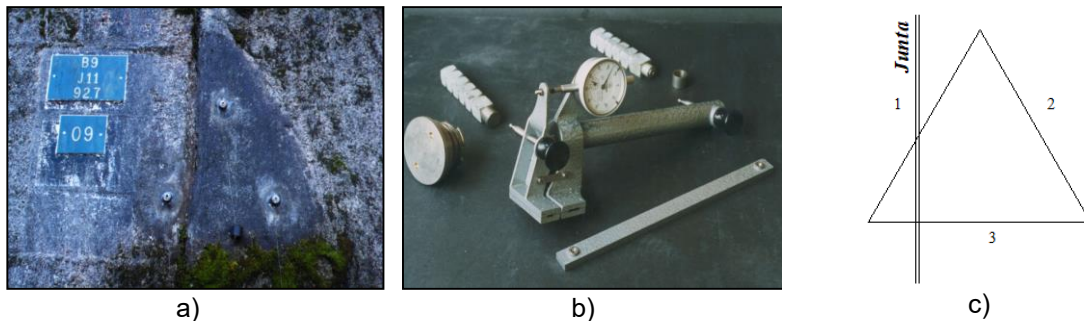


Figura 3.3 – Medição de movimentos relativos em bases de alongâmetro: a) base de alongâmetro no paramento de uma barragem; b) alongâmetro, pernos e invar; c) numeração das leituras

A medição das variações das distâncias referidas na Figura 3.3 c), em diferentes épocas de observação ( $i$  e  $n$ ), permite determinar os movimentos de abertura/fecho ( $\Delta y_n$ ) e os movimentos de deslizamento no plano da junta ( $\Delta x_n$ ) entre essas épocas:

$$\Delta y_n = -\frac{(L3_n - L3_i) - (LI_n - LI_i)}{2}, \quad (27)$$

$$\Delta x_n = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{(L3_n - L3_i) - (LI_n - LI_i)}{2} - ((LI_n - LI_i) - (LI_n - LI_i)) \right], \quad (28)$$

onde,

$L1_n, L1_i$  – leituras do lado 1 nas épocas  $n$  e  $i$ , respetivamente;

$L2_n, L2_i$  – leituras do lado 2 nas épocas  $n$  e  $i$ , respetivamente;

$L3_n, L3_i$  – leituras do lado 3 nas épocas  $n$  e  $i$ , respetivamente;

$LI_n, LI_i$  – leituras na medida padrão (invar), nas épocas  $n$  e  $i$ , respetivamente.

Nas Figuras 3.4 e 3.5 representam-se os movimentos relativos observados desde 2010 nas bases de alongâmetro selecionadas para este estudo.

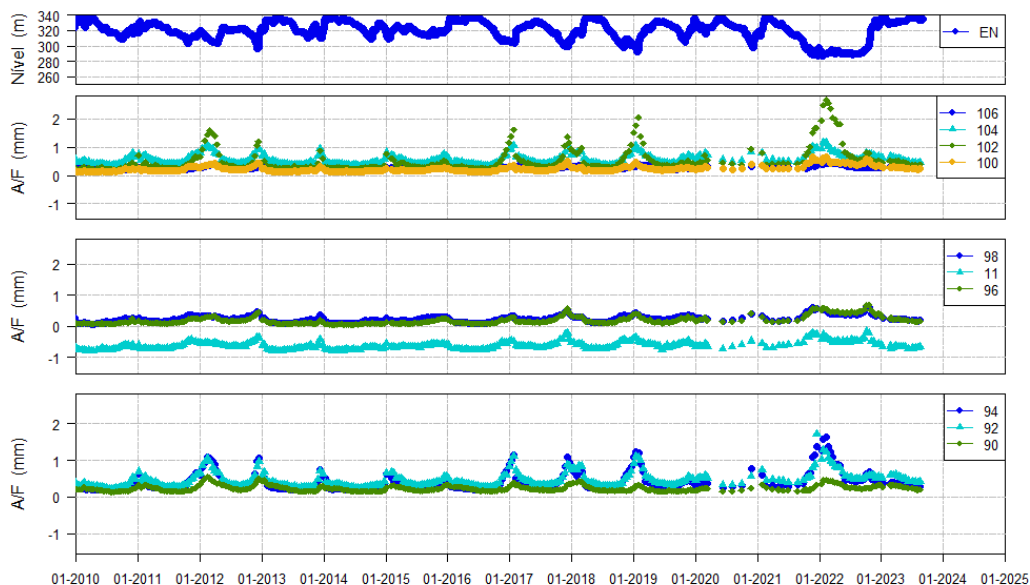


Figura 3.4 – Movimentos relativos de abertura/fecho em juntas observados desde 2010 nas bases de alongâmetro selecionadas para o estudo R&R

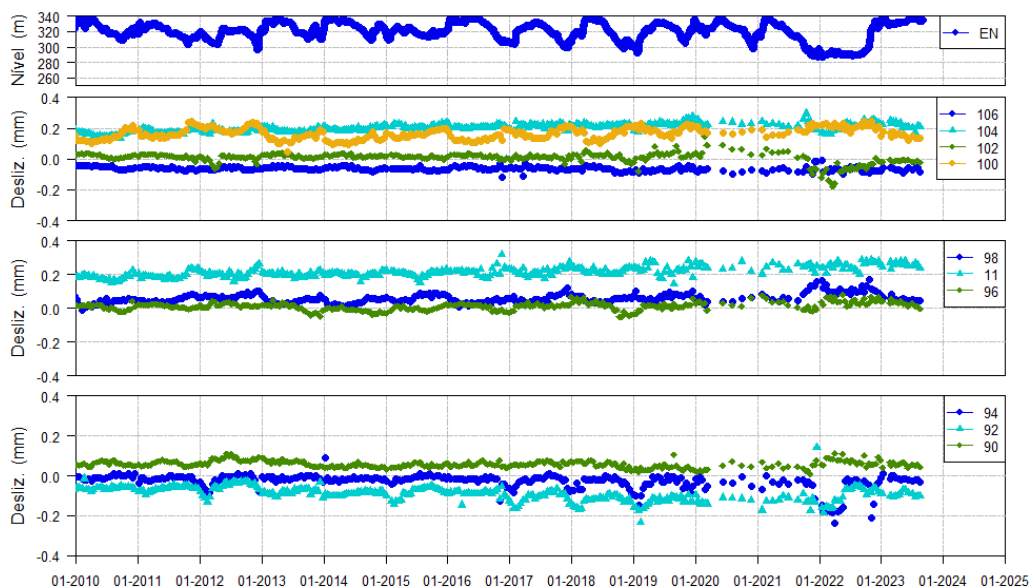


Figura 3.5 – Movimentos relativos de deslizamento em juntas observados desde 2010 nas bases de alongâmetro selecionadas para o estudo R&R

Nos estudos realizados foi utilizado um alongâmetro com uma resolução da medição igual a 0,01 mm. Todas as bases têm a disposição apresentada na Figura 3.3 c).

### 3.5 Medição de deslocamentos horizontais em fios de prumo

Os fios de prumo são materializados por fios de aço tensionados, instalados em orifícios verticais que atravessam o corpo das barragens, fixos numa das suas extremidades e sujeito a uma força vertical na outra extremidade, mantendo-se assim numa vertical perfeita ao longo do tempo. Os fios de prumo direitos são fixos na sua extremidade superior e sujeitos a um peso na sua extremidade inferior. Os fios de prumo invertidos são fixos na sua extremidade inferior, sendo em geral selados no fundo de um furo aberto na fundação, e sujeitos a uma força vertical no seu topo, aplicada por um flutuador imerso num tanque com água. Nas interseções do orifício onde está instalado o fio com as galerias de visita das barragens são instaladas bases de coordenómetro, onde é possível medir a distância, segundo duas direções horizontais e ortogonais, entre o fio e o ponto de fixação da base e entre o fio e um cilindro fixo à estrutura (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Medição de deslocamentos com fios de prumo: a) base de coordenómetro e respetivo cilindro; e b) coordenómetro ótico

A evolução da variação destas distâncias permite determinar os deslocamentos dos pontos de fixação das bases de coordenómetro entre duas épocas de observação,  $i$  e  $n$ , nas direções radial e tangencial, respetivamente:

$$\Delta LR_n = F_R [(LRF_n - LRF_i) - (LRC_n - LRC_i)] \quad (29)$$

$$\Delta LT_n = F_T [(LTF_n - LTF_i) - (LTC_n - LTC_i)] \quad (30)$$

onde,

$\Delta LR_n$  – deslocamento horizontal na direção radial;

$\Delta LT_n$  – deslocamento horizontal na direção tangencial;

$LRF_n, LRF_i$  – leitura radial ao fio na época  $n$  e na época inicial  $i$ ;

$LTF_n, LTF_i$  – leitura tangencial ao fio na época  $n$  e na época inicial  $i$ ;

$LRC_n, LRC_i$  – leitura radial ao cilindro na época  $n$  e na época inicial  $i$ ;

$LTC_n, LTC_i$  – leitura tangencial ao cilindro na época  $n$  e na época inicial  $i$ ;

$F_R$  e  $F_T$  – fatores de convenção para os deslocamentos radiais e tangenciais, respetivamente; tomam o valor +1 ou -1 em função da posição da base de coordenómetro relativamente aos eixos da barragem (Figura 3.7).

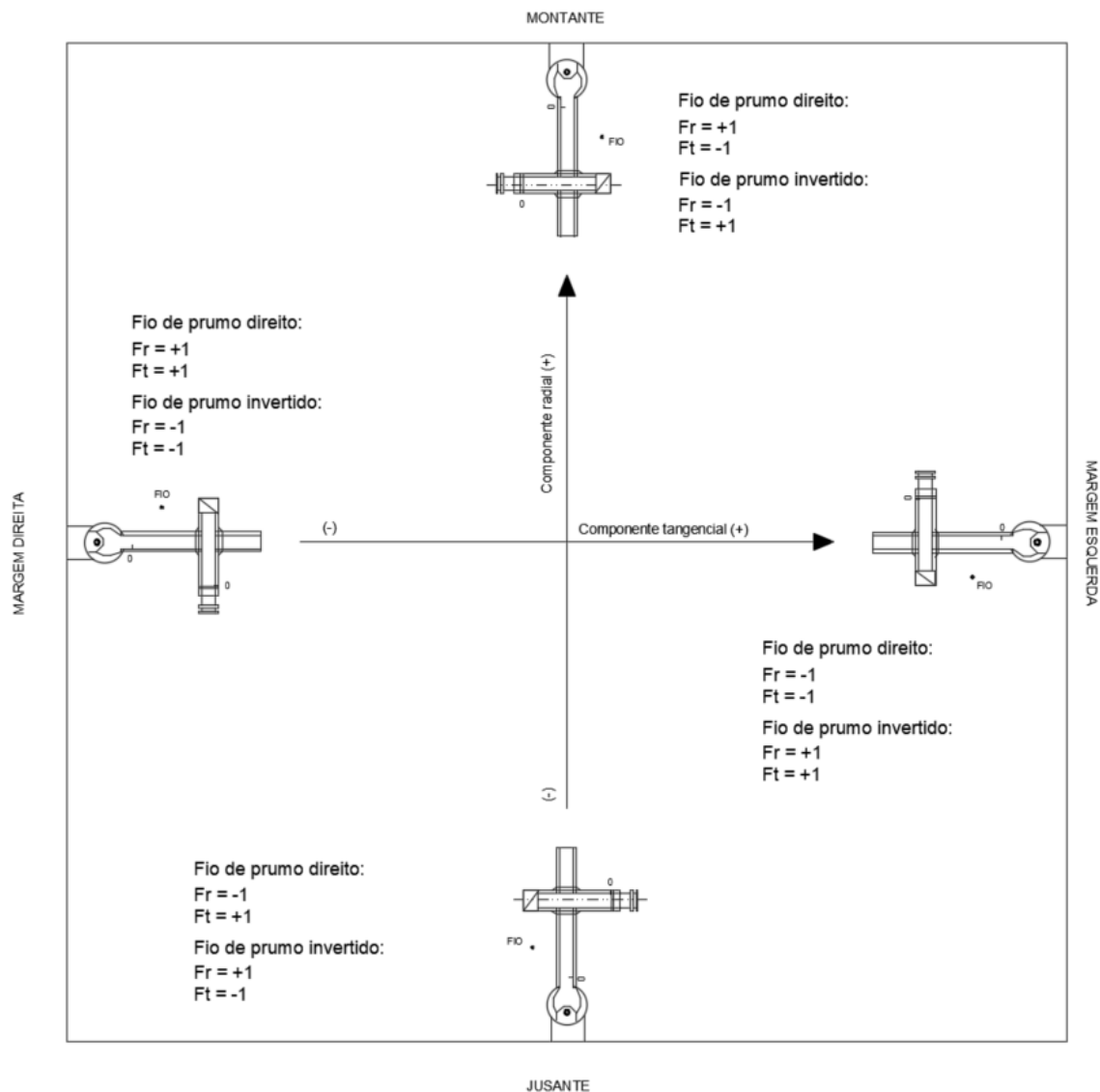


Figura 3.7 – Posição das bases de coordenómetro e correspondentes fatores  $F_R$  e  $F_T$

Nas Figuras 3.8 e 3.9 representam-se os deslocamentos observados desde 2010 nas bases de coordenómetro seleccionadas para este estudo.

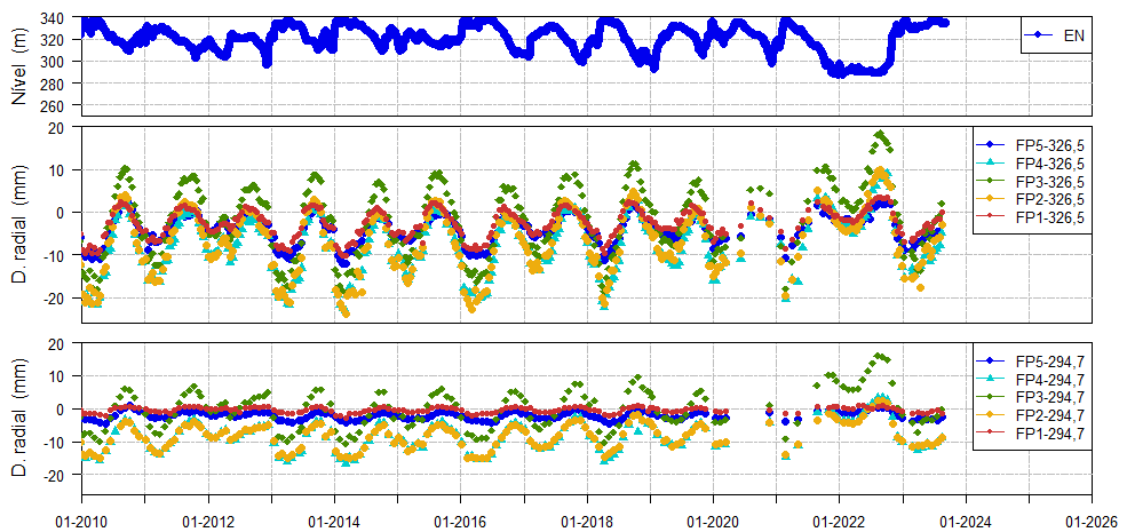


Figura 3.8 – Deslocamentos radiais observados desde 2010 nas bases de coordenómetro seleccionadas para o estudo R&R

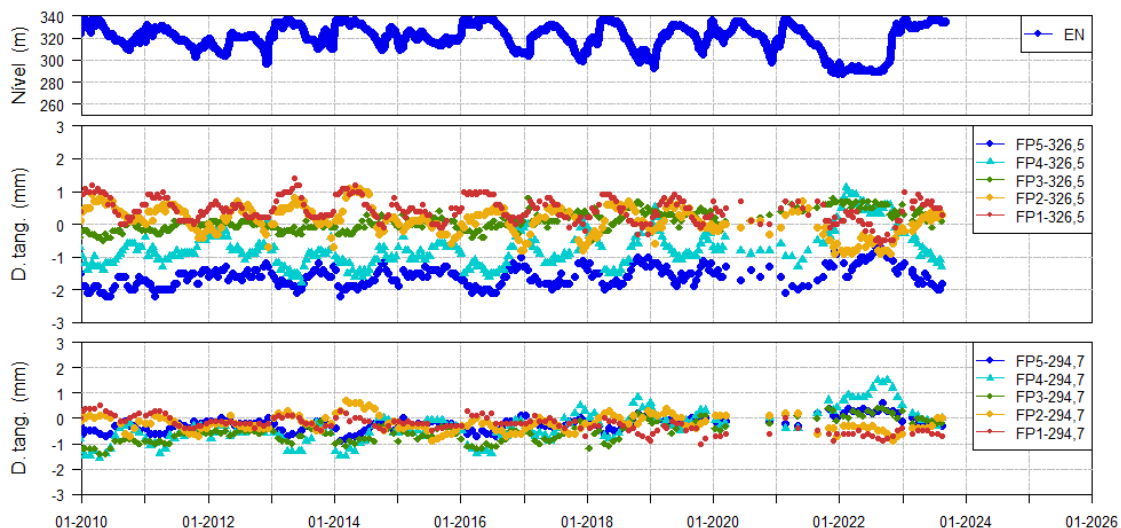


Figura 3.9 – Deslocamentos tangenciais observados desde 2010 nas bases de coordenómetro seleccionadas para o estudo R&R

### 3.6 Medição de deslocamentos com extensómetros de varas

Os extensómetros de varas são materializados por uma vara de aço, selada no fundo de um furo aberto na fundação ou no corpo da barragem, que permite a medição de deslocamentos relativos, segundo a sua orientação, entre o ponto de medição, situado no topo do furo, e o ponto de selagem, situado num ponto do interior do furo (Figura 3.10). Num mesmo furo podem ser instaladas uma ou mais varas, sendo assim possível determinar deslocamentos relativos entre o topo dos furos e vários pontos de selagem das varas, situados ao longo do furo. O cálculo dos deslocamentos baseia-se em leituras, com um defletómetro, da distância entre o topo da vara e um ponto fixo situado na estrutura.





Figura 3.10 – Cabeça de leitura de um extensómetro de varas, onde estão colocados um defletómetro e um dispositivo de recolha automática

A variação das leituras permite determinar os deslocamentos entre duas épocas de observação,  $i$  e  $n$  na direção correspondente à orientação da vara:

$$\delta_n = -[(LV_n - LV_i) - (LI_n - LI_i)], \quad (31)$$

onde,

$LI_n, LI_i$  – medição da medida materializada (invar) na época  $n$  e na época inicial,  $i$ ;

$LV_n, LV_i$  – medição dimensional da vara na época  $n$  e na época inicial,  $i$ .

Na Figura 3.11 representam-se os deslocamentos observados desde 2010 nos extensómetros de varas na fundação selecionados para este estudo.

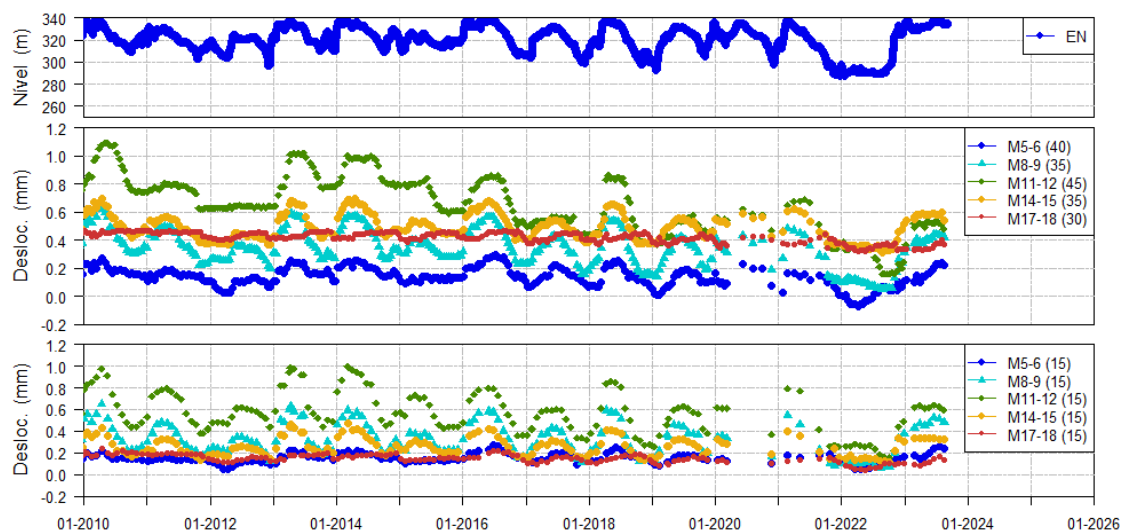


Figura 3.11 – Deslocamentos observados desde 2010 nos extensómetros de varas selecionados para o estudo R&R

### 3.7 Medição de subpressões em piezómetros manométricos

As subpressões na base das barragens de betão, devidas à percolação da água pela sua fundação, são usualmente determinadas pela medição da pressão da água em furos abertos no maciço de fundação, dotados de um manómetro no seu topo (Figura 3.12). Embora a pressão possa ser medida em várias câmaras de medição ao longo do furo, em regra são utilizados furos com uma única câmara, correspondente a todo o furo.



Figura 3.12 – Manómetro e dispositivo de recolha automática de um piezómetro, instalado na fundação de uma barragem de betão

No caso dos piezómetros, a leitura do manómetro indica de imediato a grandeza de interesse, ou seja, a pressão, geralmente em bar.

Na Figura 3.13 representam-se as pressões observadas desde 2010 nos piezómetros seleccionados para este estudo.

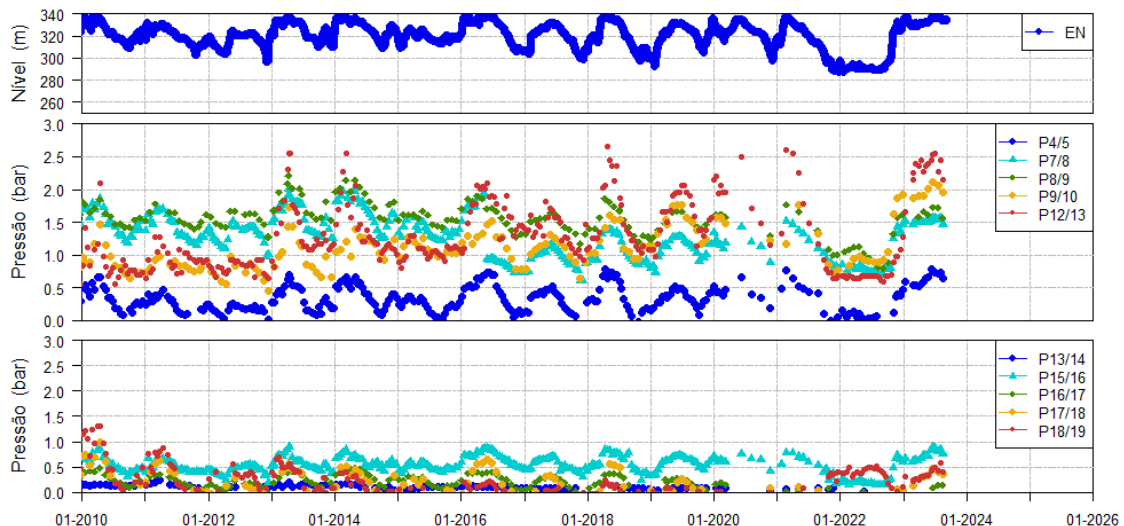


Figura 3.13 – Subpressões observadas desde 2010 nos manómetros dos piezómetros seleccionados para o estudo R&R

## 4 | Resultados dos estudos de repetibilidade e de reprodutibilidade na observação da barragem do Alto Lindoso

### 4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos estudos experimentais realizados na barragem do Alto Lindoso, nas condições descritas no capítulo anterior.

Em cada um dos subcapítulos seguintes agrupam-se os dados e os resultados por tipo de medição, analisando primeiro as incertezas relacionadas com as leituras (dados primários) e depois a sua propagação no algoritmo de cálculo das grandezas físicas de interesse (grandezas observadas).

### 4.2 Movimentos de abertura-fecho e de deslizamento em bases de alongâmetro

#### 4.2.1 Apetos gerais

A medição do movimento de abertura-fecho e de deslizamento em juntas de contração foi efetuada, de forma indireta, com recurso a um alongâmetro. Na campanha de medição manual, efetuada no âmbito deste estudo de R&R, foi utilizado um alongâmetro com uma resolução de medição igual a 0,01 mm.

#### 4.2.2 Dados primários - leitura do lado 1

No Quadro 4.1 apresentam-se as leituras realizadas pelos diferentes operadores, no lado 1 das bases de alongâmetro selecionadas.

Quadro 4.1 – Leituras no lado 1 das bases de alongâmetro (em mm)

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	5,36	4,78	5,07	5,49	4,78	5,65	5,71	5,88	4,90	4,94
	5,39	4,79	5,07	5,49	4,73	5,65	5,70	5,87	4,90	4,94
	5,39	4,79	5,07	5,49	4,77	5,65	5,72	5,90	4,91	4,95
Operador B	5,39	4,79	5,07	5,51	4,80	5,66	5,72	5,91	4,91	4,95
	5,39	4,78	5,06	5,49	4,79	5,66	5,73	5,90	4,90	4,92
	5,39	4,78	5,07	5,49	4,78	5,67	5,72	5,89	4,93	4,93
Operador C	5,36	4,81	5,07	5,52	4,81	5,65	5,74	5,93	4,93	4,94
	5,42	4,80	5,07	5,51	4,78	5,64	5,72	5,90	4,92	4,96
	5,41	4,81	5,07	5,48	4,79	5,66	5,72	5,91	4,92	4,95

A Figura 4.1 representa as diferenças relativas entre as medições associadas aos locais de medição (à esquerda), aos operadores (ao centro) e à sequência de medições (à direita), obtidas com base nos valores apresentados no Quadro 4.1.

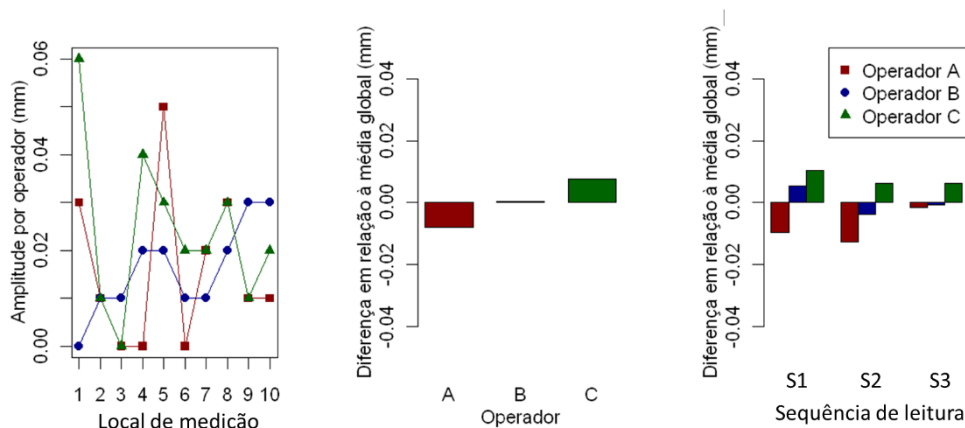


Figura 4.1 – Efeito do local, operador e sequência de medição (lado 1)

No Quadro 4.2 e no Quadro 4.3 são apresentados os resultados da análise de variância considerando, respetivamente, a presença ou a ausência do efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador nas medições efetuadas com o alongâmetro no lado 1 da base.

Quadro 4.2 – Resultados da análise da variância em bases de alongâmetro (lado 1), com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador

Fonte de variação	<i>SQ</i>	Graus de liberdade	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p – value</i>	<i>F<sub>crit</sub></i>
Grandeza	13,98152	9	1,553502	9915,972	$1,07 \times 10^{-91}$	2,040098
Operador	0,003687	2	0,001843	11,76596	$4,89 \times 10^{-5}$	3,150411
Interação Grandeza-Operador	0,003202	18	0,000178	1,13554	0,343034	1,778446
Repetibilidade	0,0094	60	0,000157			
Varição Total	13,99781	89				

Quadro 4.3 – Resultados da análise da variância em bases de alongâmetro (lado 1), sem efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador

Fonte de variação	<i>SQ</i>	Graus de liberdade	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p – value</i>
Grandeza	13,98152	9	1,553502	9615,224	$< 2,2 \times 10^{-16}$
Operador	0,00369	2	0,001843	11,409	$4,505 \times 10^{-5}$
Repetibilidade	0,01260	78	0,000162		
Varição Total	13,99781	89			

No Quadro 4.2 é possível verificar que, para o efeito da correlação entre os fatores Grandeza e Operador, o valor  $F_0$  é inferior ao  $F_{crit}$  ou, igualmente, que o *p – value* é superior ao nível de significância 0,05, pelo que a hipótese nula não é rejeitada. Consequentemente, o efeito da correlação é considerado não significativo, pelo que o modelo estatístico adotado, dado pela expressão (16), pode ser utilizado.

Por sua vez, no Quadro 4.3 é possível constatar que todos os valores de *p-value* são inferiores ao nível de significância de 0,05, pelo que a hipótese nula é rejeitada e os estimadores da variância podem ser determinados através das expressões (14), (17) e (18).

No Quadro 4.4 são apresentados os valores das estimativas das variâncias e respetivos desvios padrão obtidos para os fatores de variância considerados nas medições dimensionais do lado 1.

Quadro 4.4 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional do lado 1

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$ /mm <sup>2</sup>	$\hat{\sigma}$ /mm
R&R	0,000 218	0,014 8
Repetibilidade	0,000 162	0,012 7
Reprodutibilidade	0,000 056	0,007 5
Operador	0,000 056	0,007 5
Grandeza	0,172 593	0,415 4
Varição Total	0,172 811	0,415 7

Na Figura 4.2 são apresentadas as distribuições dos resíduos associados à análise de variância efetuada. No meio é apresentado um gráfico quantil-quantil normal, em que o quantil teórico corresponde ao quantil teórico de uma distribuição normal padrão com média zero e desvio padrão de valor unitário e o quantil da variável corresponde ao quantil dos observados da amostra em análise. A Figura 4.2 permite confirmar validade do modelo estatístico adotado, uma vez que os resíduos aparentam apresentar uma distribuição aleatória relativamente à ordem das medições e aos valores previstos e aparentam seguir, aproximadamente, uma distribuição normal.

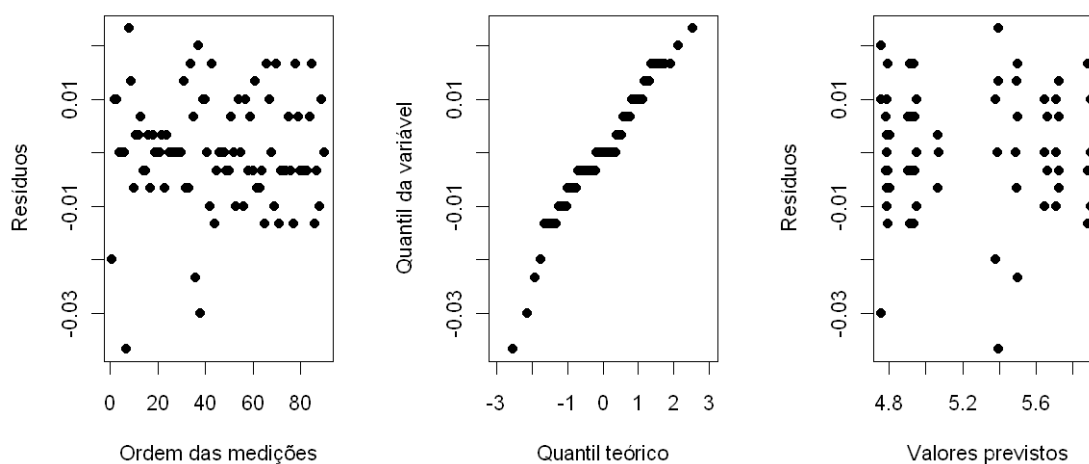


Figura 4.2 – Resíduos associados à análise da variância da medição dimensional do lado 1

### 4.2.3 Dados primários - leitura do lado 2

No Quadro 4.5 apresentam-se as leituras realizadas pelos diferentes operadores, no lado 2 das bases de alongâmetro selecionadas.

Quadro 4.5 – Amostra de valores dimensionais medidos no lado 2 (em mm)

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	7,22	5,97	5,66	5,15	4,57	6,27	5,61	5,58	5,35	4,88
	7,24	5,97	5,67	5,15	4,57	6,26	5,61	5,58	5,34	4,88
	7,23	5,97	5,67	5,16	4,59	6,27	5,63	5,59	5,35	4,89
Operador B	7,23	5,98	5,67	5,17	4,58	6,28	5,63	5,60	5,36	4,88
	7,23	5,97	5,67	5,14	4,57	6,27	5,63	5,59	5,35	4,88
	7,24	5,97	5,68	5,15	4,58	6,28	5,62	5,58	5,35	4,88
Operador C	7,25	5,99	5,65	5,19	4,54	6,28	5,64	5,58	5,33	4,92
	7,27	5,98	5,67	5,18	4,53	6,27	5,62	5,57	5,32	4,88
	7,23	5,97	5,66	5,18	4,54	6,27	5,62	5,57	5,32	4,88

A Figura 4.3 representa as diferenças relativas entre as medições associadas aos locais de medição (à esquerda), aos operadores (ao centro) e à sequência de medições (à direita), obtidas com base nos valores apresentados no Quadro 4.5.

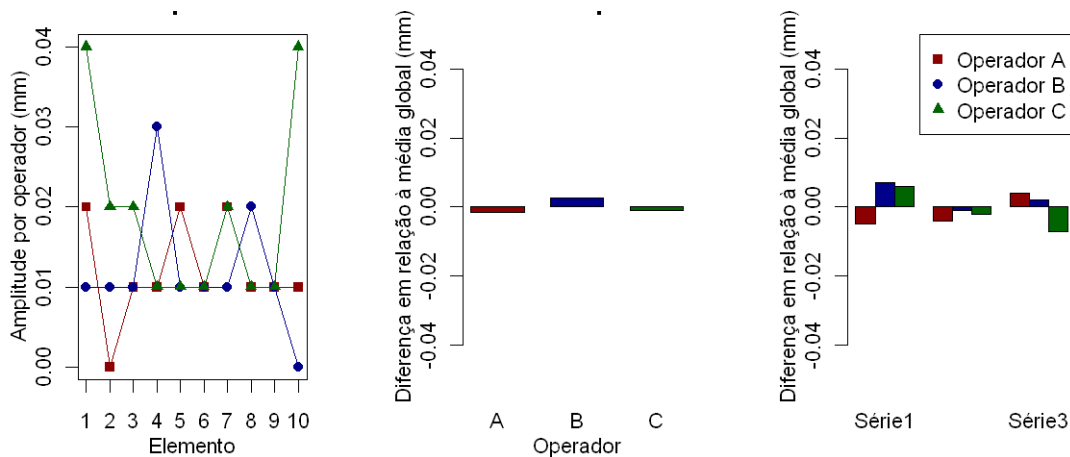


Figura 4.3 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (lado 2)

O Quadro 4.6 apresenta os resultados da análise de variância obtidos considerando a presença do efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador nas medições dimensionais efetuadas com o alongâmetro no lado 2 da base.

Quadro 4.6 – Resultados da análise da variância em bases de alongâmetro (lado 2), com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador

Fonte de variação	<i>SQ</i>	gl	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p – value</i>	<i>F<sub>crit</sub></i>
Grandeza	46,01621	9	5,112912	59761,31	$4,3 \times 10^{-115}$	2,040098
Operador	0,000327	2	0,000163	1,909091	0,15711	3,150411
Interação Grandeza-Operador	0,00834	18	0,000463	5,415584	$3,34 \times 10^{-07}$	1,778446
Repetibilidade	0,005133	60	$8,56 \times 10^{-05}$			
Varição Total	46,03001	89				

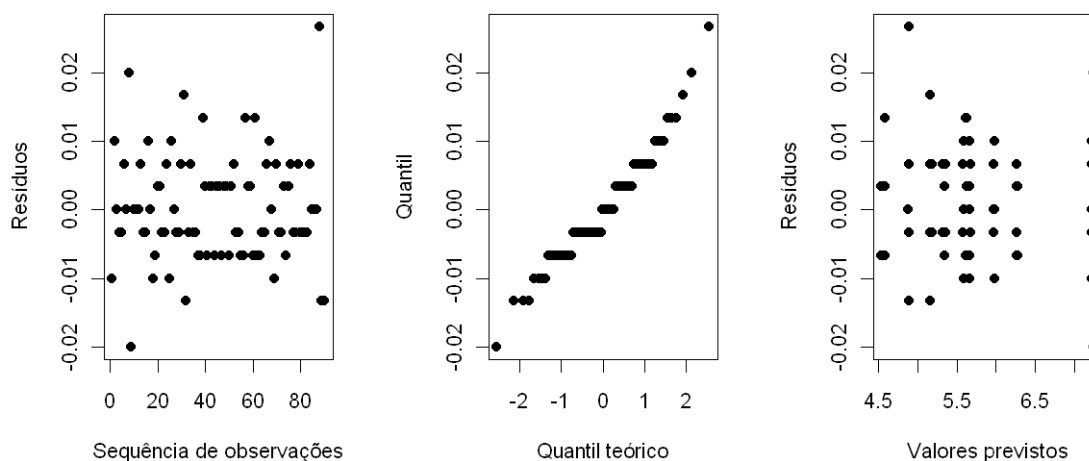
No Quadro 4.6 é possível constatar que a correlação entre os fatores é significativa, rejeitando-se, deste modo, a hipótese nula de independência entre os fatores Grandeza e Operador.

No Quadro 4.7 são apresentados os valores das estimativas das variâncias e respetivos desvios padrão, obtidos para os fatores de variação considerados na medição dimensional do lado 2.

**Quadro 4.7 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional do lado 2**

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$ /mm <sup>2</sup>	$\hat{\sigma}$ /mm
R&R	0,000 201	0,014 2
Repetibilidade	0,000 086	0,009 2
Reprodutibilidade	0,000 116	0,010 8
Operador	0,000 000	0,000 0
Interação Grandeza-Operador	0,000 126	0,011 2
Grandeza	0,568 050	0,753 7
Varição Total	0,568 251	0,753 8

Na Figura 4.4 são apresentadas as distribuições dos resíduos associados à análise de variância efetuada, que confirmam a validade do modelo estatístico adotado.



**Figura 4.4 – Resíduos associados à análise da variância da medição dimensional do lado 2**

#### 4.2.4 Dados primários - leitura do lado 3

No Quadro 4.8 é apresentada a amostra de valores dimensionais medidos no lado 3 nas bases de alongâmetro, pelos diferentes operadores, em locais de interesse na barragem do Alto Lindoso.

**Quadro 4.8 – Amostra de valores dimensionais medidos no lado 3 (em mm)**

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	5,44	5,17	5,26	3,98	4,64	2,41	4,58	5,20	4,50	4,90
	5,45	5,17	5,26	3,98	4,62	2,44	4,58	5,20	4,51	4,90
	5,44	5,17	5,28	4,01	4,63	2,44	4,59	5,21	4,53	4,90
Operador B	5,45	5,18	5,28	4,00	4,64	2,44	4,59	5,20	4,52	4,90
	5,43	5,17	5,26	4,00	4,63	2,44	4,59	5,21	4,55	4,90
	5,45	5,18	5,27	4,00	4,62	2,42	4,58	5,20	4,53	4,90
Operador C	5,48	5,17	5,29	3,99	4,65	2,42	4,58	5,24	4,57	4,93
	5,44	5,19	5,28	3,99	4,63	2,42	4,57	5,21	4,54	4,93
	5,41	5,19	5,28	3,98	4,64	2,42	4,56	5,22	4,54	4,92

A Figura 4.5 apresenta as representações gráficas das diferenças relativas entre as medições associadas aos locais de medição (à esquerda), aos operadores (ao centro) e à sequência de medições (à direita), obtidas com base nos valores mencionados no Quadro 4.8.

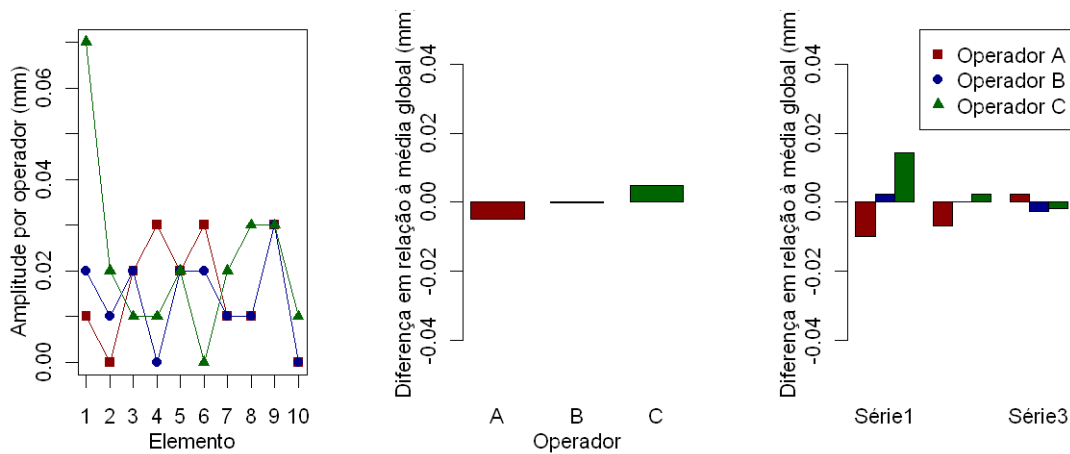


Figura 4.5 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (lado 3)

No Quadro 4.9 são apresentados os resultados da análise de variância, considerando os fatores Grandeza, Operador e o efeito da correlação entre estes fatores.

Quadro 4.9 – Resultados da análise da variância em bases de alongâmetro (lado 3), com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador

Fonte de variação	$SQ$	Graus de liberdade	$MQ$	$F$	$p - value$	$F_{crit}$
Grandeza	63,4998	9	7,055533	50799,84	$5,7 \times 10^{-113}$	2,040098
Operador	0,001402	2	0,000701	5,048	0,009413	3,150411
Interação Grandeza-Operador	0,00482	18	0,000268	1,928	0,030297	1,778446
Repetibilidade	0,008333	60	0,000139			
Varição Total	63,51436	89				

Verifica-se, através do Quadro 4.9, que a correlação entre os fatores é significativa, rejeitando-se a hipótese nula de independência entre os fatores Grandeza e Operador.

No Quadro 4.10 são apresentados os valores das variâncias e respetivos desvios padrão do estudo R&R da medição dimensional do lado 3.

Quadro 4.10 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional do lado 3

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$ /mm <sup>2</sup>	$\hat{\sigma}$ /mm
R&R	0,000 196	0,014 0
Repetibilidade	0,000 139	0,011 8
Reprodutibilidade	0,000 057	0,007 6
Operador	0,000 014	0,003 8
Interação Grandeza-Operador	0,000 043	0,006 6
Grandeza	0,783 918	0,885 4
Varição Total	0,784 115	0,885 5



Na Figura 4.6 são apresentadas as distribuições dos resíduos associados à análise de variância efetuada, as quais confirmam a validade do modelo estatístico adotado.

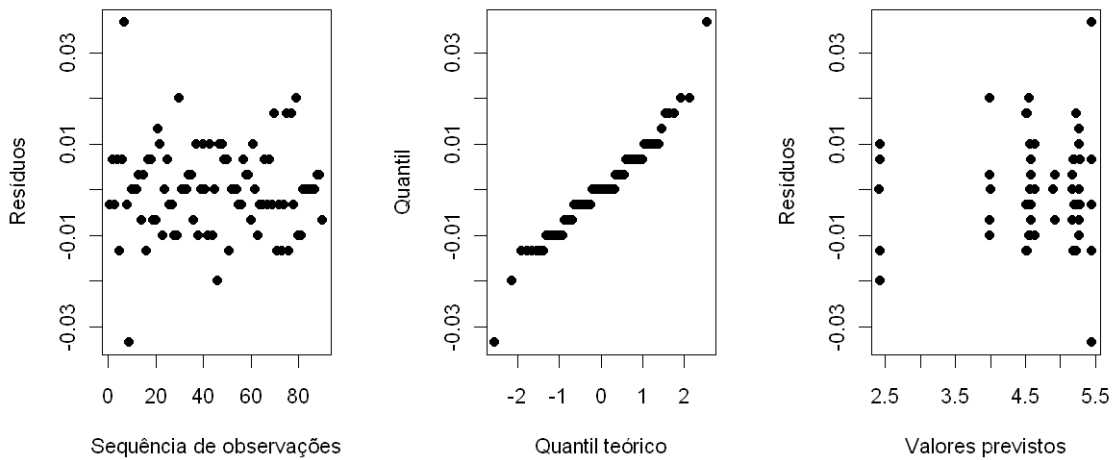


Figura 4.6 – Resíduos associados à análise da variância da medição dimensional do lado 3

#### 4.2.5 Resultados finais

No caso das bases de alongâmetro, as grandezas de interesse (de saída), numa determinada época  $n$  relativamente a uma época inicial  $i$ , correspondem ao movimento abertura-fecho ( $\Delta y_n$ ) e ao deslizamento ( $\Delta x_n$ ), as quais são obtidas indiretamente através das seguintes expressões:

$$\Delta y_n = -\frac{(L3_n - L3_i) - (LI_n - LI_i)}{2}, \quad (32)$$

$$\Delta x_n = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{(L3_n - L3_i) - (LI_n - LI_i)}{2} - ((LI_n - L1_i) - (LI_n - LI_i)) \right], \quad (33)$$

em que,

$L1_n, L1_i$  – leitura do lado 1 nas épocas  $n$  e  $i$ , respetivamente;

$L2_n, L2_i$  – leitura do lado 2 nas épocas  $n$  e  $i$ , respetivamente;

$L3_n, L3_i$  – leitura do lado 3 nas épocas  $n$  e  $i$ , respetivamente;

$LI_n, LI_i$  – leitura medida materializada padrão (invar), nas épocas  $n$  e  $i$ , respetivamente.

O procedimento adotado na medição das bases de alongâmetro inclui o ajuste do alongâmetro com recurso a medida materializada padrão (invar), sendo possível assumir que  $LI_n = LI_i$  e, portanto,  $LI_n - LI_i = 0$ .

Considerando, numa primeira abordagem, que a incerteza de medição das grandezas  $LI_n$  e  $LI_i$  é desprezável relativamente às restantes grandezas de entrada (medições dimensionais dos lados), a

aplicação da Lei de Propagação da Incerteza às expressões (34) e (35) permite determinar as variâncias totais associadas ao movimento de abertura-fecho e ao deslizamento através de,

$$\hat{\sigma}_{R\&R,Abertura}^2 = \hat{\sigma}_{R\&R,Lado3}^2, \quad (34)$$

$$\hat{\sigma}_{R\&R,Deslizamento}^2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \hat{\sigma}_{R\&R,Lado3}^2 + 2\hat{\sigma}_{R\&R,Lado1}^2 \right), \quad (35)$$

onde não se considera o efeito da correlação entre grandezas de entrada.

No Quadro 4.11 são apresentadas as respetivas incertezas de medição para os intervalos de confiança de 68,26 %, 95,44 % e 99,77 %.

**Quadro 4.11 – Incertezas de medição da repetibilidade e reprodutibilidade da medição do movimento de abertura fecho e deslizamento em bases de alongâmetro**

Intervalo de confiança	$\hat{\sigma}_{R\&R}$ 68,26%	$2\hat{\sigma}_{R\&R}$ 95,44%	$3\hat{\sigma}_{R\&R}$ 99,74%
Movimento de abertura-fecho (mm)	0,014	0,028	0,042
Deslizamento (mm)	0,019	0,038	0,057

### 4.3 Deslocamentos radial e tangencial em fios de prumo

#### 4.3.1 Aspetos gerais

A medição dos deslocamentos radial e tangencial com fio de prumo é efetuada, de forma indireta, com recurso a um coordenómetro ótico. Na campanha de medição manual, efetuada no âmbito deste estudo de R&R, foi utilizado um coordenómetro com uma resolução de medição igual a 0,01 mm.

#### 4.3.2 Dados primários - leitura radial ao fio

No Quadro 4.12 é apresentada a amostra de valores dimensionais medidos relativos à componente radial ao fio de prumo, pelos diferentes operadores, em locais de interesse na barragem do Alto Lindoso.

**Quadro 4.12 – Amostra de valores dimensionais medidos no fio de prumo – componente radial ao fio (em mm)**

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	5,87	2,01	1,44	3,88	2,81	7,92	7,85	7,98	10,50	2,85
	5,87	2,01	1,44	3,90	2,80	7,92	7,85	7,97	10,51	2,84
	5,86	2,01	1,45	3,90	2,80	7,93	7,86	7,97	10,51	2,84
Operador B	5,86	2,00	1,43	3,88	2,80	7,93	7,85	7,97	10,51	2,83
	5,86	2,00	1,43	3,88	2,80	7,93	7,85	7,96	10,51	2,84
	5,86	2,00	1,44	3,88	2,80	7,93	7,85	7,96	10,51	2,84
Operador C	5,88	2,00	1,44	3,87	2,81	7,92	7,84	7,96	10,51	2,85
	5,87	2,02	1,43	3,87	2,81	7,93	7,96	7,96	10,50	2,83
	5,88	2,01	1,44	3,87	2,82	7,94	7,86	7,96	10,51	2,85

A Figura 4.7 apresenta as representações gráficas das diferenças relativas entre medições associadas aos locais de medição (à esquerda), aos operadores (ao centro) e sequência de medições (à direita), obtidas com base nos valores mencionados no Quadro 4.12.

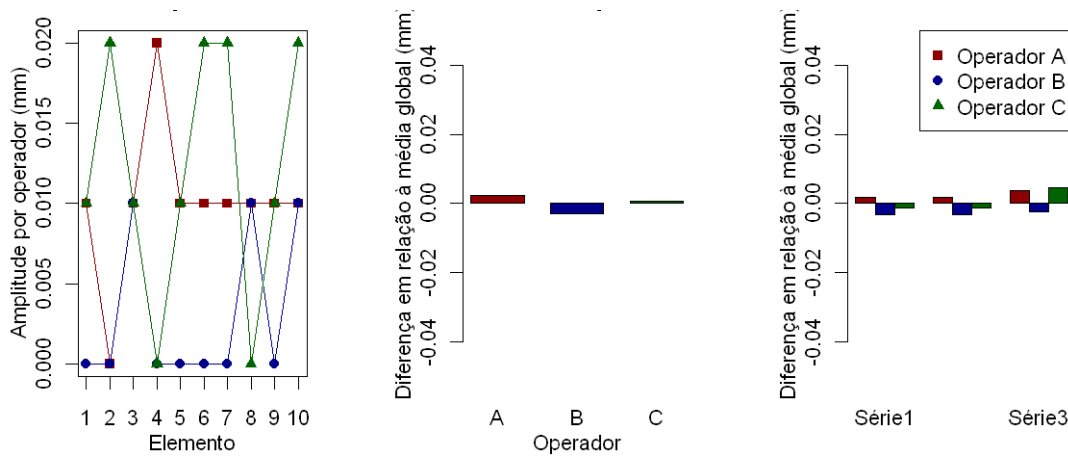


Figura 4.7 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (componente radial ao fio)

O Quadro 4.13 apresenta os resultados da análise de variância efetuada, considerando o efeito da correlação.

Quadro 4.13 – Resultados da análise de variância com correlação entre os fatores Grandeza e Operador (componente radial ao fio)

Fonte de variação	<i>SQ</i>	Graus de liberdade	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p – value</i>	<i>F<sub>crit</sub></i>
Grandeza	792,100 2	9	88,011 13	2 400 304	3,3x10 <sup>-163</sup>	2,040 098
Operador	0,000 447	2	0,000 223	6,090 909	0,003 906	3,150 411
Interação Grandeza-Operador	0,001 953	18	0,000 109	2,959 596	0,000 849	1,778 446
Repetibilidade	0,002 2	60	3,67x10 <sup>-5</sup>			
Varição Total	792,104 8	89				

O Quadro 4.13 mostra que a correlação entre os fatores Grandeza e Operador é significativa, rejeitando-se a hipótese nula de independência entre ambos.

Por sua vez, o Quadro 4.14 apresenta os valores das estimativas obtidas para as fontes de variação consideradas na medição da componente radial ao fio de prumo.

Quadro 4.14 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional da componente radial ao fio

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$ /mm <sup>2</sup>	$\hat{\sigma}$ /mm
R&R	0,000 064	0,008 0
Repetibilidade	0,000 037	0,006 1
Reprodutibilidade	0,000 028	0,005 3
Operador	0,000 004	0,002 0
Interação Grandeza-Operador	0,000 024	0,004 9
Grandeza	9,779 002	3,127 1
Varição Total	9,779 067	3,127 1

Na Figura 4.8 são apresentadas as distribuições dos resíduos associados à análise de variância efetuada, as quais confirmam a validade do modelo estatístico adotado.

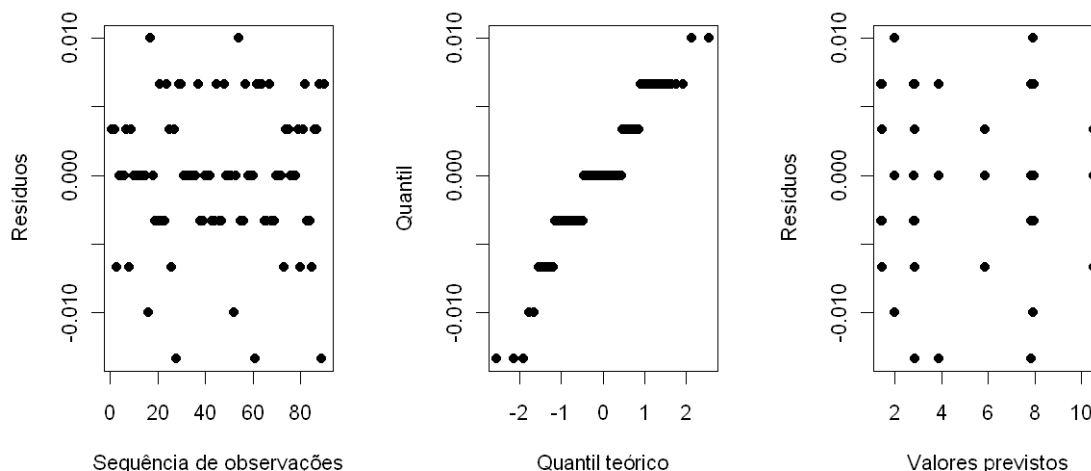


Figura 4.8 – Resíduos associados à análise de variância da medição da componente radial ao fio

### 4.3.3 Dados primários - leitura radial ao cone

No Quadro 4.15 é apresentada a amostra de valores dimensionais medidos relativos à componente radial ao cone, pelos diferentes operadores, em locais de interesse na barragem do Alto Lindoso.

Quadro 4.15 – Amostra de valores dimensionais medidos no fio de prumo – componente radial ao cone (em mm)

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	1,66	1,83	1,49	0,86	0,72	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,65	1,82	1,48	0,85	0,72	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,65	1,82	1,48	0,86	0,71	4,16	3,10	7,27	3,96	0,69
Operador B	1,65	1,82	1,48	0,85	0,72	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,66	1,82	1,48	0,84	0,71	4,17	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,65	1,82	1,48	0,85	0,71	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
Operador C	1,66	1,83	1,48	0,86	0,70	4,17	3,10	7,27	3,96	0,69
	1,67	1,82	1,47	0,86	0,70	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,67	1,82	1,48	0,85	0,70	4,17	3,10	7,28	3,97	0,69

A Figura 4.9 apresenta as representações gráficas das diferenças relativas entre medições associadas aos locais de medição (à esquerda), aos operadores (ao centro) e sequência de medições (à direita), obtidas com base nos valores mencionados no Quadro 4.15.

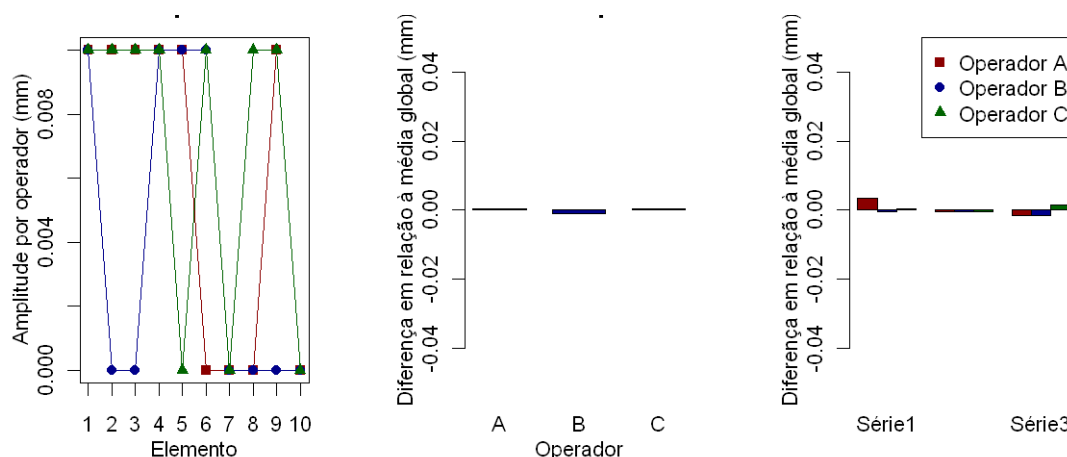


Figura 4.9 – Efeito do local, operador e seqüência de medição dimensional (componente radial ao cone)

O Quadro 4.16 apresenta os resultados da análise de variância efetuada, mostrando que todos os valores de *p-value* são inferiores ao nível de significância de 0,05, pelo que a hipótese nula é rejeitada. Por sua vez, o Quadro 4.17 apresenta os valores das estimativas obtidas para as fontes de variação consideradas na medição da componente radial ao cone.

Na Figura 4.10 são apresentadas as distribuições dos resíduos associados à análise de variância efetuada, as quais confirmam a validade do modelo estatístico adotado.

Quadro 4.16 – Resultados da análise de variância com correlação entre os fatores Grandeza e Operador (componente radial ao cone)

Fonte de variação	<i>SQ</i>	Graus de liberdade	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F<sub>crit</sub></i>
Grandeza	354,5476	9	39,39418	2085574	2,3x10 <sup>-161</sup>	2,040098
Operador	3,56x10 <sup>-5</sup>	2	1,78x10 <sup>-5</sup>	0,941176	0,395852	3,150411
Interação Grandeza-Operador	0,001187	18	6,59x10 <sup>-5</sup>	3,490196	0,000139	1,778446
Repetibilidade	0,001133	60	1,89x10 <sup>-5</sup>			
Varição Total	354,55	89				

Quadro 4.17 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional da componente radial ao cone

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$ /mm <sup>2</sup>	$\hat{\sigma}$ /mm
R&R	0,000 033	0,005 7
Repetibilidade	0,000 019	0,004 3
Reprodutibilidade	0,000 014	0,003 8
Operador	0,000 000	0,000 0
Interação Grandeza-Operador	0,000 016	0,004 0
Grandeza	4,377 124	2,092 2
Varição Total	4,377 157	2,092 2

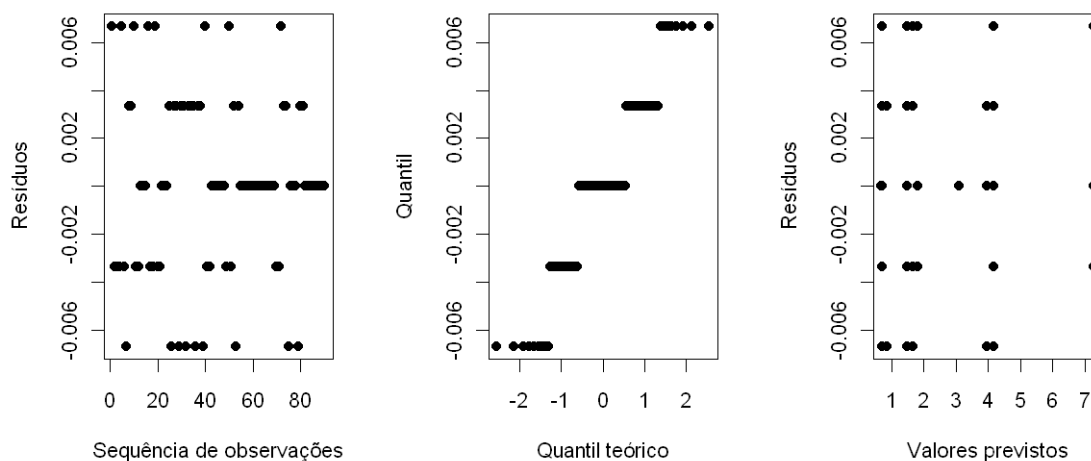


Figura 4.10 – Resíduos associados à análise de variância da medição da componente radial ao cone

#### 4.3.4 Dados primários - leitura tangencial ao fio

No Quadro 4.18 é apresentada a amostra de valores dimensionais medidos relativos à componente tangencial ao fio, pelos diferentes operadores, em locais de interesse na barragem do Alto Lindoso.

Quadro 4.18 – Amostra de valores dimensionais medidos no fio de prumo – componente tangencial ao fio (em mm)

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	10,36	10,00	8,65	3,55	9,87	1,02	5,36	5,29	5,19	7,43
	10,36	10,01	8,64	3,54	9,87	1,01	5,35	5,28	5,18	7,43
	10,35	10,01	8,65	3,54	9,86	1,01	5,36	5,28	5,18	7,43
Operador B	10,36	10,01	8,65	3,54	9,86	1,01	5,35	5,28	5,18	7,43
	10,36	10,01	8,65	3,53	9,87	1,01	5,36	5,27	5,18	7,43
	10,36	10,01	8,65	3,53	9,87	1,00	5,36	5,27	5,18	7,43
Operador C	10,36	10,01	8,65	3,54	9,86	1,00	5,36	5,28	5,17	7,43
	10,36	10,01	8,65	3,53	9,87	1,00	5,37	5,28	5,18	7,43
	10,37	10,02	8,66	3,53	9,85	1,00	5,37	5,27	5,18	7,43

A Figura 4.11 apresenta as representações gráficas das diferenças relativas entre medições associadas aos locais de medição (à esquerda), aos operadores (ao centro) e sequência de medições (à direita), obtidas com base nos valores mencionados no Quadro 4.18.

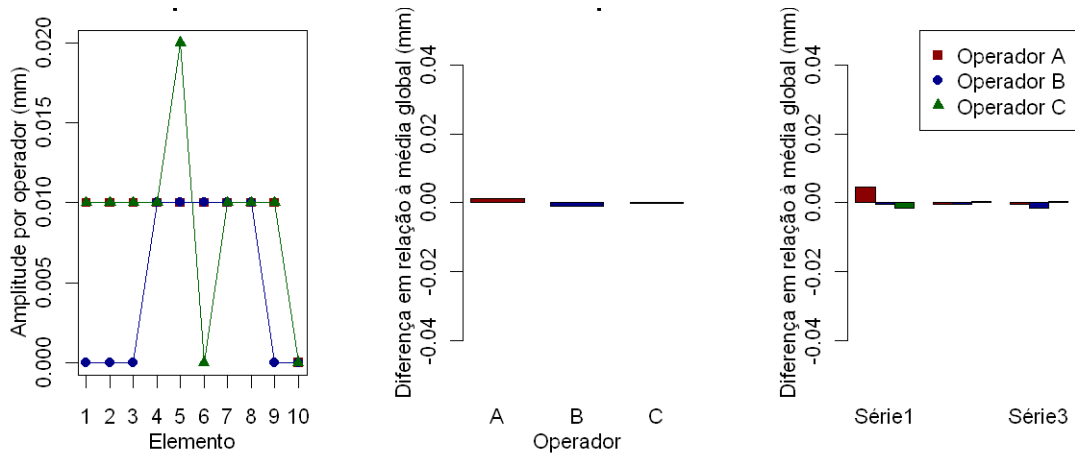


Figura 4.11 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (componente tangencial ao fio)

O Quadro 4.19 apresenta os resultados da análise de variância efetuada, para um nível de significância de 0,05, uma correlação significativa entre os fatores Grandeza e Operador.

Quadro 4.19 – Resultados da análise de variância com correlação entre os fatores Grandeza e Operador (componente tangencial ao fio)

Fonte de variação	$SQ$	Graus de liberdade	$MQ$	$F$	$p - value$	$F_{crit}$
Grandeza	785,1575	9	87,23972	3271490	$3,1 \times 10^{-167}$	2,040098
Operador	$6,22 \times 10^{-5}$	2	$3,11 \times 10^{-5}$	1,166 667	0,318 366	3,150411
Interação Grandeza-Operador	0,00112	18	$6,2 \times 10^{-5}$	2,324 074	0,007 749	1,778446
Repetibilidade	0,00160	60	$2,67 \times 10^{-5}$			
Varição Total	785,1603	89				

Por sua vez, o Quadro 4.20 apresenta os valores das estimativas obtidas para as fontes de variação consideradas na medição da componente tangencial ao fio.

Quadro 4.20 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional da componente tangencial ao fio

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$ /mm <sup>2</sup>	$\hat{\sigma}$ /mm
R&R	0,000 037	0,006 1
Repetibilidade	0,000 027	0,005 2
Reprodutibilidade	0,000 011	0,003 3
Operador	0,000 000	0,000 0
Interação Grandeza-Operador	0,000 012	0,003 4
Grandeza	9,693 295	3,113 4
Varição Total	9,693 333	3,113 4

Na Figura 4.12 são apresentadas as distribuições dos resíduos associados à análise de variância efetuada, as quais confirmam a validade do modelo estatístico adotado.

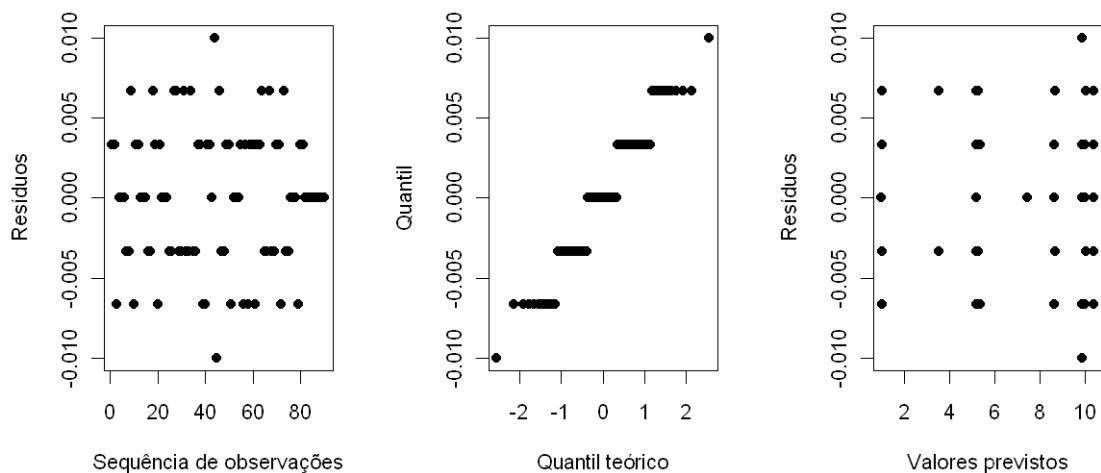


Figura 4.12 – Resíduos associados à análise de variância da medição da componente tangencial ao fio

### 4.3.5 Dados primários - leitura tangencial ao cone

No Quadro 4.21 é apresentada a amostra de valores dimensionais medidos relativos à componente tangencial ao cone, pelos diferentes operadores, em locais de interesse na barragem do Alto Lindoso.

Quadro 4.21 – Amostra de valores dimensionais medidos no fio de prumo – componente tangencial ao cone (em mm)

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	6,13	6,19	3,55	0,59	4,83	1,68	1,26	1,37	1,11	4,07
	6,15	6,19	3,54	0,59	4,84	1,68	1,27	1,36	1,11	4,08
	6,14	6,19	3,53	0,59	4,85	1,67	1,28	1,36	1,11	4,08
Operador B	6,15	6,19	3,54	0,59	4,85	1,67	1,27	1,36	1,11	4,08
	6,15	6,18	3,53	0,59	4,85	1,67	1,28	1,36	1,11	4,08
	6,15	6,19	3,53	0,59	4,85	1,67	1,27	1,36	1,11	4,08
Operador C	6,17	6,16	3,53	0,59	4,84	1,67	1,27	1,37	1,11	4,08
	6,17	6,17	3,53	0,58	4,82	1,67	1,28	1,37	1,11	4,08
	6,16	6,17	3,53	0,59	4,84	1,68	1,28	1,36	1,11	4,08

A Figura 4.13 apresenta as representações gráficas das diferenças relativas entre medições associadas aos locais de medição (à esquerda), aos operadores (ao centro) e sequência de medições (à direita), obtidas com base nos valores mencionados no Quadro 4.21.



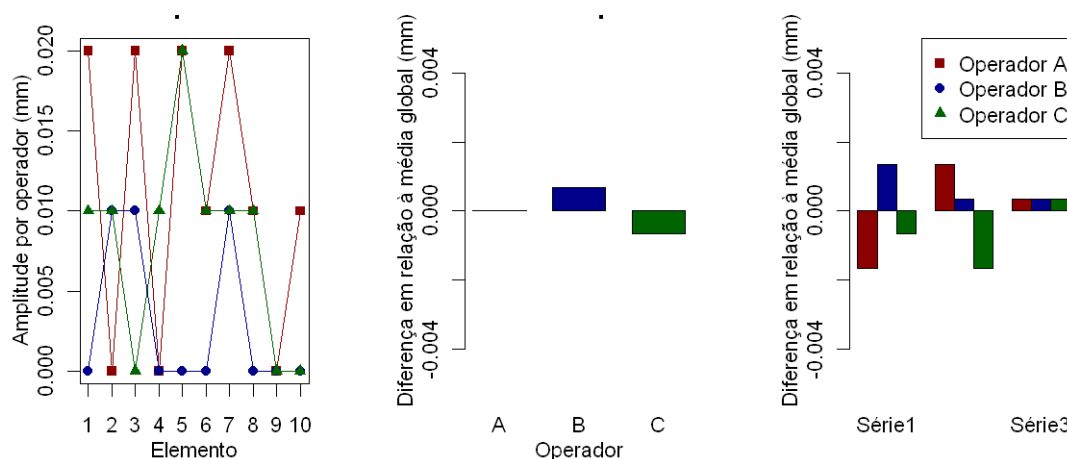


Figura 4.13 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional (componente tangencial ao cone)

O Quadro 4.22 apresenta os resultados da análise de variância efetuada, para um nível de significância de 0,05, uma correlação significativa entre os fatores Grandeza e Operador.

Quadro 4.22 – Resultados da análise de variância com correlação entre os fatores Grandeza e Operador (componente tangencial ao cone)

Fonte de variação	$SQ$	Graus de liberdade	$MQ$	$F$	$p - value$	$F_{crit}$
Grandeza	374,7374	9	41,63748	1338348	$1,4 \times 10^{-155}$	2,040098
Operador	$2,67 \times 10^{-5}$	2	$1,33 \times 10^{-5}$	0,428571	0,653417	3,150411
Interação Grandeza-Operador	0,00284	18	0,000158	5,071429	$9,18 \times 10^{-7}$	1,778446
Repetibilidade	0,001867	60	$3,11 \times 10^{-5}$			
Varição Total	374,7421	89				

Por sua vez, o Quadro 4.23 apresenta os valores das estimativas obtidas para as fontes de variação consideradas na medição.

Quadro 4.23 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional da componente tangencial ao cone

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$ /mm <sup>2</sup>	$\hat{\sigma}$ /mm
R&R	0,000 069	0,008 3
Repetibilidade	0,000 031	0,005 6
Reprodutibilidade	0,000 037	0,006 1
Operador	0,000 000	0,000 0
Interação Grandeza-Operador	0,000 042	0,006 5
Grandeza	4,626 370	2,150 9
Varição Total	4,626 438	2,150 9

Na Figura 4.14 são apresentadas as distribuições dos resíduos associados à análise de variância efetuada, as quais confirmam a validade do modelo estatístico adotado.

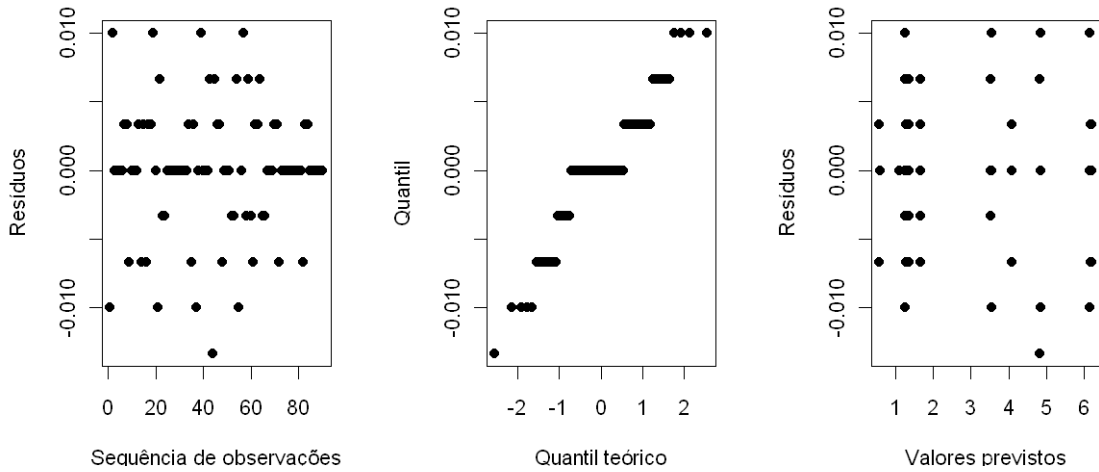


Figura 4.14 – Resíduos associados à análise de variância da medição da componente tangencial ao cone

#### 4.3.6 Resultados finais

Com base nas leituras efetuadas nas épocas  $n$  e na época inicial  $i$ , os deslocamentos horizontais na direção radial e tangencial são calculados, respetivamente, através das expressões (36) e (37),

$$\Delta LR_n = F_R \left[ (LRF_n - LRF_i) - (LRC_n - LRC_i) \right] \quad (36)$$

$$\Delta LT_n = F_T \left[ (LTF_n - LTF_i) - (LTC_n - LTC_i) \right] \quad (37)$$

em que,

$\Delta LR_n$  – deslocamento horizontal na direção radial;

$\Delta LT_n$  – deslocamento horizontal na direção tangencial;

$LRF_n, LRF_i$  – leitura radial ao fio na época  $n$  e na época inicial  $i$ ;

$LTF_n, LTF_i$  – leitura tangencial ao fio na época  $n$  e na época inicial  $i$ ;

$LRC_n, LRC_i$  – leitura radial ao cone na época  $n$  e na época inicial  $i$ ;

$LTC_n, LTC_i$  – leitura tangencial ao cone na época  $n$  e na época inicial  $i$ ;

$F_R$  – fator de convenção para o deslocamento radial; corresponde a um valor que varia em função da posição da base de coordenómetro, e pode assumir os valores +1 ou -1 (vide Figura 3.7);

$F_T$  – fator de convenção para o deslocamento tangencial; corresponde a um valor que varia em função da posição da base de coordenómetro, e pode assumir os valores +1 ou -1 (vide Figura 3.7).

A aplicação da Lei de Propagação da Incerteza às expressões (38) e (39) permite quantificar as variâncias associadas à repetibilidade e reprodutibilidade da medição do deslocamento horizontal radial e tangencial através de,

$$\hat{\sigma}_{R\&R,Radial}^2 = 2(\hat{\sigma}_{R\&R,RF}^2 + \hat{\sigma}_{R\&R,RC}^2) \quad (38)$$

$$\hat{\sigma}_{R\&R,Tangencial}^2 = 2(\hat{\sigma}_{R\&R,TF}^2 + \hat{\sigma}_{R\&R,TC}^2) \quad (39)$$

Salienta-se que, nas expressões anteriores, não foram consideradas as variâncias associadas às leituras radial e tangencial efetuadas na época inicial.

No Quadro 4.24 são apresentadas as respetivas incertezas de medição para os intervalos de confiança de 68,26 %, 95,44 % e 99,74 %.

**Quadro 4.24 – Incertezas de medição da repetibilidade e reprodutibilidade da medição dos deslocamentos horizontais radial e tangencial em fios de prumo**

Intervalo de confiança	$\hat{\sigma}_{R\&R}$ 68,26%	$2\hat{\sigma}_{R\&R}$ 95,44%	$3\hat{\sigma}_{R\&R}$ 99,74%
Deslocamento radial (mm)	0,014	0,029	0,042
Deslocamento tangencial (mm)	0,015	0,029	0,043

## 4.4 Deslocamentos com extensómetros de varas na fundação

### 4.4.1 Apetos gerais

A medição de deslocamentos com extensómetros de varas é efetuada, de forma indireta, com base em medições realizadas com recurso a um defletómetro. Na campanha de medição, efetuada no âmbito deste estudo de R&R, foi utilizado um defletómetro com uma resolução igual a 0,01 mm.

### 4.4.2 Dados primários

No Quadro 4.25 é apresentada a amostra de valores dimensionais medidos nos extensómetros de varas, pelos diferentes operadores, em locais de interesse na barragem do Alto Lindoso.

**Quadro 4.25 – Amostra de valores dimensionais medidos nos extensómetros de varas (em mm)**

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	5,22	5,00	5,48	5,15	5,87	5,42	5,19	5,34	4,71	4,93
	5,21	5,00	5,48	5,15	5,87	5,43	5,20	5,34	4,71	4,93
	5,21	5,00	5,48	5,15	5,88	5,43	5,20	5,34	4,71	4,93
Operador B	5,22	5,00	5,48	5,15	5,88	5,42	5,20	5,33	4,71	4,93
	5,22	5,00	5,48	5,18	5,88	5,43	5,20	5,34	4,71	4,93
	5,21	5,00	5,48	5,16	5,88	5,43	5,20	5,34	4,71	4,93
Operador C	5,22	5,00	5,48	5,15	5,87	5,43	5,20	5,33	4,71	4,93
	5,21	5,00	5,48	5,16	5,87	5,43	5,20	5,33	4,72	4,93
	5,22	5,01	5,48	5,15	5,86	5,42	5,20	5,33	4,72	4,93

A Figura 4.15 apresenta as representações gráficas das diferenças relativas entre medições associadas aos locais da medição (à esquerda), aos operadores (ao centro) e sequência de medições (à direita), obtidas com base nos valores mencionados no Quadro 4.25.

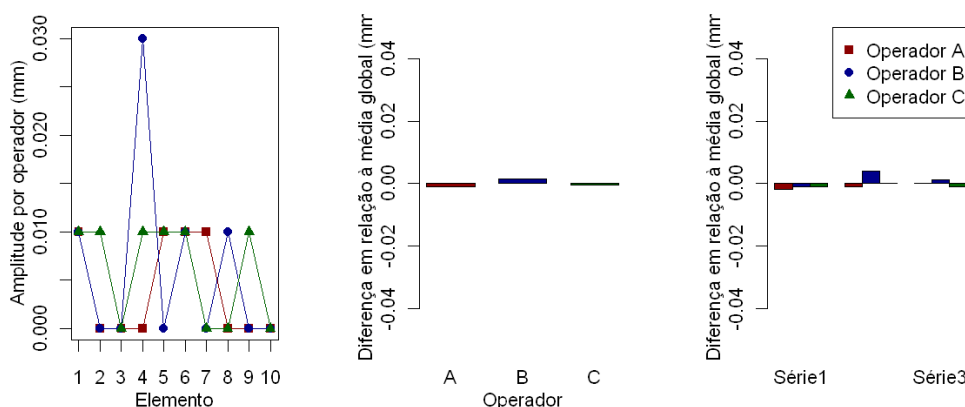


Figura 4.15 – Efeito do local, operador e sequência de medição dimensional em extensómetros de varas

O Quadro 4.26 apresenta os resultados da análise de variância obtidos considerando o efeito da correlação entre os fatores Grandeza e Operador.

Quadro 4.26 – Resultados da análise da variância com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador (deslocamentos em extensómetros de varas)

Fonte de variação	$SQ$	Graus de liberdade	$MQ$	$F$	$p - value$	$F_{crit}$
Grandeza	8,489849	9	0,943317	42449,24	$1,2 \times 10^{-110}$	2,040098
Operador	$9,56 \times 10^{-5}$	2	$4,78 \times 10^{-5}$	2,15	0,125374	3,150411
Correlação Grandeza-Operador	0,000771	18	$4,28 \times 10^{-5}$	1,927778	0,030319	1,778446
Repetibilidade	0,001333	60	$2,22 \times 10^{-5}$			
Variância Total	8,492049	89				

O Quadro 4.26 mostra, para um nível de significância de 0,05, uma correlação significativa entre os fatores Grandeza e Operador, que deve assim ser incluída no estudo de R&R.

Por sua vez, o Quadro 4.27 apresenta os valores das estimativas das variâncias e respetivos desvios padrão, para as fontes de variação consideradas na medição.

Quadro 4.27 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição dimensional em extensómetros de varas

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$ /mm <sup>2</sup>	$\hat{\sigma}$ /mm
R&R	0,000 029	0,005 4
Repetibilidade	0,000 022	0,004 7
Reprodutibilidade	0,000 007	0,002 7
Operador	0,000 000	0,000 4
Interação Grandeza-Operador	0,000 007	0,002 6
Grandeza	0,104 808	0,323 7
Dispersão total	0,104 837	0,323 8

Na Figura 4.16 são apresentadas as distribuições dos resíduos associados à análise de variância efetuada, as quais confirmam a validade do modelo estatístico adotado.

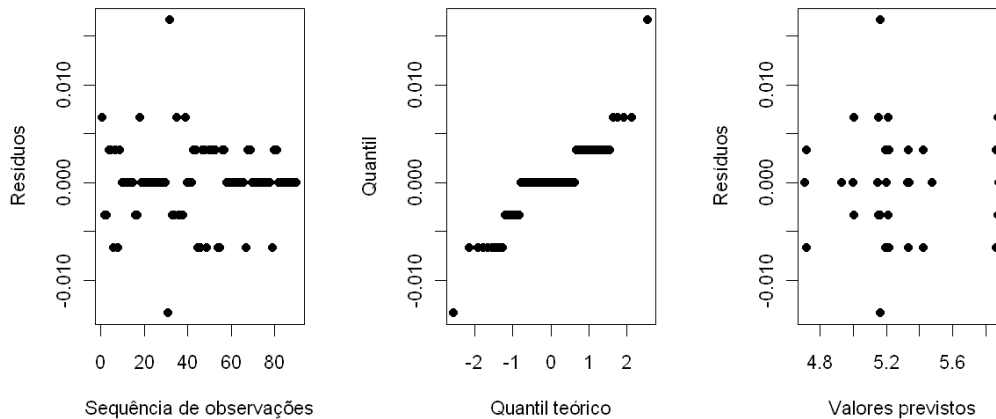


Figura 4.16 – Resíduos associados à análise da variância da medição dimensional em extensómetros de varas

### 4.4.3 Resultados finais

Tendo em conta o tipo de defletómetro utilizado na barragem do Alto Lindoso, o cálculo do deslocamento,  $\delta_n$ , na época  $n$ , é suportado na seguinte expressão:

$$\delta_n = -[(LV_n - LV_i) - (LI_n - LI_i)], \quad (40)$$

em que,

$LI_n, LI_i$  – medição da medida materializada (invar) na época  $n$  e na época inicial,  $i$ ;

$LV_n, LV_i$  – medição dimensional da vara na época  $n$  e na época inicial,  $i$ .

O procedimento de medição dimensional em extensómetros de varas na fundação inclui a realização do ajuste do defletómetro com recurso à medição de uma medida materializada (invar), o que se traduz em  $LI_n = LI_i$ , ou seja,  $LI_n - LI_i = 0$ .

Assumindo, numa primeira abordagem, que a incerteza de medição de  $LI_n$  e  $LI_i$  é desprezável relativamente às restantes incertezas de medição dimensionais, a aplicação da Lei de Propagação de Incertezas à expressão (40) permite quantificar a variância associada à repetibilidade e reprodutibilidade da medição do deslocamento em extensómetros de varas através de,

$$\hat{\sigma}_{R\&R,Deslocamento}^2 = 2\hat{\sigma}_{R\&R,Leitura}^2 \quad (41)$$

Salienta-se que, na expressão anterior, não foi considerada a eventual correlação entre grandezas de entrada.

No Quadro 4.28 são apresentadas as respetivas incertezas de medição para os intervalos de confiança de 68,26 %, 95,44 % e 99,74 %.

**Quadro 4.28 – Incertezas de medição da repetibilidade e reprodutibilidade da medição de deslocamentos em extensómetros de varas**

Intervalo de confiança	$\sigma_{R\&R}$ 68,26%	$2\sigma_{R\&R}$ 95,44%	$3\sigma_{R\&R}$ 99,74%
Deslocamento (mm)	0,008	0,015	0,023

## 4.5 Subpressões em piezómetros manométricos

### 4.5.1 Apetos gerais

No estudo de R&R efetuado, as estimativas da medição da grandeza subpressão foram obtidas manualmente por via direta, mediante observação do indicador de pressão (com resolução igual a 0,005 bar) que integra a cadeia de medição associada ao piezómetro instalado no local da medição.

### 4.5.2 Dados primários

No Quadro 4.29 é apresentada a amostra de valores medidos de subpressão nos piezómetros, pelos diferentes operadores, em locais de interesse na barragem do Alto Lindoso.

**Quadro 4.29 – Amostra de valores medidos de subpressão (em bar)**

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	0,590	1,850	1,860	1,050	1,625	0,150	0,775	0,430	0,950	1,290
	0,590	1,825	1,860	1,110	1,590	0,150	0,775	0,430	0,950	1,290
	0,590	1,825	1,860	1,110	1,590	0,150	0,775	0,430	0,950	1,290
Operador B	0,590	1,840	1,860	1,050	1,620	0,150	0,775	0,430	0,950	1,290
	0,590	1,825	1,860	1,110	1,590	0,150	0,775	0,430	0,950	1,290
	0,590	1,825	1,860	1,110	1,590	0,150	0,775	0,430	0,950	1,290
Operador C	0,580	1,840	1,850	1,050	1,610	0,150	0,775	0,435	0,950	1,290
	0,580	1,840	1,850	1,090	1,600	0,150	0,775	0,435	0,950	1,290
	0,580	1,840	1,860	1,100	1,590	0,150	0,775	0,435	0,950	1,290

A Figura 4.17 apresenta as representações gráficas das diferenças relativas entre medições associadas aos locais da medição (à esquerda), aos operadores (ao centro) e sequência de medições (à direita), obtidas com base nos valores mencionados no Quadro 4.29.

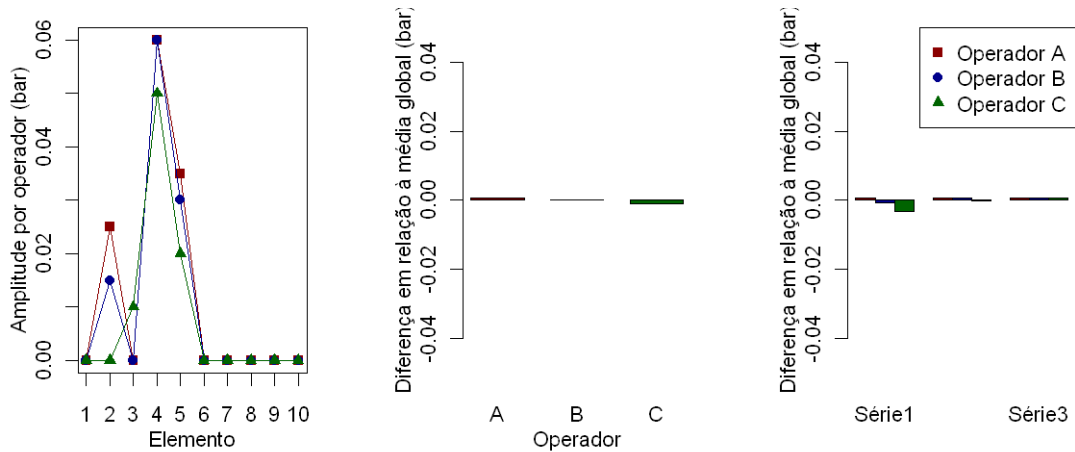


Figura 4.17 – Efeito do local, operador e sequência de medição de subpressões

Os Quadros 4.30 e 4.31 apresentamos resultados da análise de variância obtidos considerando, respetivamente, a presença ou a ausência do efeito da correlação entre os fatores Grandeza e Operador.

Quadro 4.30 – Resultados da análise da variância com efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador (pressões em piezómetros)

Fonte de variação	<i>SQ</i>	Graus de liberdade	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p – value</i>	<i>F<sub>crit</sub></i>
Grandeza	28,09943	9	3,122159	22169,17	$3,6 \times 10^{-102}$	2,040098
Operador	$4,39 \times 10^{-5}$	2	$2,19 \times 10^{-5}$	0,155819	0,85606	3,150411
Interação Grandeza-Operador	0,00066	18	$3,65 \times 10^{-5}$	0,258821	0,998753	1,778446
Repetibilidade	0,00845	60	0,000141			
Varição Total	28,1086	89				

Quadro 4.31 – Resultados da análise da variância sem efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador (pressão em piezómetros)

Fonte de variação	<i>SQ</i>	Graus de liberdade	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p – value</i>
Operador	0,0000	2	0,00002	0,188	0,829
Grandeza	28,0994	9	3,12216	26743,400	$< 2,0 \times 10^{-16}$
Repetibilidade	0,0091	78	0,00012		
Varição Total	28,1085	89			

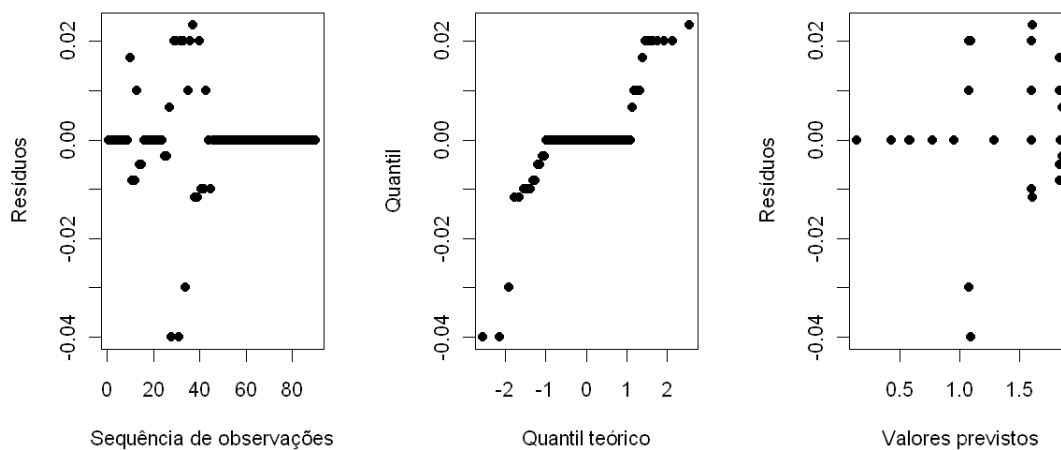
No Quadro 4.30 é possível verificar que, para o efeito de correlação entre os fatores Grandeza e Operador, o valor  $F$  é inferior a  $F_{crit}$  ou, de forma equivalente, que o valor de  $p-value$  é superior ao nível de significância de 0,05, pelo que a hipótese nula não é rejeitada. Consequentemente, o efeito da correlação é considerado não significativo, pelo que o modelo estatístico adotado, dado pela expressão (16), pode ser utilizado. Por sua vez, é possível constatar no Quadro 4.31 que o valor de  $p-value$  relativo ao fator Operador é superior ao nível de significância de 0,05, pelo que não é rejeitada a hipótese nula.

No Quadro 4.32 são apresentados os valores das estimativas obtidas para as fontes de variação consideradas na medição.

**Quadro 4.32 – Estimativas das variâncias e desvios padrão da medição de subpressões**

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$ /bar <sup>2</sup>	$\hat{\sigma}$ /bar
R&R	0,000 106	0,010 3
Repetibilidade	0,000 141	0,011 9
Reprodutibilidade	0,000 000	0,000 0
Operador	0,000 000	0,000 0
Grandeza	0,346 902	0,589 0
Dispersão Total	0,347 008	0,589 1

Na Figura 4.18 são apresentadas as distribuições dos resíduos associados à análise de variância efetuada, as quais confirmam a validade do modelo estatístico adotado.



**Figura 4.18 – Resíduos associados à análise da variância da medição de subpressões**

### 4.5.3 Resultados finais

Tendo em conta que os valores medidos nas cadeias de medição associadas aos piezómetros correspondem à grandeza final de interesse (subpressão), a variância da repetibilidade e reprodutibilidade é igual à variância da leitura, ou seja,

$$\hat{\sigma}_{R\&R,Subpressão}^2 = \hat{\sigma}_{R\&R,Leitura}^2 \quad (42)$$

No Quadro 4.33 são apresentadas as respetivas incertezas de medição para os intervalos de confiança de 68,26 %, 95,44 % e 99,74 %.

**Quadro 4.33 – Incertezas de medição da repetibilidade e reprodutibilidade da medição de subpressões em piezómetros**

Intervalo de confiança	$\sigma_{R\&R}$	$2\sigma_{R\&R}$	$3\sigma_{R\&R}$
Subpressão (bar)	0,010	0,021	0,031



## 5 | Considerações finais

No processo de controlo de segurança de barragens é indispensável que seja mantida a confiança nos sistemas de medição, através de avaliações regulares das contribuições das incertezas associadas aos equipamentos, métodos e operadores envolvidos nas medições efetuadas. Este tipo de avaliações é particularmente relevante no caso dos sistemas de medição manual, nos quais a intervenção dos operadores é significativa para a qualidade das medições efetuadas, afetando a sua repetibilidade e reprodutibilidade.

O estudo realizado permitiu conhecer, segundo uma perspetiva probabilística da medição, as contribuições da repetibilidade e da reprodutibilidade nas medições realizadas no sistema de observação da barragem do Alto Lindoso, através da análise da variância (ANOVA). Tendo em conta as condições de repetibilidade e reprodutibilidade definidas neste estudo, as dispersões dos valores das medições obtidas podem ser consideradas, numa primeira abordagem, como representativas dos efeitos aleatórios que afetam os sistemas de medição na monitorização de barragens. Em acréscimo, esta informação constitui igualmente um conjunto de dados de referência de suporte à qualificação dos operadores envolvidos nas campanhas de medição e à comparação entre medições redundantes obtidas por vias instrumentais distintas (manual e automática).

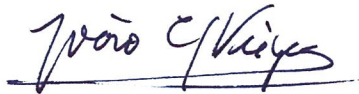
Salienta-se que a técnica estatística aplicada (ANOVA) não permite contabilizar os efeitos sistemáticos que possam existir e, conseqüentemente, afetar a exatidão das medições efetuadas, pelo que é recomendável garantir a sua rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI) através de calibrações periódicas dos instrumentos e equipamentos de medição em entidades com competência técnica reconhecida para este efeito.

O conhecimento adquirido sobre a repetibilidade e a reprodutibilidade nas medições efetuadas no sistema de observação da barragem do Alto Lindoso constitui um relevante contributo para a melhoria da análise do controlo de segurança e para o processo de tomada de decisão daí decorrente, sobretudo em situações de proximidade das estimativas das grandezas aos limites de tolerância definidos no contexto da segurança estrutural.

Lisboa, LNEC, setembro de 2023

VISTOS

O Diretor do Centro de Instrumentação Científica



João Carlos Viegas

O Diretor do Departamento de Barragens de  
Betão



António Lopes Batista

AUTORIA



Juan Tomé Caires da Mata

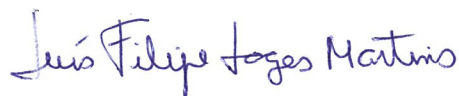
Investigador Auxiliar



António Tavares de Castro

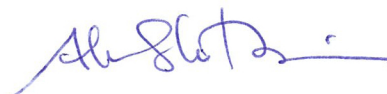
Investigador Principal

Chefe do Núcleo de Observação



Luís Filipe Lages Martins

Investigador Auxiliar



Álvaro Silva Ribeiro

Investigador Principal

Chefe do Núcleo de Qualidade Metrológica

## Referências bibliográficas

- APA, 2018 – **Documentos técnicos de apoio ao Regulamento de Segurança de Barragens (RSB)**. 1.<sup>a</sup> edição. Agência Portuguesa do Ambiente.
- ASCE, 2000 – **Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance**. ISBN: 0-7844-0531-X. American Society of Civil Engineers.
- GUM, 1995 – **Guide to the expression of Uncertainty in Measurement**. ISBN: 92-67-10188-9. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML.
- IPQ, 2012 – **Vocabulário Internacional de Metrologia. Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. 1.<sup>a</sup> edição Luso-Brasileira. ISBN: 978-972-763-00-6. Instituto Português da Qualidade.
- KAZEROUNI, A. M., 2009 – **Design and analysis of Gauge R&R studies: Making decisions based on ANOVA method**. Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology. Volume 52. ISSN: 2070-3724.
- LNEC, 2009 – **Barragem do Alto Lindoso. Relatório de análise de comportamento**. LNEC - Proc. 0403/001/8443, 0402/541/501. Relatório 266/2009 – DBB/NMMF.
- LNEC, 2021 – **Barragem do Alto Lindoso. Inspeção à estrutura e ao sistema de observação efetuada em novembro de 2020**. LNEC - Proc. 0403/1201/08443. Nota Técnica 76/2021 – DBB/NO.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C., 1994 – **Applied Statistics and Probability for Engineers**. ISBN: 0-471-54041-2. John Wiley & Sons, Inc.
- MONTGOMERY, D. C., 1997 – **Introduction to statistical quality control**. 3.<sup>a</sup> edição. ISBN: 0-471-30353-4. John Wiley & Sons, Inc.
- PAN, J., 2006 – **Evaluating the gauge repeatability and reproducibility for different industries**. Journal of Quality & Quantity. Volume 40. ISSN: 1573-7845. Springer Netherlands.
- PEREIRA, Z. L.; REQUEIJO, J. G., 2008 – **Planeamento e controlo estatístico de processos**. ISBN: 978-989-8022-65-3. FCT - Fundação da Faculdade de Ciências de Lisboa e Tecnologia da Universidade de Lisboa e Prefácio - Edição de livros e revistas, Lda.
- PILLET, M.; DURET, D., 2009 – **Qualidade na produção - da ISO 9000 ao seis sigma**. ISBN: 978-972-757-489-6. LIDL - Edições técnicas, Lda.
- R Development Core Team., 2012 – **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria, ISBN: 3-900051-07-0.
- RSB, 2018 – **Regulamento de Segurança de Barragens**. Decreto-Lei n.º 21/2018 de 28 de março de 2018, Diário da República - I Série.





[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL  
tel. (+351) 21 844 30 00  
lnec@lnec.pt [www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)