



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

André Gonçalves de Azevedo

**ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE
LEITURAS DISCREPANTES DE PIEZOMETRIA: ESTUDO DE
CASO EM BARRAGEM DE TERRA**

Ouro Preto

2019

Análise estatística para identificação de leituras discrepantes de piezometria: Estudo de caso em barragem de terra

André Gonçalves de Azevedo

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 01 de julho de 2019 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. D.Sc. Romero César Gomes - UFOP

Co-orientador: Eng. Civil Elton Franklin Almeida

Ouro Preto

2019

A994a Azevedo, André Gonçalves de .
Análise estatística para identificação de leituras discrepantes de piezometria
[manuscrito]: estudo de caso em barragem de terra / André Gonçalves de
Azevedo. - 2019.

41f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Romero César Gomes.

Coorientador: Engenheiro Ci Elton Frnaklin Almeida.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Barragens de terra - Instrumentos piezométricos. 2. Barragens de Terra -
Método estatístico. 3. Barragens de terra - Valores discrepantes. I. Gomes,
Romero César. II. Almeida, Elton Frnaklin. III. Universidade Federal de Ouro
Preto. IV. Título.

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br CDU: 624

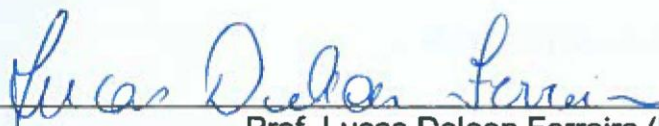
Análise estatística para identificação de leituras discrepantes de piezometria: Estudo de caso em barragem de terra

André Gonçalves de Azevedo

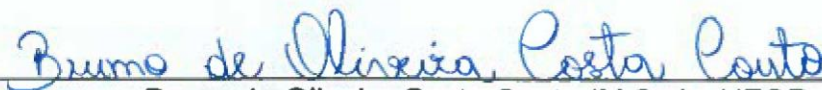
Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 01 de julho de 2019 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:



Prof. Romero César Gomes (D. Sc) – Orientador – UFOP



Prof. Lucas Deleon Ferreira (D. Sc.) - UFOP



Bruno de Oliveira Costa Couto (M.Sc.) - UFOP

À minha mãe e irmãos por todo amparo e confiança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e forças para lutar a caminhada da vida.

Agradeço à toda minha família: minha mãe, Maria Lúcia, por todo carinho, cuidado, amor e pelos ensinamentos valiosos; meu pai, Walmy, pelo companheirismo; meus irmãos, Anderson, Danielly e Tiago, por toda cumplicidade e apoio; à minha cunhada, Suzanne, e ao meu cunhado, Júnior, por acreditarem nos meus sonhos; aos meus sobrinhos, Maria Eduarda e João Guilherme, por me fazerem mais feliz a cada dia; às famílias Azevedo e Gonçalves por todo zelo e apreço.

Agradeço à família Castelo dos Nobres por ter sido meu lar nesses anos de escola e a Tina por ter sido uma segunda mãe nesses últimos anos longe de casa.

Ao professor Eleonardo Lucas Pereira por todo suporte e confiança.

Agradeço ao meu orientador Romero César Gomes e ao meu co-orientador Elton Almeida por se mostrarem solícitos à orientação desse trabalho.

Agradeço a Ferrous Resources do Brasil SA pela grande oportunidade de desenvolvimento pessoal e profissional.

À Universidade Federal de Ouro Preto, seu corpo de docentes e a Fundação Gorceix por todo apoio institucional.

Agradeço às entidades acadêmicas as quais tive a oportunidade de fazer parte: ao Programa Jovens Talentos para Ciência da CAPES, Laboratório de Ferrovias e Asfalto (LFA), Civil Jr., Núcleo Aplicado de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), Escritório Piloto dos Estudantes da UFOP - Curso Prático de Obras (CPO) e a Liga de Acadêmica de Geotecnia da Escola de Minas (LAGEM) por todo conhecimento e pelas amizades construídas.

Aos amigos de Ouro Preto que, de alguma forma, fizeram parte dessa etapa que se finda.

RESUMO

Quando se fala em barragens, sabe-se que apenas a avaliação das leituras fornecidas pelos instrumentos e os resultados de modelos de comportamento geotécnicos não são suficientes para garantir segurança à estrutura. É imprescindível que se tenha conhecimento das características construtivas, desde a fundação ao maciço; que haja troca de experiência em obras equivalentes, o que inclui estudos, identificação de eventos e tratativas; que se tenha a boa prática de inspeções visuais; que se revise os planos de instrumentação; entre outros elementos que despertem a percepção dos responsáveis técnicos para uma boa supervisão das condições de segurança da estrutura. No que tange a análise e aceitação dos valores de leituras de instrumentos de monitoramento de barragem, usualmente, se estabelecem limites de controle a fim de se identificar eventos anômalos e suas causas. Esses limites de controle podem ser definidos através de modelos estatísticos, determinísticos ou através de ambos, de forma mesclada. Cabe destacar que, a solução estatística traz maior confiança aos casos onde se têm um número significativo de incertezas atreladas ao projeto, tais como parâmetros dos materiais; geometria e condições de contorno da estrutura. O entendimento e a avaliação do comportamento dos instrumentos utilizados na auscultação de barragem serviram de inspiração para desenvolvimento desse trabalho. O qual visou verificar, através do software estatístico R, a representatividade de duas metodologias estatísticas na identificação de valores discrepantes (*outliers*) de piezometria em um estudo de caso de barragem de terra e, aplicar o método mais adequado. Uma vez realizada a análise estatística, concluiu-se que o método estatístico *boxplot* foi mais adequado para o estudo dos *outliers* dos instrumentos piezométricos do que o controle estatístico de processos baseados em uma distribuição normal.

Palavras-chaves: Instrumentos piezométricos, Método estatístico, Valores discrepantes.

ABSTRACT

When talking about dams, it is known that only the evaluation of the readings provided by the instruments and the results of geotechnical behavior models are not enough to assure structure safety. It is needful that one should be aware of the constructive characteristics, from the foundation to the embankment; that has a sharing knowledge in equivalent jobs, which includes studies, identification of events and repairs; good visual inspection practice; reviewing the instrumentation plans; among other elements that arouse the perception of the technical responsible to a good supervision of the safety conditions of the structure. Regarding the analysis and acceptance of the readings values of dam monitoring instruments, control limits are usually established in order to identify anomalous events and its causes. These control limits can be defined through statistical models, deterministic or through both, in a mixed way. It should be noted that the statistical solution brings greater confidence to cases which there are a significant number of uncertainties linked to the project, for example on material parameters, geometry and boundary conditions of the structure. The understanding and evaluation of the behavior of the instruments used in the dam auscultation have served as inspiration for the development of this job. This one aimed to verify, through the statistical software R, the representativeness of two statistical methodologies in the identification of piezometric outliers in a case study of an earth fill dam and to apply the most appropriate method. Once the statistical analysis has accomplished, it was concluded that the *boxplot* statistical method was more adequate for the study of outliers of piezometric instruments than statistical process control based on a normal distribution.

Keywords: Piezometric instruments, Statistical method, Outliers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nível freático e poropressões quando há fluxo d'água subterrânea (DUNNICLIFF, 1993).....	5
Figura 2- Medidor de nível d'água (REY, 2016).....	6
Figura 3- Pio elétrico (FUSARO, 2007).....	7
Figura 4 - (A) Esquema de um piezômetro standpipe instalado em furo de sondagem; (B) Piezômetro standpipe com filtro poroso, conectado à tubulação em PVC (SILVEIRA, 2006)	8
Figura 5 - Esquema de funcionamento dos piezômetros hidráulicos de dupla tubulação (SILVEIRA, 2006)	9
Figura 6 – Esquema de piezômetro pneumático (DUNNICLIFF, 1993).....	10
Figura 7 - Esquema de funcionamento de um piezômetro Strain Gauge (SILVEIRA, 2006).....	11
Figura 8 – Esquema de funcionamento de um transdutor de corda vibrante (DUNNICLIFF, 1993).....	12
Figura 9 – Acurácia e precisão dos instrumentos	13
Figura 10 – Função de distribuição de probabilidade de uma variável aleatória normal com média μ e desvio padrão σ (MORETTIN e BUSSAB, 2010).....	16
Figura 11 – Probabilidade como área sob a curva entre dois pontos (CORREA, 2003)	16
Figura 12 – Transformação de uma $N(\mu, \sigma^2)$ para $N(0,1)$	17
Figura 13 – Exemplo de nível de confiança em uma distribuição normal	20
Figura 14 – Elementos de um gráfico boxplot.....	22
Figura 15 – Vista superior Barragem 7	24
Figura 16 – Seção típica do dique de partida da Barragem 7	25
Figura 17 – Desenho esquemático dos instrumentos piezométricos estudados no talude de jusante da barragem.....	26

Figura 18 – Resultado de outliers das leituras do INA03A obtidos através de CEP	29
Figura 19 – Outliers das leituras do INA02A obtidos através do método boxplot	30
Figura 20 - Outliers das leituras do INA03 obtidos através do método boxplot ..	31
Figura 21 - Outliers das leituras do PZ02 obtidos através do método boxplot	32
Figura 22 - Outliers das leituras do PZ03 obtidos através do método boxplot ...	33
Figura 23 - Outliers das leituras do INA02 obtidos através do método boxplot ..	42
Figura 24 - Outliers das leituras do INA03A obtidos através do método boxplot	43
Figura 25 - Outliers das leituras do INA06 obtidos através do método boxplot ..	44
Figura 26 - Outliers das leituras do INA07 obtidos através do método boxplot ..	45
Figura 27 - Outliers das leituras do INA07A obtidos através do método boxplot	46
Figura 28 - Outliers das leituras do INA08 obtidos através do método boxplot ..	47
Figura 29 – Gráfico de leituras do PZ03 e pluviometria local nas fases 0 à 2	48
Figura 30 - Outliers das leituras do PZ04 obtidos através do método boxplot	48
Figura 31 - Outliers das leituras do PZ07 obtidos através do método boxplot	49
Figura 32 - Outliers das leituras do PZ08 obtidos através do método boxplot	50
Figura 33 - Outliers das leituras do PZ06 obtidos através do método boxplot	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição temporal de disposição de rejeito na barragem.....	27
Tabela 2 – Resultados do Shapiro Wilk teste para as leituras piezométricas.....	28
Tabela 3 - Resultados do Shapiro Wilk teste para variação das leituras piezométricas	34
Tabela 4 – Carta de sensibilidade às variações das leituras piezométricas obtidas através do método estatístico boxplot (valores moderados)	35
Tabela 5 - Carta de sensibilidade às variações das leituras piezométricas obtidas através do método estatístico boxplot (valores extremos)	36

LISTA DE SIGLAS

CEP – Controle estatístico de processos

I.I.Q. – Intervalo interquartil

INA – Indicador de nível d'água

LI – Limite inferior

LS – Limite superior

PZ – Piezômetro

SUMÁRIO

Agradecimentos	II
Resumo	I
Abstract.....	II
Lista de Figuras	III
Lista de Tabelas.....	V
Lista de Siglas.....	VI
Sumário	VII
1 Introdução	1
2 Objetivo	3
3 Revisão Bibliográfica.....	4
3.1 Instrumentação piezométrica.....	4
3.2 Principais instrumentos piezométricos.....	6
3.2.1 Medidor de nível d'água	6
3.2.2 Piezômetro Casagrande modificado de tubo aberto (Standpipe).....	7
3.2.3 Piezômetro hidráulicos de dupla tubulação.....	8
3.2.4 Piezômetros pneumáticos	9
3.2.5 Piezômetros de resistência elétrica (Strain Gauge)	10
3.2.6 Piezômetros de corda vibrante.....	12
3.2.7 Piezômetros de fibra óptica.....	13
3.3 Principais erros e características vinculadas às leituras dos instrumentos piezométricos.....	13

3.3.1	Características dos instrumentos de medição.....	13
3.3.2	Principais erros de leitura.....	14
3.4	Princípios estatísticos.....	15
3.4.1	Distribuição normal de probabilidade.....	15
3.4.2	Distribuição normal padrão.....	17
3.4.3	Teste de Normalidade.....	18
3.4.4	Controle estatístico de processos baseados em distribuição normal (CEP)	19
3.4.5	Boxplot.....	20
4	Metodologia.....	23
5	Estudo de Caso.....	24
5.1	Introdução.....	24
5.2	Resultados e Discussões.....	27
5.2.1	Análise estatística dos valores de leitura.....	27
5.2.2	Análise estatística das variações das leituras piezométricas.....	34
6	Conclusões.....	38
7	Referências.....	40
8	Apêndice.....	42

1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade se constrói barragens com objetivo de dar amparo ao desenvolvimento humano e trazer mais qualidade de vida às pessoas. A necessidade de represar água para consumo do homem e animal, para uso em atividades agrícolas, para regularização de vazões em cursos d'água, controle de cheias, geração de energia elétrica, contenção de água e sedimentos provenientes de chuva, armazenamento de rejeitos industriais, dentre outros, fizeram que o homem aperfeiçoasse os recursos técnicos aplicados às construções de barragens.

A barragem de terra mais antiga de que se tem registro é a barragem de Sadd-El-Kafara, construída no Egito em 4800 a.C., constando de uma estrutura com 12 m de altura (VIOTTI, 1980). No que diz respeito ao Brasil, segundo Kupperman (2003), boa parte das barragens teve seus projetos desenvolvidos nas décadas de 1960 a 1980. Nessa época os projetos, em sua maioria, seguiam bases empíricas.

Sabe-se que grandes catástrofes estão comumente ligadas ao colapso dessas estruturas. Em sua maioria, esse tem impacto socioeconômico e ambiental significativo, podendo causar alagamento de amplas áreas a jusante e danos imensuráveis. Nesse sentido, apenas a elaboração e execução do projeto construtivo não são suficientes. Torna-se indispensável a avaliação continuada do comportamento de tais estruturas. Essa avaliação continuada é usualmente denominada auscultação de barragens.

A auscultação de barragens, de acordo com Asce (2000), tem como ferramentas principais as inspeções visuais e a instrumentação. Essas permitem aos responsáveis técnicos maior clareza na identificação dos comportamentos geotécnicos e irregularidades da estrutura. Além disso, quando necessário, possibilitam tomadas de decisões mais assertivas na prevenção e correção de eventos, visando sempre a manutenção e a segurança da barragem.

O entendimento e a avaliação do comportamento dos instrumentos utilizados na auscultação de barragem serviram de inspiração para desenvolvimento desse trabalho. O qual visa verificar, através do software estatístico R, a representatividade de duas metodologias estatísticas na identificação de valores discrepantes de

piezometria em um estudo de caso em barragem de terra e, aplicar o método mais adequado.

2 OBJETIVO

Esse trabalho tem o objetivo de apresentar duas metodologias estatísticas para identificação de leituras piezométricas discrepantes e verificar, através do software estatístico R, qual delas é a mais adequada para o estudo de caso apresentado: (1) Controle estatístico de processos baseado em distribuição normal. (2) Diagrama de quartis e extremos (*Boxplot*). Uma vez verificado qual dos métodos estatísticos apresenta maior representatividade, esse será aplicado nos instrumentos da barragem de terra estudada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise e aceitação dos valores de piezometria, usualmente, passam pela determinação de limites de controle a fim de se obter respostas mais práticas e, identificar possíveis eventos anômalos. Esses limites de controle podem ser definidos através de modelos estatísticos, determinísticos ou através de ambos, de forma mesclada.

Os modelos determinísticos, habitualmente, se baseiam em análises estruturais definidas a partir das propriedades dos materiais, das condições de contorno, geometria da estrutura, tipos de carregamentos, piezometria, entre outros. Menga et al (1999) comenta que esses modelos determinísticos de análise dos dados da instrumentação são calibrados através da utilização das medidas em campo das grandezas sob análise.

De acordo com Fusaro (2007) os modelos estatísticos de análise de estabilidade de barragens, ao contrário dos determinísticos, utilizam ferramentas estatísticas e métodos probabilísticos para incorporar as variabilidades dos parâmetros geotécnicos nos modelos de análises de comportamento. Esse tipo de solução traz maior confiança aos casos onde se têm um número significativo de incertezas atreladas ao projeto, tais como parâmetros dos materiais; geometria e condições de contorno da estrutura.

Nesse contexto, a aplicação da solução estatística na interpretação das leituras piezométricas se configura como ferramenta de controle e confiabilidade dos valores medidos.

3.1 Instrumentação piezométrica

Segundo Cerqueira (2017), a instrumentação piezométrica, ou seja, indicadores de nível d'água e piezômetros de todo tipo, são empregados no monitoramento piezométrico das variações de poropressão e nível do lençol freático.

Silveira (2006) define os piezômetros como instrumentos de medição da pressão da água intersticial em maciços rochosos e de terra e, descreve o nível freático como

a superfície superior de um corpo d'água subterrâneo na qual a pressão corresponde à atmosférica.

Para o bom entendimento desse tipo de instrumentação é substancial que se tenha bem claro a diferença entre poropressão e nível freático. A Figura 1 traz um exemplo desses conceitos.

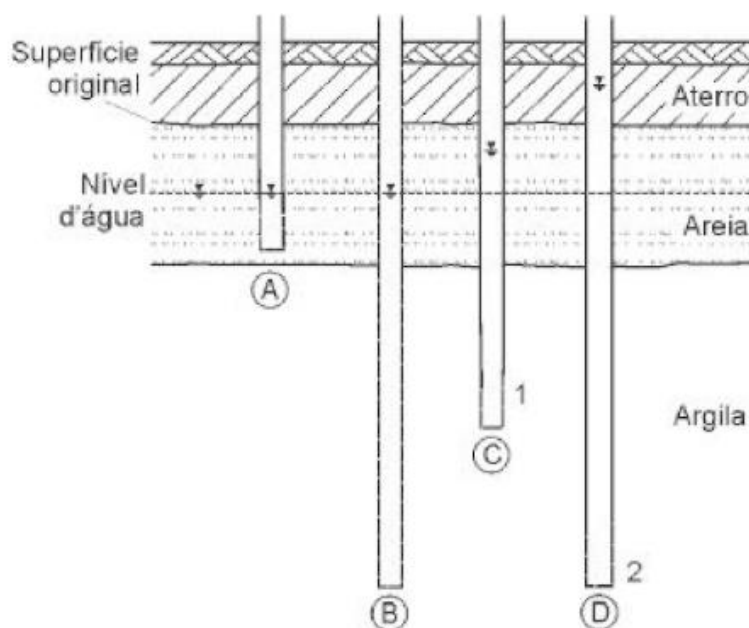


Figura 1 – Nível freático e poropressões quando há fluxo d'água subterrânea (DUNNICLIFF, 1993)

Os quatro tubos perfurados na Figura 1 são instalados de tal modo que o solo se encontra em contato direto com o trecho perfurado dos tubos. O tubo (B) é perfurado ao longo de toda sua extensão, enquanto os outros tubos são perfurados apenas no trecho inferior. Por causa da alta permeabilidade da areia, o excesso de poropressão nesse material se dissipa quase que imediatamente e depois deixa de existir. O tubo (A) indica o nível freático. Os tubos (C) e (D) indicam as poropressões no nível (1), em relação ao nível (2), devido à maior proximidade da camada superior de areia, que auxilia na dissipação das poropressões. O tubo (B) é normalmente designado de poço de observação ou medidor de nível d'água, enquanto os tubos (C) e (D) indicam as poropressões, e sua dissipação dentro da camada de areia ou argila, sendo designados de piezômetros (SILVEIRA, 2006).

3.2 Principais instrumentos piezométricos

3.2.1 Medidor de nível d'água

Também conhecido por indicador de nível d'água, constitui-se de tubo de PVC furado, instalado através de furo de sondagem, recoberto por manta geotêxtil ou tela, definida de acordo com a granulometria do material adjacente com o intuito de evitar o carreamento de partículas de solo e/ou a colmatagem do instrumento. Acima do trecho com furos é feito um selo, geralmente de solo-cimento, a fim de que a água superficial não interfira nos resultados obtidos na leitura do instrumento.

Dentre as vantagens desse instrumento pode-se citar a confiabilidade e a durabilidade (vida útil da ordem de 50 anos). Como desvantagens pode-se destacar a susceptibilidade de perda do instrumento devido obstrução do tubo e devido a interferências na praça de compactação durante fase de construção. A Figura 2 mostra um medidor um de nível d'água.



Figura 2- Medidor de nível d'água (REY, 2016)

A leitura do medidor de nível d'água, quando não automatizado, é feita através de um pio elétrico. Esse sensor de nível d'água consiste em uma trena de ponteira elétrica com uma bateria apropriada. Quando a ponteira entra em contato com a água o pio elétrico emite um ruído e/ou acende uma lâmpada, nesse momento se faz a

leitura entre a boca do tubo e o nível de água. Por subtração encontra-se a altura da coluna de água do instrumento. Somando-se o resultado obtido à cota de instalação do instrumento piezométrico é obtido a cota piezométrica em relação ao nível do mar. A Figura 3 mostra um modelo de pio elétrico amplamente utilizado no Brasil.



Figura 3- Pio elétrico (FUSARO, 2007)

3.2.2 Piezômetro Casagrande modificado de tubo aberto (Standpipe)

A tubulação dos piezômetros *standpipe*, instalada através de furo de sondagem, geralmente é de PVC rígido, podendo ser empregada tubulação de aço galvanizado em casos que exigem maior resistência da tubulação. Tem na sua extremidade inferior um elemento poroso - o bulbo. A água entra pelo bulbo atingindo uma altura de coluna d'água equivalente à pressão hidrostática atuante em sua cota de instalação. O elemento poroso é selado com solo-cimento e/ou bentonita de modo a delimitar a região drenante e garantir que a pressão hidrostática lida seja referente apenas ao seu ponto de instalação. A leitura desse instrumento, quando não automatizado, também pode ser realizada através de um pio elétrico.

O *standpipe* apresenta vantagens e desvantagens similares ao medidor de nível d'água, apresentadas no item 3.2.1. Cabe salientar a facilidade de verificar seu desempenho através de ensaios de recuperação do nível d'água e que o mesmo apresenta tempo de resposta (*time lag*) longo em solos com baixa permeabilidade.

A Figura 4 (A) apresenta o modelo esquemático de um piezômetro *standpipe* e a Figura 4(B) traz um piezômetro *standpipe* com filtro poroso, conectado à tubulação em PVC.

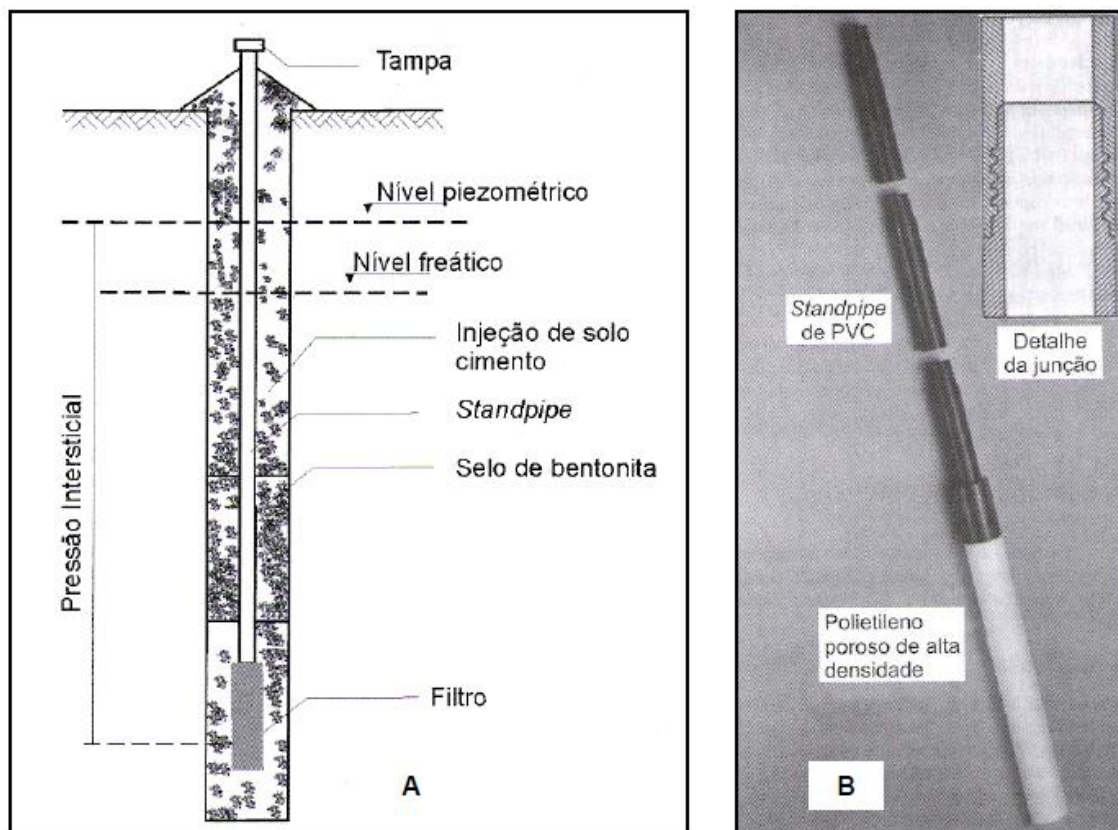


Figura 4 - (A) Esquema de um piezômetro standpipe instalado em furo de sondagem; (B) Piezômetro standpipe com filtro poroso, conectado à tubulação em PVC (SILVEIRA, 2006)

Lindquist (1983) destaca que, uma vez instalados corretamente, os piezômetros *standpipe* estão entre os instrumentos que apresentam os resultados mais confiáveis.

3.2.3 Piezômetro hidráulicos de dupla tubulação

Piezômetro hidráulico de dupla tubulação foi desenvolvido para ser instalado na fundação ou aterro durante o período de construção. Consiste de um elemento poroso ligado à cabine de leitura através de duas tubulações. Na extremidade dessa dupla

tubulação se encontra um manômetro de Bourdon. A leitura piezométrica é obtida através da soma da pressão média das duas tubulações com a cota de instalação do manômetro. As leituras manométricas nos dois ramos devem ser praticamente idênticas. Caso contrário é válido verificar se há ar no equipamento ou outro fator interferindo nos resultados lidos.

Esses instrumentos têm vida útil da ordem de 20 anos e, uma vez estragados, dificilmente são recuperados. A Figura 5 apresenta o esquema de um piezômetro hidráulico de dupla tubulação, também conhecido como tipo inglês.

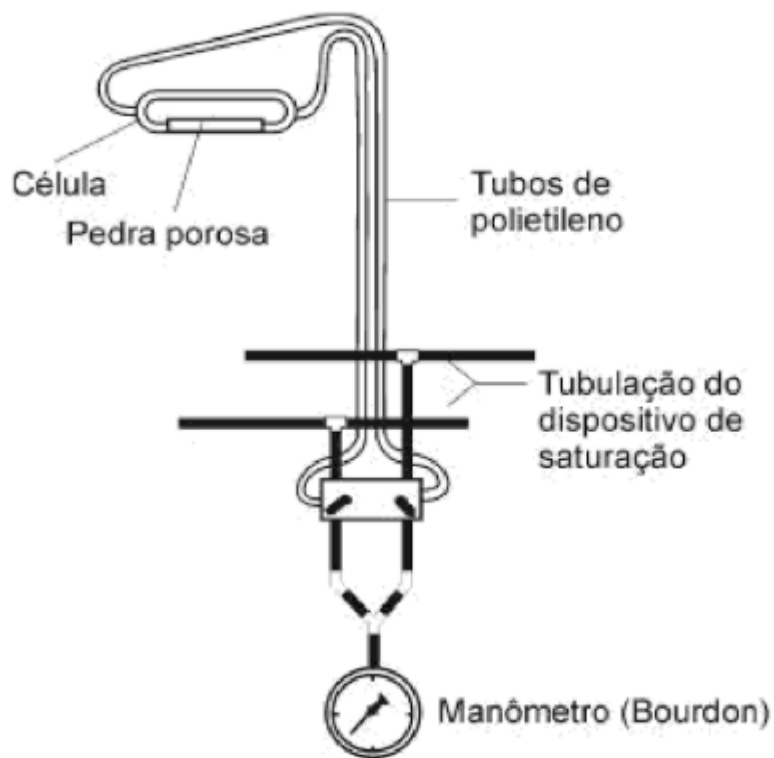


Figura 5 - Esquema de funcionamento dos piezômetros hidráulicos de dupla tubulação (SILVEIRA, 2006)

3.2.4 Piezômetros pneumáticos

O arranjo se baseia no equilíbrio de pressões de água e gás atuantes em um diafragma flexível. A pressão da água é a que se almeja obter e a pressão do gás é fornecida através de uma tubulação de alimentação e lida por um manômetro ligado a uma central de controle de fluxo. Aplica-se uma pressão crescente de gás através

da tubulação de alimentação e se mede a intensidade da pressão na tubulação de retorno. Quando a pressão na tubulação de retorno atinge zero consegue se definir a pressão exercida pela água que passa através de um elemento poroso e atua sobre o diafragma flexível por meio de transdutor acoplado ao diafragma flexível. O esquema de um piezômetro pneumático é mostrado na Figura 6.

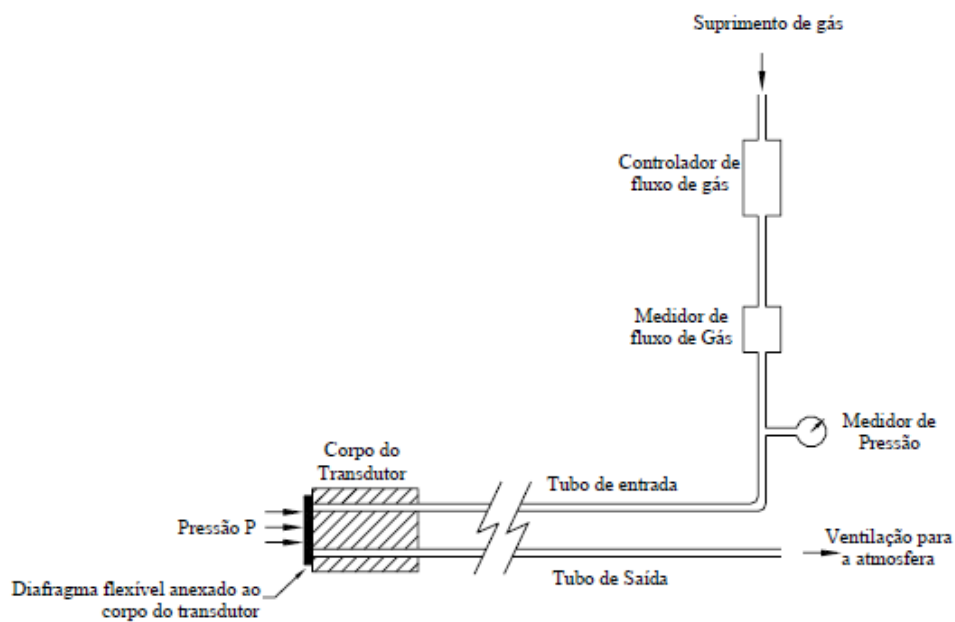


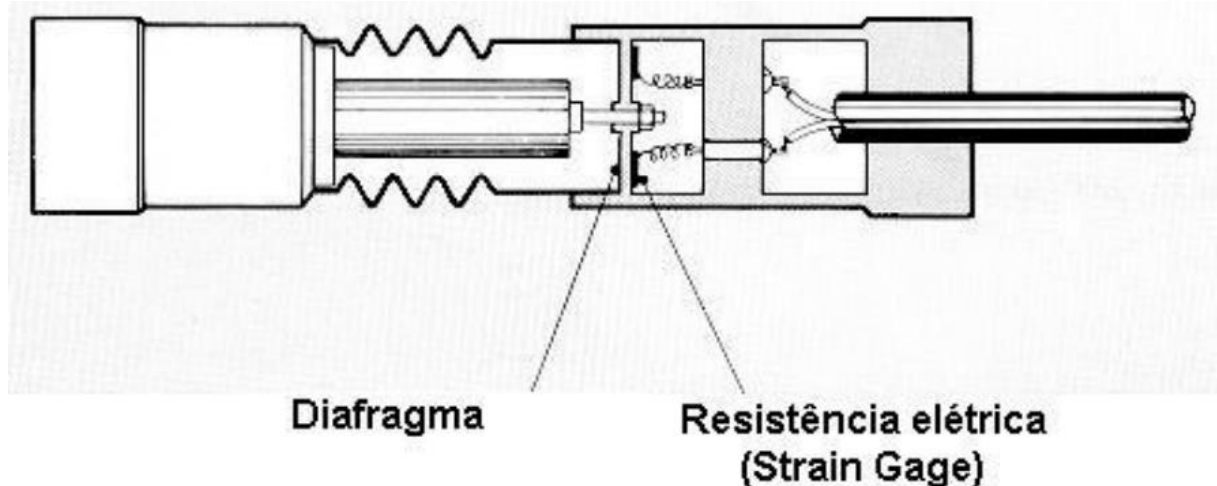
Figura 6 – Esquema de piezômetro pneumático (DUNNICLIFF, 1993)

Esses instrumentos têm vida útil da ordem de 20 a 25 anos. Além disso, de acordo com Lindquist (1983) os piezômetros pneumáticos tem baixa confiabilidade para a medição de pressões neutras negativas.

3.2.5 Piezômetros de resistência elétrica (Strain Gauge)

Esses instrumentos têm tempo de resposta muito baixo em relação à pressão atuante, permitindo um registro contínuo de dados. Segundo Cruz (1996) os piezômetros elétricos, de modo geral, apresentam os mais baixos tempos básicos de resposta, devido ao pequeno volume de água que o maciço precisa fornecer para o diafragma do transdutor deslocar.

O arranjo desse dispositivo consiste, de modo simplificado, em um recipiente hermético no qual em seu interior se têm resistências elétricas, do tipo Strain Gauge, colada à uma membrana metálica (diafragma). A deflexão de membrana metálica é sentida por extensômetros elétricos (transdutor capaz de medir deformações mecânicas de um corpo) colados à mesma. Quando esses extensômetros deformam há alteração das suas resistências nominais e essa variação da resistência é lida e processada para se obter a poropressão da água. O instrumento é dotado de outro extensômetro que permite o cálculo das temperaturas, através de uma ligação apropriada à uma ponte de Wheastone. A Figura 7 mostra o desenho esquemático de um piezômetro de resistência elétrica do tipo Strain Gauge.



**Figura 7 - Esquema de funcionamento de um piezômetro Strain Gauge
(SILVEIRA, 2006)**

De acordo com Silveira (2006), tratam-se de instrumentos com um bom desempenho inicial, mas que a longo prazo, em decorrência das dificuldades de proteção da resistência elétrica contra a umidade e dos problemas decorrentes da fluência da cola de fixação das resistências elétricas à membrana, apresentam vida útil limitada.

3.2.6 Piezômetros de corda vibrante

Nesse instrumento a pressão intersticial da água é transmitida por meio de um elemento poroso para um diafragma flexível interno. A deflexão desse é medida por um transdutor de corda vibrante posicionado perpendicularmente ao diafragma.

Os piezômetros de corda vibrante apresentam alta sensibilidade, podem ser lidos à distância, além de possibilitarem leitura remota dos piezômetros *standpipe*, sendo facilmente retirados para leituras com pio elétrico quando houver dúvidas acerca do desempenho dos mesmos.

Esses têm uma vida útil da ordem de 30 anos. Todavia, alguns cuidados devem ser tomados para maior confiabilidade dos resultados, dentre eles: Blindagem dos cabos elétricos; aterramento dos cabos junto as centrais de leitura; instalação de demais dispositivos de proteção contra descargas atmosféricas, campos eletromagnéticos, dentre outros. Cabe destacar que, os cuidados supracitados encarecem de modo expressivo esse sistema de auscultação de barragem. A Figura 8 apresenta o esquema de funcionamento de um transdutor de corda vibrante.

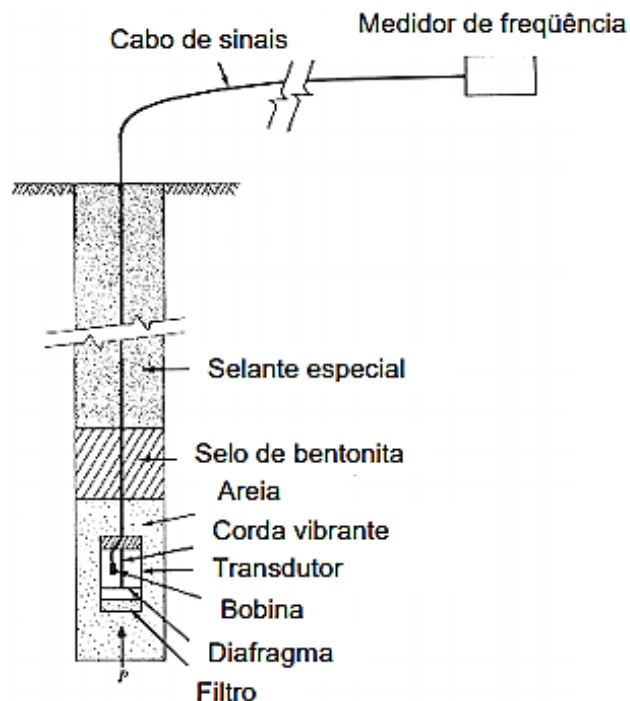


Figura 8 – Esquema de funcionamento de um transdutor de corda vibrante (DUNNICLIFF, 1993)

3.2.7 Piezômetros de fibra óptica

Os piezômetros de fibras ópticas são constituídos de sensores de fibras ópticas. Silveira (2006) afirma que esses instrumentos têm como vantagens o pequeno tamanho, o rápido tempo de resposta, imunidade a descargas atmosféricas, imunidade a ondas de radiofrequência ou interferências eletromagnéticas e são praticamente insensíveis às variações da temperatura ambiente.

Contudo, por ser uma tecnologia relativamente recente no universo de auscultação de barragens não se tem comprovado sua durabilidade a longo prazo sob condições reais de operação.

3.3 Principais erros e características vinculadas às leituras dos instrumentos piezométricos

3.3.1 Características dos instrumentos de medição

Acurácia – informa o quão próximo são os resultados de uma medição e seus valores reais, essa considera a influência de todas as parcelas de erros das mais diversas fontes. Quanto maior o erro, menor a acurácia.

Precisão – exprime o quão próximo um grupo de medidas é da sua média aritmética. No monitoramento de barragens, a precisão é, em geral, mais importante que a exatidão, pois as variações de valor muitas vezes são de maior interesse que o valor absoluto em si (ASCE, 2000).

A Figura 9 faz alusão aos conceitos de acurácia e precisão.



Figura 9 – Acurácia e precisão dos instrumentos

Repetitividade – diz respeito às medições consecutivas que apresentam valores próximos aos apresentados anteriormente, sob mesmas condições de medição. Uma boa repetitividade pode ser traduzida como uma boa confiabilidade da medição.

Linearidade – é denominado linear o instrumento que apresenta medições diretamente proporcionais aos estímulos e grandezas aos quais esse é submetido.

Histerese – é a aptidão do instrumento apresentar valores repetidos em sentidos diferentes de variação do valor verdadeiro. A identificação da histerese é muito importante por exemplo para se identificar o comportamento do instrumento em condições de carregamento e descarregamento.

3.3.2 Principais erros de leitura

Erros grosseiros – erros relacionados à falta de experiência do operador ou fadiga, pela utilização de mais de um operador, conexões e instalações inadequadas, dentre outros. Esses podem ser evitados com leituras prévias, treinamento dos operadores, verificação e manutenção regular dos instrumentos.

Erros ambientais – são erros relacionados à influência de fatores naturais, tal como pancadas de chuva e umidade, temperatura, descargas atmosféricas, pressão, intemperismo químico e físico, dentre outros. Sistemas automatizados são mais susceptíveis a erros ambientais.

Erros observacionais – são erros relacionados às diferentes técnicas de observação empregadas para avaliação das leituras. Esses tipos de erros podem ser minimizados através de treinamentos e cursos com intuito de inteirar toda equipe dos procedimentos de leitura adotados. Os erros de leitura são mais comuns em sistemas de instrumentação não automatizados.

Erros aleatórios – são erros relacionados a histerese, ruídos, atrito interno, vida útil dos equipamentos, dentre outros. Esses são minimizados através da escolha adequada do instrumento, acompanhamento dos resultados apresentados e do tratamento matemático das leituras por meio de análises estatísticas e determinísticas.

3.4 Princípios estatísticos

No que diz respeito a análise estatística sobre valores amostrados de instrumentação piezométrica, as distribuições de probabilidade são notáveis ferramentas para se definir limites de controle e detectar potenciais de mudança em resultados de um subgrupo para outro.

Todavia, nem todos os dados seguem uma distribuição de probabilidade e, nem sempre é possível identificar “*outliers*” (valores demasiadamente discrepantes) através de métodos relacionados às distribuições. Nessa lógica, comumente, tem-se utilizado o diagrama de quartis e extremos (*boxplot*) como solução alternativa para casos onde o critério de análise não depende de simetria ou de distribuição de dados.

3.4.1 Distribuição normal de probabilidade

Conhecida como “curva em forma de sino”, a distribuição normal de probabilidade é definida por um parâmetro de localização e outro de variabilidade. Sua origem está ligada aos erros de mensuração e foi deduzida matematicamente por Gauss.

Uma variável aleatória X tem distribuição normal com parâmetros μ e σ , $-\infty < \mu < +\infty$, $0 < \sigma^2 < +\infty$, se sua função de densidade de probabilidade for expressa por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad -\infty < x < \infty \quad (1)$$

A equação acima contempla os parâmetros μ e σ , onde μ : posição central da distribuição (média) e σ : dispersão da distribuição (desvio padrão). A Figura 10 ilustra como é a curva normal típica.

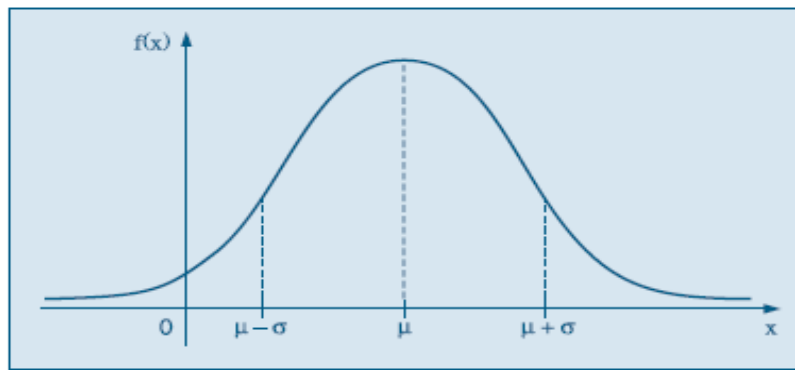


Figura 10 – Função de distribuição de probabilidade de uma variável aleatória normal com média μ e desvio padrão σ (MORETTIN e BUSSAB, 2010)

É válido destacar que, a distribuição normal de probabilidade tem como peculiaridade a simetria em torno da média e apresentar um único valor para média, mediana e moda.

Correa (2003) declara que a probabilidade de uma variável assumir valores entre a e b é igual à área sob a curva entre esses dois pontos, tal como mostrado na Figura 11. No caso da distribuição normal a probabilidade entre dois pontos só pode ser obtida de forma aproximada, por métodos numéricos. Essa tarefa é facilitada através do uso da distribuição normal padrão.

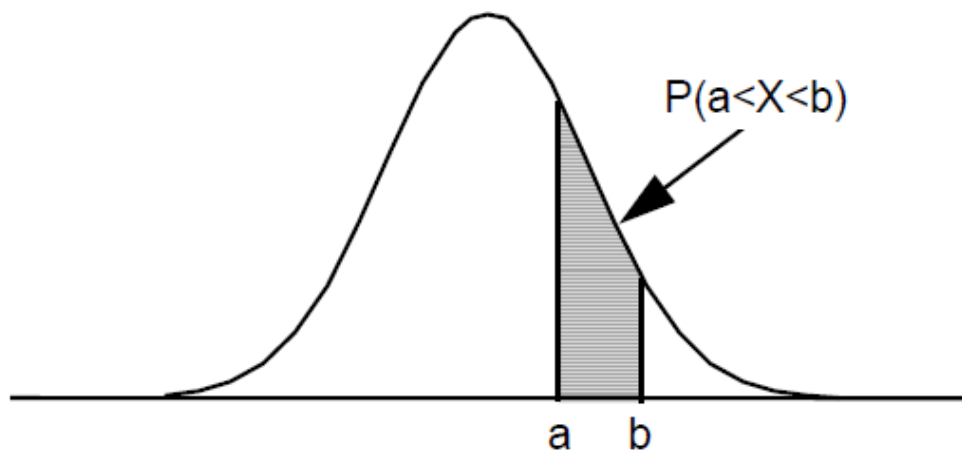


Figura 11 – Probabilidade como área sob a curva entre dois pontos (CORREA, 2003)

3.4.2 Distribuição normal padrão

A distribuição normal com média 0 e desvio padrão 1 é chamada de distribuição normal padrão e é conhecida pelo valor padronizado Z. A variável aleatória é definida por

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

Essa transformação é ilustrada pela Figura 12:

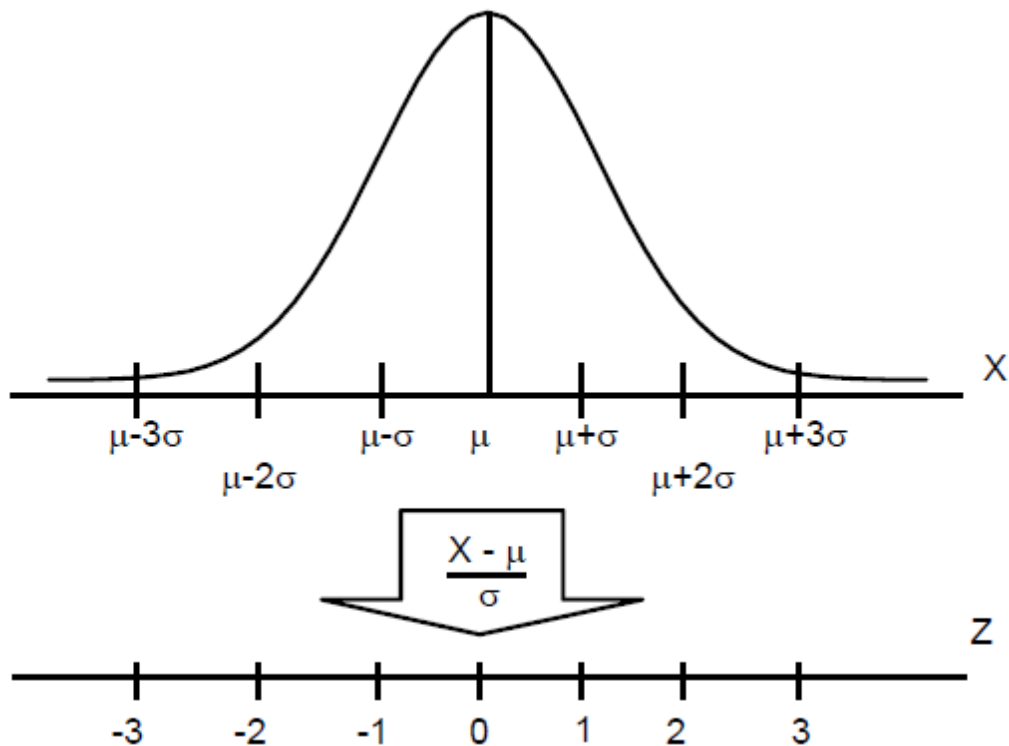


Figura 12 – Transformação de uma $N(\mu, \sigma^2)$ para $N(0,1)$

Uma variável aleatória X com distribuição normal com média μ e variância σ^2 pode ser representada por $N(\mu, \sigma^2)$ e quando essa segue uma distribuição normal padrão pode ser expressa por $N(1, 0)$.

3.4.3 Teste de Normalidade

Sabe-se que, nem todos grupos amostrais seguem uma distribuição normal de probabilidade. Dessa forma, é válido verificar, antes de qualquer tratamento estatístico, se a distribuição de probabilidade dos dados é compatível com o método de análise estatística adotado.

Um teste de normalidade comumente empregado no meio estatístico é o Shapiro-Wilk. O software estatístico R, emprega a extensão do teste W de Shapiro e Wilk para amostras grandes (válido para $n \leq 2000$).

O teste Shapiro-Wilk baseia-se na estatística W dada por:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Onde $x_{(i)}$ são os valores da amostra ordenados, a constante b depende de constantes geradas pelas médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra de tamanho n de uma distribuição Normal e \bar{x} expressa a média calculada.

Para se realizar o teste:

a) Formula-se as hipóteses:

H_0 : Os dados seguem uma distribuição normal

H_1 : Os dados não seguem uma distribuição normal

b) Adota-se um nível α de significância para o teste. Royston (1995) sugere um p - valor menor que 0,1 como adequado para o teste. Assim, adota-se $\alpha = 0.05$ para teste de hipóteses.

c) Calcula-se W.

d) Decisão: Rejeita-se H_0 ao nível de significância α se $W_{calculado} < W_{\alpha}$.

W_{α} (tabelado de acordo com o nível de significância e o tamanho da amostra).

Dessa forma, é correto dizer que, se $P[W_{calculado} > W_{\alpha}]$, ou seja, $P[W_{calculado}] > 0.05$ a amostra se aproxima significativamente de uma distribuição normal.

3.4.4 Controle estatístico de processos baseados em distribuição normal (CEP)

Takahashi (2011) relata que o controle estatístico de processos e sua aplicação na melhoria da qualidade iniciaram-se em 1924, quando Walter A. Shewhart, da Bell Telephone Laboratories desenvolveu o conceito estatístico de gráfico de controle (cartas de controle).

Todo processo pode apresentar variações aleatórias e inevitáveis dentro de um intervalo de confiança assumido. Quando essas variações ocorrem são denominadas causas comuns. Todavia, o processo também pode apresentar variações fora do intervalo esperado, essas são denominadas causas especiais.

É substancial determinar limites de controle para identificação de causas especiais e retirar os pontos discrepantes encontrados dos cálculos (parâmetros de localização e variabilidade) a fim de não alterar a representatividade da análise estatística. Vale ressaltar que, os pontos são eliminados dos cálculos, mas não dos resultados.

Ribeiro e Caten (2012) afirmam que os resultados estatísticos dão partida para a tarefa de análise, mas a explicação do que está acontecendo reside no próprio processo.

Reneau (2000) destaca que os limites de controle são calculados, principalmente, a partir do desvio padrão e da amplitude das informações em torno de uma tendência central (média e/ou mediana) assumindo determinado intervalo de confiança.

O intervalo de confiança consiste na fixação de dois valores críticos tais que $(1 - \alpha)$ seja a probabilidade de que o intervalo, por eles determinado, contenha o verdadeiro valor do parâmetro.

α : nível de significância

$1 - \alpha$: coeficiente de confiança ou nível de confiabilidade.

O valor crítico é definido como aquele que separa os valores das estatísticas amostrais prováveis de acontecer dos valores que têm chances minutas de ocorrer. No que tange a distribuição normal padrão esse valor crítico é definido por $Z_{\alpha/2}$, onde

$Z_{\alpha/2}$ representa a variável aleatória padronizada Z quando o nível de confiança é $(1-\alpha)$.

A Figura 13 ilustra alguns intervalos de confiança para valores de $Z_{\alpha/2} = 1, 2, 3$ em uma distribuição normal.

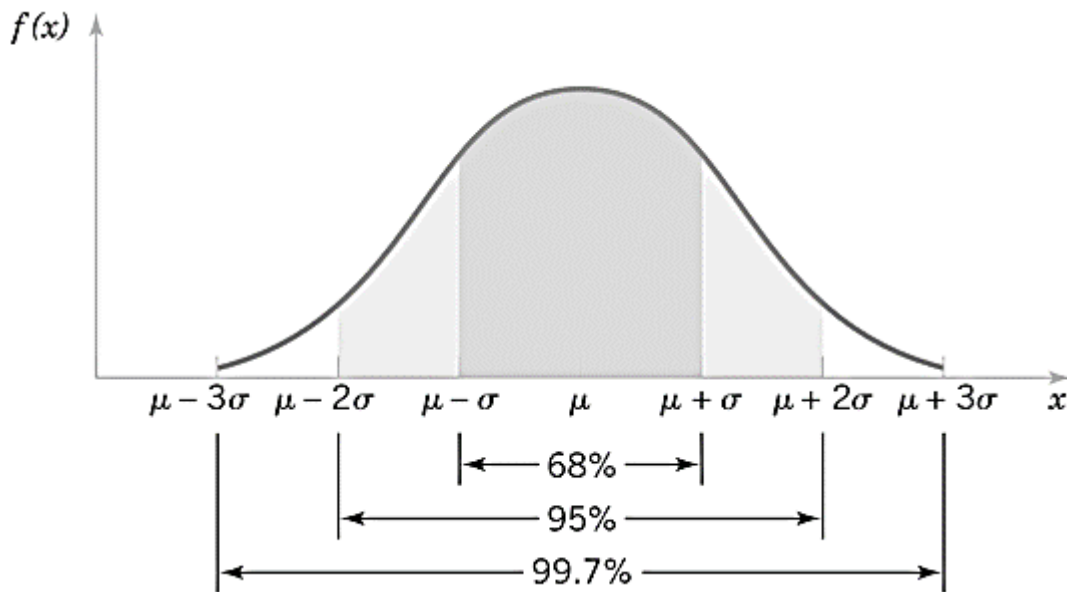


Figura 13 – Exemplo de nível de confiança em uma distribuição normal

As equações 4 e 5 abaixo apresentam o limite inferior de controle (LIC) e o limite superior de controle (LSC), respectivamente.

$$LIC = \mu - Z_{\frac{\alpha}{2}} * \sigma \quad (4)$$

$$LSC = \mu + Z_{\frac{\alpha}{2}} * \sigma \quad (5)$$

Onde μ : posição central da distribuição (média) e σ : dispersão da distribuição (desvio padrão).

3.4.5 Boxplot

Nem sempre uma amostra de dados segue uma distribuição de probabilidade conhecida ou apresenta simetria tal como a curva de distribuição normal. Nesses casos onde a tratativa e análise de dados não seguem critérios bem definidos a

análise estatística através do método *boxplot*, também conhecido como diagrama de quartis e extremos, apresenta resultados mais satisfatórios. Esse permite a identificação de pontos discrepantes, a avaliação de simetria e dispersão.

O nome vem do fato de que a metade central de um conjunto de dados é representada pela região entre as partes de cima e de baixo de uma caixa (retângulo). Assim, a parte superior do quadro (se o software exibir o quadro verticalmente, já que alguns exibem o quadro horizontalmente) é o 75º percentil (equivalente ao terceiro quartil, Q_3), e a parte inferior do quadro é o 25º percentil (o primeiro quartil, Q_1). Uma linha horizontal é desenhada no 50º percentil (equivalente a mediana ou ao segundo quartil, Q_2) (RYAN, 2011).

Para construção de um gráfico *boxplot* os seguintes passos são necessários:

- a) Ordenar valores, em ordem crescente, e calcular intervalo interquartil.

$$I.I.Q. = 3^{\circ} \text{ quartil} - 1^{\circ} \text{ quartil} \quad (6)$$

- b) Determinar limites.

$$\text{Limite inferior} = 1^{\circ} \text{ quartil} - 1,5 * I.I.Q. \quad (7)$$

$$\text{Limite superior} = 3^{\circ} \text{ quartil} + 1,5 * I.I.Q. \quad (8)$$

- c) Desenhar traço até o menor e o maior valor existente dentro dos limites calculados.
- d) Avaliar possíveis causas especiais (valores extremos), fazer análise com e sem esses valores e verificar se o resultado é afetado.

As observações discrepantes (*outliers*) são destacadas no gráfico. Normalmente são representadas pelo símbolo “o” ou por um “x”. A Figura 14 ilustra um típico gráfico *boxplot* e como seus elementos são apresentados visualmente.

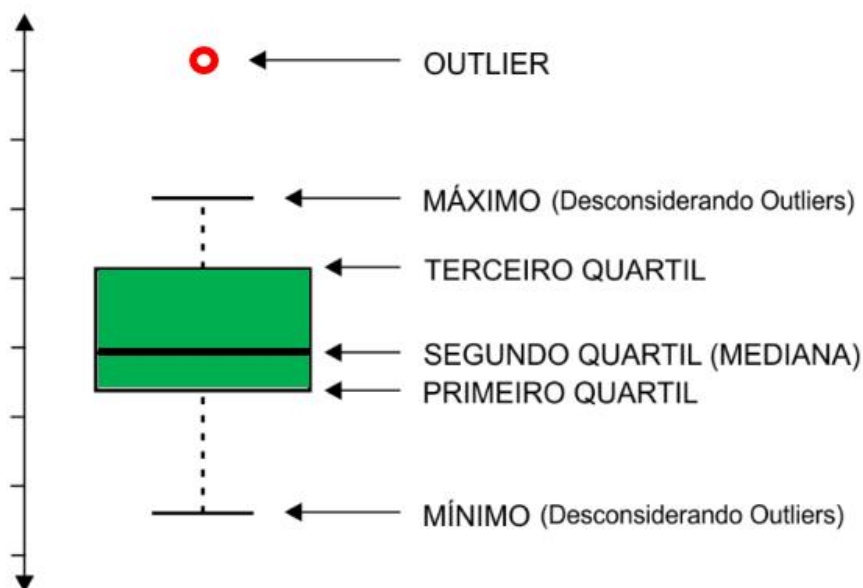


Figura 14 – Elementos de um gráfico boxplot

Devore (2011) separa os *outliers* em extremos e moderados. Qualquer valor distante mais do que 1,5I.I.Q. e menor que 3I.I.Q. do quarto mais próximo é considerado um *outlier* moderado e, qualquer valor distante mais do que 3I.I.Q. é considerado um *outlier* extremo. Devore (2011) também destaca que, um único *outlier* extremo na amostra avisa o investigador de que tais procedimentos não devem ser usados e a presença de múltiplos *outliers* moderados transmite a mesma mensagem. Todavia, nem todos os softwares estatísticos fazem essa distinção dos *outliers*. Essa diferenciação de medidas discrepantes sugerida por Devore (2011) não foram utilizadas nesse trabalho.

Cabe salientar que, outros gráficos tais como histogramas, uma vez utilizados em conjunto com o *boxplot*, podem facilitar o processo de interpretação de dados. Nessa perspectiva, Braga (2010) relata que o histograma é um gráfico que permite visualizar a distribuição de frequências dos intervalos de ocorrência de uma variável quantitativa.

4 METODOLOGIA

A partir de leituras de medidores de nível d'água e de piezômetros de tubo aberto, realizadas com auxílio de pio elétrico, em uma barragem de terra situada na região do quadrilátero ferrífero foi feita uma separação temporal baseada em três fases distintas de disposição de rejeitos na barragem: (Fase 0) Período em que os rejeitos da usina ainda não eram enviados para barragem; (Fase 1) Período em que passou a ser enviado para a barragem a fração fina do rejeito WHIMS (overflow ciclonação de desaguamento), as lamas e o overflow da ciclonação de desaguamento do estágio scavenger; (Fase 2) Além dos rejeitos enviados na fase 1, passou a ser enviado rejeitos compostos pelo overflow do adensamento e rejeito da flotação. Uma vez organizados os dados, partiu-se para a etapa de análise estatística.

A análise estatística foi realizada integralmente com suporte do software estatístico R. Essa consistiu, basicamente, em averiguar qual das duas metodologias era mais adequada para identificação de leituras piezométricas discrepantes (*outliers*): (1) Controle estatístico de processos baseado em uma distribuição normal ou (2) Diagramas de quartis e extremos (*Boxplot*).

É válido destacar que, os valores utilizados para análises estatísticas supracitadas seguiram uma mesma sequência temporal, ou seja, para maior significância no estudo os dados utilizados tiveram praticamente o mesmo período de espaçamento entre leituras.

No que diz respeito à primeira metodologia, fez-se necessário a verificação da normalidade do grupo amostral. Nessa lógica, foi realizado um teste de normalidade através da extensão do teste W de Shapiro e Wilk para amostras grandes (válido para $n \leq 2000$). Quanto à segunda metodologia, sabe-se que o *Boxplot* não depende de tipos de distribuição nem de critérios de simetria. Nesse sentido não foi realizado nenhum teste de normalidade.

Após verificada qual metodologia era mais adequada, foi feita a aplicação dessa visando entender os possíveis erros e causas ligados aos *outliers* encontrados nas leituras piezométricas dos instrumentos da barragem de terra estudada.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Introdução

Esse trabalho foi pautado em leituras piezométricas de instrumentos não automatizados do tipo piezômetros de tubo aberto (*Standpipe*) e medidores de nível d'água de uma barragem de terra da FERROUS RESOURCES DO BRASIL SA situada no quadrilátero ferrífero (Minas Gerais).

Localizada no município de Jeceaba, a Barragem 7 (alvo desse estudo) recebe todo o rejeito gerado na planta de beneficiamento por meio de um rejeitoduto. Essa estrutura constava até a data da última coleta de dados para análise estatística (26/04/2019) com 14 INAs e 10 PZs. Cabe ressaltar que, nem todos seus instrumentos piezométricos receberam tratamento estatístico, visto que, alguns foram instalados recentemente e não tinham uma base histórica de leituras significativa para a análise adotada. A Figura 15 apresenta a vista superior da Barragem 7.



Figura 15 – Vista superior Barragem 7

O maciço foi construído até a elevação 925,0 m e a crista possui comprimento de 497 m, largura de 8,0 m e altura máxima de 64,0 m. Considerando borda livre de

1,70 m (em função da soleira do sistema extravasor) e disposição horizontal, a barragem tem capacidade de armazenamento de 32,70 Mm³.

Para o controle das percolações pelo maciço foi concebido um sistema de drenagem interna constituído por um filtro vertical de areia ligado a um tapete drenante horizontal do tipo sanduíche (areia/brita/areia). A drenagem interna se conecta a um dreno de pé constituído por enrocamento e transições.

A drenagem superficial do maciço é composta por canaletas de bermas, descidas de água e bacia de dissipação e o sistema extravasor do maciço final foi previsto na ombreira esquerda, sendo composto por canal de aproximação, caixa de transição, canal rápido e bacia de dissipação. A Figura 16 apresenta uma seção típica esquemática do dique de partida da Barragem 7, considerando um núcleo de saprolito envolvido por argila.

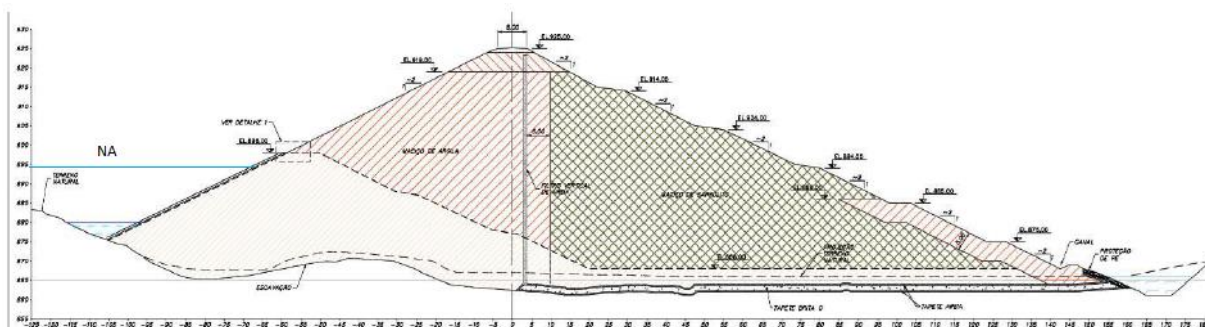


Figura 16 – Seção típica do dique de partida da Barragem 7

Além dos instrumentos supracitados, a Barragem 7 consta (26/04/2019) com 12 marcos superficiais e um (01) medidor de vazão do tipo Calha Parshall à jusante da estrutura.

A Figura 17 mostra o desenho esquemático dos instrumentos piezométricos analisados.

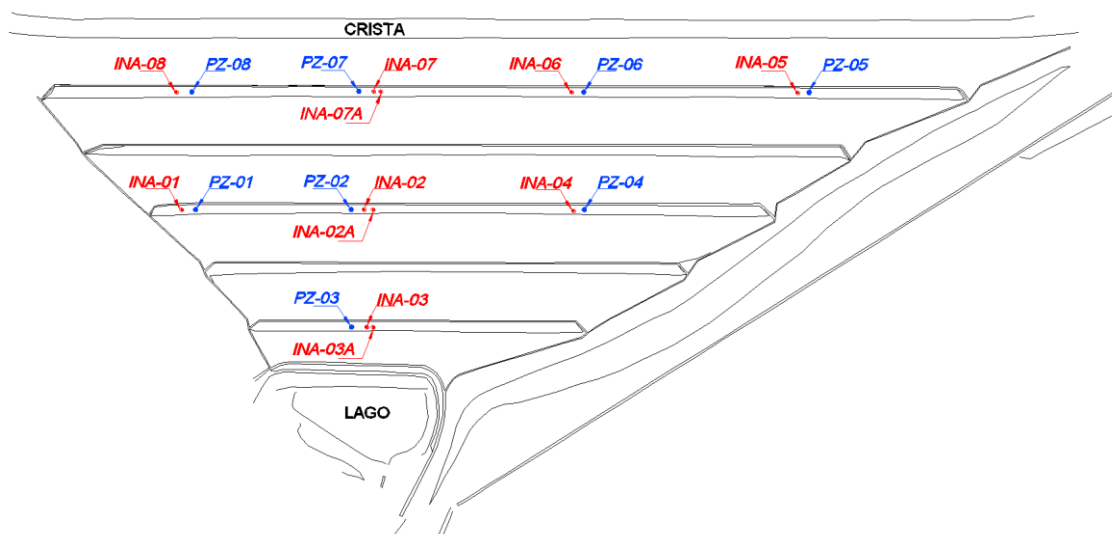


Figura 17 – Desenho esquemático dos instrumentos piezométricos estudados no talude de jusante da barragem

Os instrumentos foram analisados de acordo com as fases de disposição de rejeitos na barragem. A Tabela 1 traz as datas detalhadas de cada fase analisada a partir do funcionamento e instalação de cada medidor de nível d'água e de cada piezômetro *Standpipe*.

Tabela 1 – Distribuição temporal de disposição de rejeito na barragem

<i>Instrumento</i>	<i>Fase 0</i>	<i>Fase 1</i>	<i>Fase 2</i>
<i>INA 01</i>	-	-	-
<i>INA 02</i>	11/11/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>INA 02 A</i>	11/11/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>INA 03</i>	05/01/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>INA 03 A</i>	05/01/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>INA 04</i>	-	-	-
<i>INA 05</i>	-	-	-
<i>INA 06</i>	05/01/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>INA 07</i>	22/02/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>INA 07 A</i>	04/11/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>INA 08</i>	22/02/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>PZ 01</i>	-	-	-
<i>PZ 02</i>	05/01/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>PZ 03</i>	05/01/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>PZ 04</i>	-	04/05/18 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>PZ 05</i>	-	-	-
<i>PZ 06</i>	-	04/05/18 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>PZ 07</i>	05/01/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19
<i>PZ 08</i>	05/01/16 à 31/07/17	31/07/17 à 26/10/18	01/11/18 à 26/04/19

O símbolo “-“ na Tabela 1 indica que não foram constatadas leituras no período, seja por o instrumento se encontrar seco ou por não ter sido instalado na data referente a fase de disposição de rejeitos.

5.2 Resultados e Discussões

5.2.1 Análise estatística dos valores de leitura

5.2.1.1 Teste W de Shapiro e Wilk

Para determinação de limites de controle e verificação de valores extremos através do método de controle estatístico de processos baseados em distribuição normal é necessário que se faça o teste de normalidade. Nesse sentido, os testes que apresentarem p-valor < 0,05, conforme item 3.4.3, não aproximam significativamente de uma distribuição normal e suas amostras não são representativas o suficiente para se determinar *outliers* através dessa metodologia.

A Tabela 2 mostra o resultado do teste de normalidade W de Shapiro e Wilk realizado para grandes amostras, através do software estatístico R, com os dados dos instrumentos piezométricos da barragem em cada fase de disposição de rejeitos.

Tabela 2 – Resultados do Shapiro Wilk teste para as leituras piezométricas

	<i>Fase 0</i>		<i>Fase 1</i>		<i>Fase 2</i>	
	<i>W</i>	<i>p - valor</i>	<i>W</i>	<i>p - valor</i>	<i>W</i>	<i>p - valor</i>
<i>INA 01</i>	-	-	-	-	-	-
<i>INA 02</i>	0.92267	0.00047	0.94143	4.32E-05	0.83921	6.72E-06
<i>INA 02 A</i>	0.15982	2.20E-16	0.94109	4.09E-05	0.90393	0.00057
<i>INA 03</i>	0.94203	1.14E-06	0.51911	2.20E-16	0.97416	<u>0.32650</u>
<i>INA 03 A</i>	0.94544	2.22E-06	0.98319	<u>0.13030</u>	0.97625	<u>0.39370</u>
<i>INA 04</i>	-	-	-	-	-	-
<i>INA 05</i>	-	-	-	-	-	-
<i>INA 06</i>	0.92295	3.74E-08	0.98542	<u>0.20990</u>	0.87714	7.89E-05
<i>INA 07</i>	0.95617	3.70E-05	0.95197	0.00025	0.78907	4.06E-07
<i>INA 07 A</i>	0.93500	0.001407	0.96323	0.00198	0.95683	<u>0.06115</u>
<i>INA 08</i>	0.93187	3.35E-07	0.98196	<u>0.09946</u>	0.86714	3.98E-05
<i>PZ 01</i>	-	-	-	-	-	-
<i>PZ 02</i>	0.92447	4.82E-08	0.91834	1.50E-06	0.84933	1.25E-05
<i>PZ 03</i>	0.87423	4.00E-11	0.80587	1.87E-11	0.87896	8.96E-05
<i>PZ 04</i>	-	-	0.95839	<u>0.08131</u>	0.93786	0.01009
<i>PZ 05</i>	-	-	-	-	-	-
<i>PZ 06</i>	-	-	0.95683	<u>0.07018</u>	0.90756	0.00076
<i>PZ 07</i>	0.92035	2.45E-08	0.91994	1.85E-06	0.94656	0.02269
<i>PZ 08</i>	0.93626	3.81E-07	0.92326	2.92E-06	0.94394	0.01772

Como se pôde observar apenas 20% das análises apresentaram p-valor superior a 0,05 e nenhum instrumento apresentou esse resultado em todas as fases de disposição de rejeito analisadas.

5.2.1.2 CEP baseado em distribuição normal

Como visto no item 5.2.1 o resultado obtido no teste Shapiro-Wilk mostra que esse método não é o mais adequado para a análise de *outliers* dos instrumentos da barragem estudada. A Figura 18 mostra os resultados do INA03A na fase 1 (esse instrumento apresentou normalidade nessa fase com p-valor = 0,13030 > 0,05), obtidos através do software estatístico R, para o método de controle estatístico de

processos. Esse assume um intervalo de confiança de 99.7% para obtenção dos limites de controle.

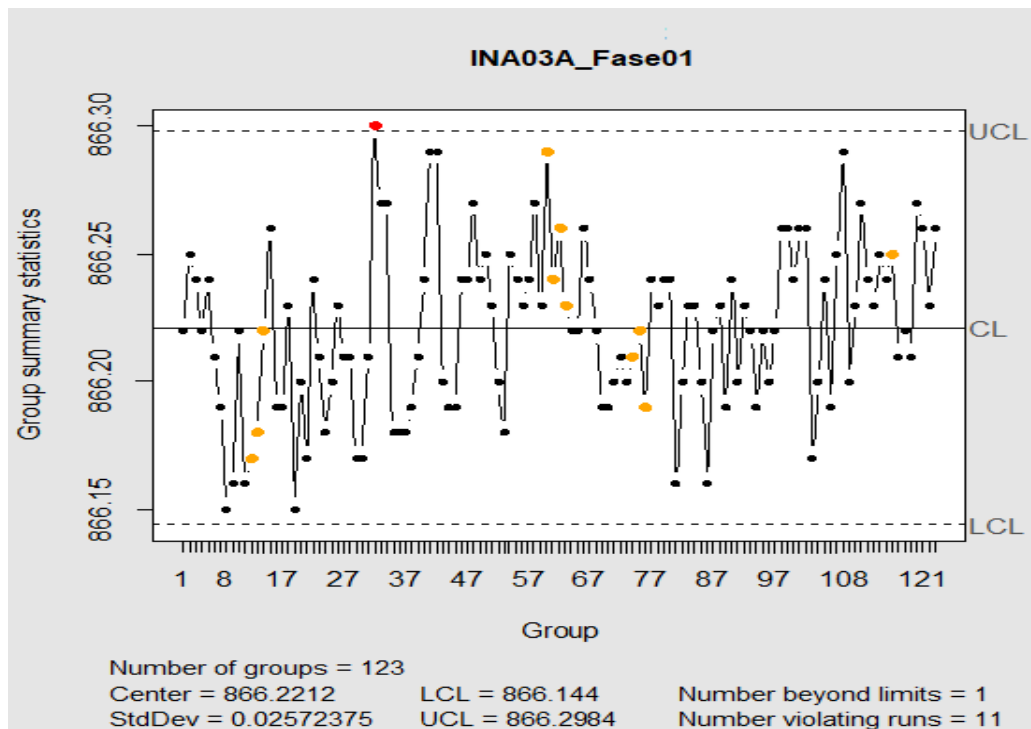


Figura 18 – Resultado de outliers das leituras do INA03A obtidos através de CEP

5.2.1.3 Boxplot

Conforme citado no item 3.4.5, nem sempre uma base de dados segue uma distribuição de probabilidade ou apresenta critérios de simetria. Nesses casos o método estatístico *boxplot*, também conhecido como diagrama de quartis e extremos ou distribuição empírica de probabilidade mostra mais adequado para o estudo de valores discrepantes (*outliers*). Abaixo serão apresentadas os instrumentos e fases que apresentaram *outliers* e em seguida esses serão analisados. Os resultados dos instrumentos que não apresentaram leituras extremas estão no apêndice desse trabalho (item 0).

A Figura 19 mostra os histogramas e boxplots do INA02A.

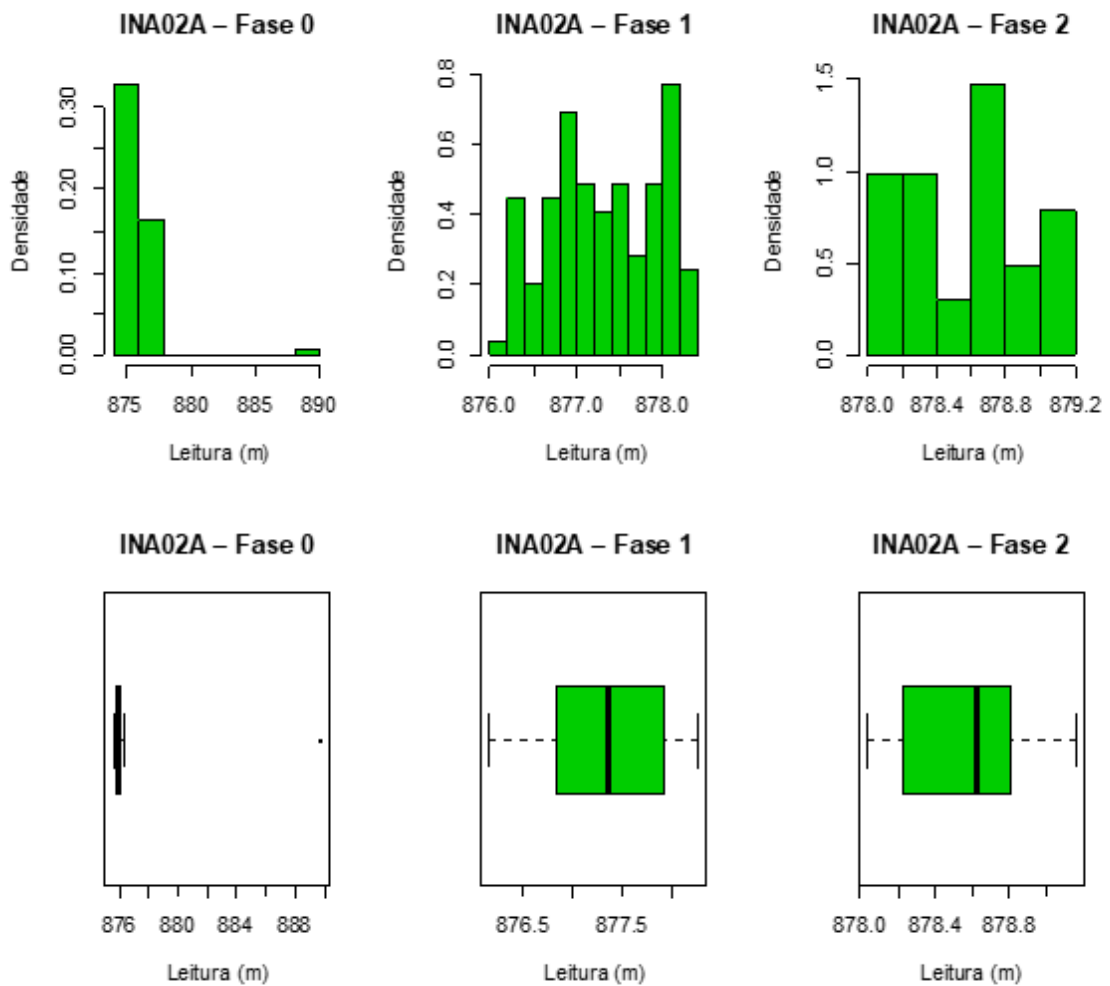


Figura 19 – Outliers das leituras do INA02A obtidos através do método boxplot

O INA02A apresentou na fase 0 *outlier* cujo valor medido foi de 889.69m devido a um “teste de vida” realizado no instrumento no dia 06/01/2017.

A Figura 20 mostra os histogramas e boxplots do INA03.

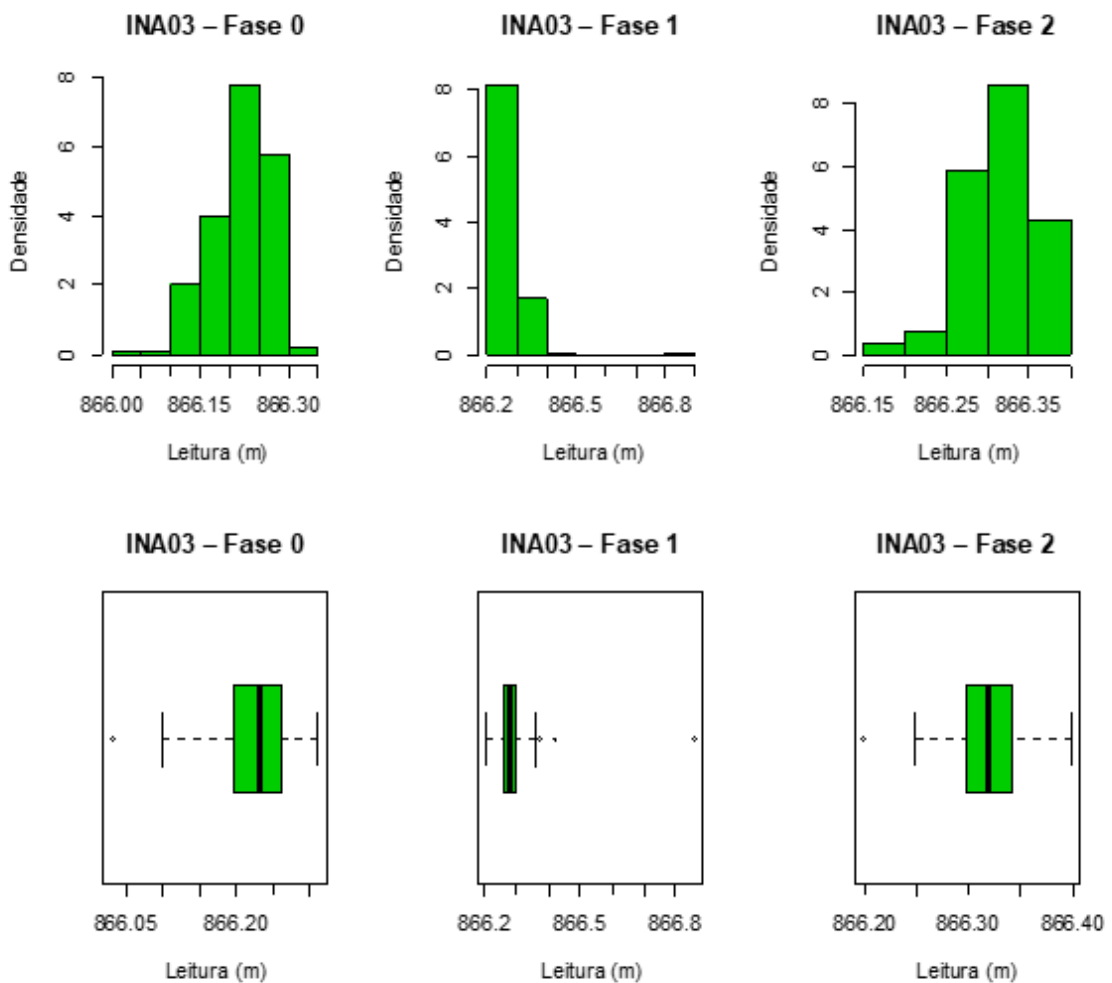


Figura 20 - Outliers das leituras do INA03 obtidos através do método boxplot

INA03 apresentou na fase 1 *outlier* com valor de 866.86m no 01/12/2017 (precipitação de 90mm) e de 866.37m no dia 04/12/2017 (precipitação de 88mm). Como os valores discrepantes aconteceram em datas de pancadas de chuva, acredita-se que os erros desses são devido à sensibilidade das leituras do pio elétrico em dias chuvosos.

A Figura 21 mostra os histogramas e boxplots do PZ02.

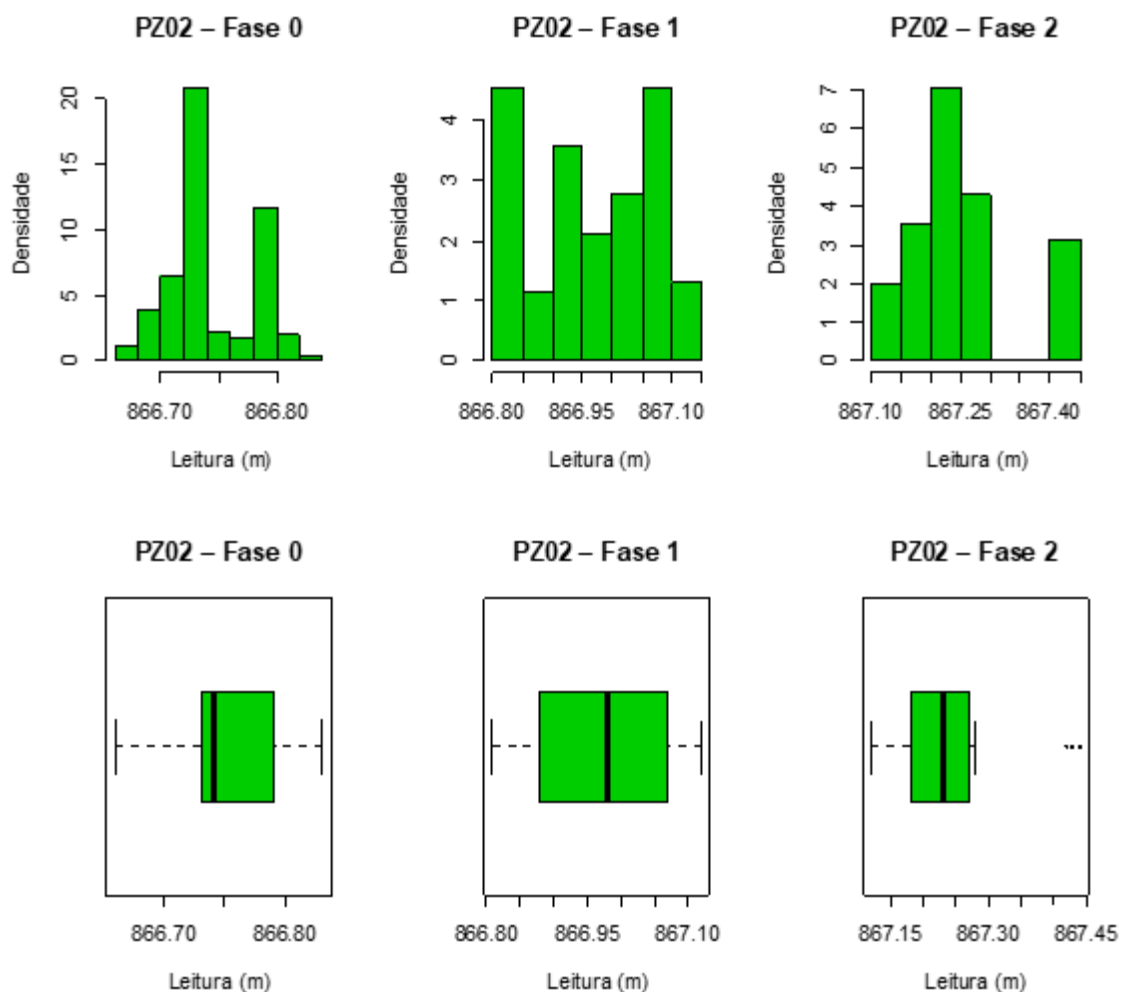


Figura 21 - Outliers das leituras do PZ02 obtidos através do método boxplot

No dia 04/02/2019 houve troca do pio elétrico por um novo aparelho. A troca gerou uma variação da ordem de 15 a 20 cm na fase 2 do PZ02 e nos INA's 03A, 06, 07 e 08 (conforme observado no item 8). Essa variação abrupta foi suficiente para que as leituras ultrapassassem os limites de controles dos parâmetros adotados e enquadrasse as medidas posteriores à essa data como valores extremos. Nessa perspectiva, faz-se necessário uma correção das novas leituras mediante às antigas ou uma nova análise para verificação dos *outliers*. Como não se tem uma base de dados robusta das novas leituras e esse tipo de análise estatística se baseia no histórico dos instrumentos piezométricos, sugere-se uma análise estatística dos

valores que sucederão esse evento baseada no histórico de variações do instrumento, tal como propõe o item 5.2.2. Dessa forma os erros propagados pela troca do aparelho serão eliminados.

A Figura 22 mostra os histogramas e boxplots do PZ03.

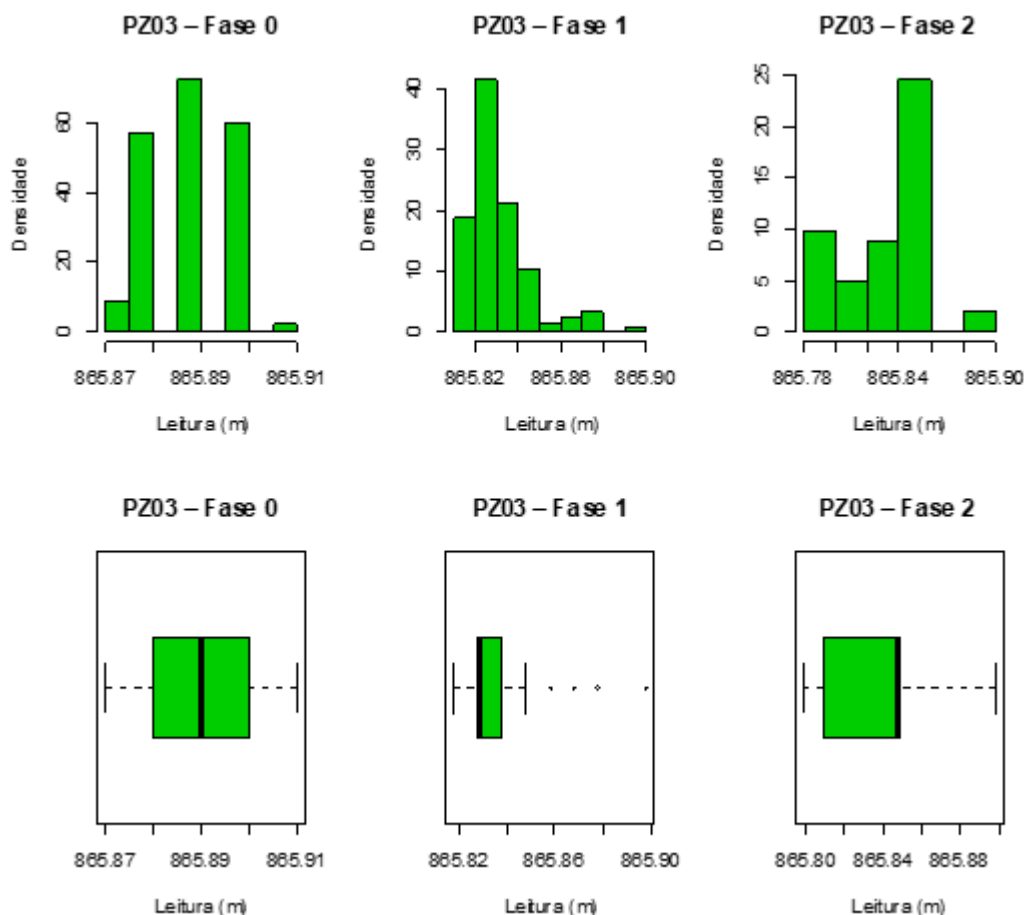


Figura 22 - Outliers das leituras do PZ03 obtidos através do método boxplot

Observa-se que a variação máxima de leituras piezométricas no instrumento do início da fase 0 ao final da fase 2 foi da ordem de 11 cm (variações pequenas devido o gradiente hidráulico). Nessa perspectiva, é válido analisar com cautela os valores de *outliers* antes de inferir um resultado precipitado do gráfico *boxplot*, uma vez que, os valores encontrados conforme mostra a Figura 29 (item 0) são acurados. O item 5.2.2 auxilia no esclarecimento dessa afirmativa.

5.2.2 Análise estatística das variações das leituras piezométricas

Com intuito de melhor entender as variações piezométricas compreendidas no histórico das leituras e visando identificar valores discrepantes, separou-se as variações em intervalos temporais constantes (baseados nas coletas), sendo aplicado os princípios estatísticos empregados no item 5.2.1.

5.2.2.1 Teste W de Shapiro e Wilk

Assim como observado na Tabela 3, percebe-se que apenas 15% das variações estudadas apresentaram distribuição normal de probabilidade. Nesse sentido, o método de controle estatístico de processos baseado em distribuição normal não é o mais representativo para o estudo em questão. O método *boxplot*, tal como para análise estatística dos valores de leitura se mostra mais apropriado.

Tabela 3 - Resultados do Shapiro Wilk teste para variação das leituras piezométricas

	Fase 0		Fase 1		Fase 2	
	W	p - valor	W	p - valor	W	p - valor
INA 01	-	-	-	-	-	-
INA 02	0.85674	1.97E-06	0.95883	9.09E-04	0.95252	0.04334
INA 02 A	0.22161	2.20E-16	0.97846	0.04784	0.77086	1.99E-07
INA 03	0.97685	4.46E-03	0.56675	2.20E-16	0.95663	0.06424
INA 03 A	0.96207	9.02E-05	0.97875	0.05102	0.95905	0.08114
INA 04	-	-	-	-	-	-
INA 05	-	-	-	-	-	-
INA 06	0.94159	1.11E-06	0.98795	0.35820	0.91414	1.46E-03
INA 07	0.48922	2.20E-16	0.98419	0.16540	0.88167	1.26E-04
INA 07 A	0.92513	0.000545	0.98926	0.45780	0.88922	0.00022
INA 08	0.95393	2.41E-05	0.94768	0.00013	0.86566	4.23E-05
PZ 01	-	-	-	-	-	-
PZ 02	0.86472	1.42E-11	0.75824	6.81E-13	0.68355	4.24E-09
PZ 03	0.64879	2.20E-16	0.72491	8.06E-14	0.67237	2.73E-09
PZ 04	-	-	0.94408	0.02336	0.90908	0.00097
PZ 05	-	-	-	-	-	-
PZ 06	-	-	0.92923	0.00639	0.70332	9.50E-09
PZ 07	0.81560	8.99E-14	0.86265	2.94E-09	0.86129	3.17E-05
PZ 08	0.92427	5.00E-08	0.81596	4.70E-11	0.71987	1.92E-08

5.2.2.2 Boxplot

A fim de definir limites de controle para as variações dos instrumentos, em intervalos de tempo conhecidos e constantes, e identificar medidas atípicas pautadas nas observações ao longo do histórico dos INAs e PZs, utilizou-se o método estatístico *boxplot* para obtenção da carta de sensibilidade às variações das leituras observadas (conforme mostra a Tabela 4 e Tabela 5).

Esses limites foram diferenciados em valores moderados e extremos (conforme item 3.4.5). Assim, sugere-se que na leitura de três a cinco *outliers* moderados consecutivos ou um *outlier* extremo tente se identificar as causas desses.

Ribeiro & Caten (2012) destacam que, quanto maior o tamanho da amostra maior a sensibilidade das cartas, ou seja, elas detectam melhor pequenas mudanças no processo. Nesse sentido, as atualizações contínuas das variações das medidas piezométricas no modelo estatístico adotado colaboram para resultados mais confiantes. Vale ressaltar que, em alguns casos os valores de *outliers* podem influenciar na sensibilidade dessas cartas. Desse modo, nesses casos, sugere-se que os valores extremos sejam eliminados dos cálculos dos limites. Todavia, os mesmos devem ser representados nos resultados e terem suas causas identificadas.

A Tabela 4 traz um resumo dos valores limites moderados de variação dos instrumentos (alvo de estudo desse trabalho) baseados em seus históricos de leituras.

Tabela 4 – Carta de sensibilidade às variações das leituras piezométricas obtidas através do método estatístico boxplot (valores moderados)

	<i>Fase 0</i>		<i>Fase 1</i>		<i>Fase 2</i>	
	<i>LI (cm)</i>	<i>LS (cm)</i>	<i>LI (cm)</i>	<i>LS (cm)</i>	<i>LI (cm)</i>	<i>LS (cm)</i>
<i>INA 01</i>	-	-	-	-	-	-
<i>INA 02</i>	-11.00	12.00	-17.00	18.00	-10.00	12.00
<i>INA 02 A</i>	-10.00	12.00	-13.00	19.00	-7.00	9.00
<i>INA 03</i>	-5.00	6.00	-9.00	8.00	-7.00	7.00
<i>INA 03 A</i>	-6.00	6.00	-9.00	9.00	-6.00	6.00
<i>INA 04</i>	-	-	-	-	-	-
<i>INA 05</i>	-	-	-	-	-	-
<i>INA 06</i>	-9.00	10.00	-14.00	14.00	-7.00	9.00
<i>INA 07</i>	-12.00	9.00	-9.00	9.00	-8.00	6.00

	<i>LI (cm)</i>	<i>LS (cm)</i>	<i>LI (cm)</i>	<i>LS (cm)</i>	<i>LI (cm)</i>	<i>LS (cm)</i>
INA 07 A	-11.00	9.00	-11.00	11.00	-10.00	8.00
INA 08	-4.00	4.00	-8.00	10.00	-8.00	7.00
PZ 01	-	-	-	-	-	-
PZ 02	-1.00	2.00	-1.00	2.00	-1.00	2.00
PZ 03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PZ 04	-	-	-3.00	4.00	-3.00	5.00
PZ 05	-	-	-	-	-	-
PZ 06	-	-	-10.00	7.00	-4.00	4.00
PZ 07	-1.00	2.00	-3.00	5.00	-5.00	7.00
PZ 08	-1.00	2.00	1.00	4.00	-2.00	8.00

A Tabela 5 traz um resumo dos valores limites extremos de variação dos instrumentos baseados em seus históricos de leituras.

Tabela 5 - Carta de sensibilidade às variações das leituras piezométricas obtidas através do método estatístico boxplot (valores extremos)

	<i>Fase 0</i>		<i>Fase 1</i>		<i>Fase 2</i>	
	<i>LI (cm)</i>	<i>LS (cm)</i>	<i>LI (cm)</i>	<i>LS (cm)</i>	<i>LI (cm)</i>	<i>LS (cm)</i>
INA 01	-	-	-	-	-	-
INA 02	-18,00	21,00	-25,00	33,00	-17,00	27,00
INA 02 A	-20,00	12,00	-22,00	19,00	-12,00	19,00
INA 03	-9,00	9,00	-17,00	15,00	-7,00	7,00
INA 03 A	-11,00	12,00	-9,00	9,00	-8,00	11,00
INA 04	-	-	-	-	-	-
INA 05	-	-	-	-	-	-
INA 06	-17,00	13,00	-17,00	14,00	-15,00	13,00
INA 07	-15,00	15,00	-9,00	9,00	-12,00	6,00
INA 07 A	-15,00	9,00	-14,00	11,00	-10,00	16,00
INA 08	-6,00	6,00	-16,00	12,00	-8,00	9,00
PZ 01	-	-	-	-	-	-
PZ 02	-3,00	3,00	-3,00	3,00	-2,00	3,00
PZ 03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ 04	-	-	-3,00	4,00	-5,00	8,00
PZ 05	-	-	-	-	-	-
PZ 06	-	-	-13,00	17,00	-4,00	9,00
PZ 07	-2,00	4,00	-6,00	8,00	-5,00	8,00
PZ 08	-3,00	4,00	0,00	6,00	-2,00	8,00

Sugere-se esse tipo de análise quando se tem uma rotina de coleta de dados com intervalos bem definidos e um histórico representativo. Em caso de instrumentos automatizados, que se tem uma gama de informações instantaneamente, é possível fazer esse estudo semelhante adotando diferentes intervalos temporais.

6 CONCLUSÕES

A solução estatística traz maior confiança em casos onde se têm um número expressivo de incertezas atreladas aos projetos geotécnicos. Na proa dessa afirmativa, pode-se se dizer que os princípios estatísticos trazem às ferramentas determinísticas de cálculos maior grau de confiabilidade, principalmente, no que diz respeito à análise de valores e comportamentos esperados ao longo do tempo.

Nesse trabalho foi proposto duas metodologias estatísticas para melhor compreender e identificar variações aleatórias e inevitáveis dentro de um intervalo de confiança e variações fora desse intervalo: (1) Controle estatístico de processos baseado em distribuição normal de probabilidade e (2) Diagrama de quartis e extremos (*boxplot*).

Através do teste de normalidade, realizado no software estatístico R (extensão do teste W de Shapiro e Wilk para amostras grandes) para as leituras piezométricas dos instrumentos da barragem de terra estudada, percebeu-se que menos de 20% dos resultados obedeceram a distribuição normal de probabilidade, ou seja, apresentaram p-valor superior a 0,05 (teste de hipóteses). Nesse sentido, o controle estatístico de processos baseado em distribuição normal não foi o método mais indicado para a análise de medidas discrepantes (*outliers*) desses valores.

Como solução alternativa para detectar leituras piezométricas extremas, adotou-se o método estatístico de diagrama de quartis e extremos. Essa escolha foi feita devido ao fato desse método não requerer que os dados sigam uma distribuição de probabilidade conhecida ou apresentem critérios de simetria para obter resultados satisfatórios.

Uma vez definido o princípio estatístico a ser utilizado, fez-se a análise de *outliers* para as variações e para as leituras piezométricas em intervalos de tempo praticamente semelhantes e pré-definidos a fim de se obter respostas mais próximas das esperadas em condições reais de monitoramento da barragem estudada.

Ao se fazer a análise histórica dos dados para reconhecer as causas que geraram os *outliers* encontrados em alguns instrumentos, percebeu-se que alguns deles ocorrerem devido à sensibilidade do pio elétrico em dias chuvosos, outros devido à

troca do pio elétrico por um aparelho novo (fato que proporcionou uma variação da ordem de 15 a 20 centímetros nos valores medidos) e também devido à leitura realizada durante “teste de vida” do instrumento.

Vale frisar que, apenas a avaliação estatística das leituras piezométricas e os resultados de modelos de comportamento geotécnicos não são suficientes para garantir segurança à estrutura. É imprescindível que se tenha conhecimento das características construtivas, que haja troca de experiência em obras equivalentes, que se tenha a boa prática de inspeções visuais, que se revise os planos de instrumentação e que se busque sempre elementos que despertem a percepção dos responsáveis técnicos para uma boa supervisão das condições de segurança da estrutura.

7 REFERÊNCIAS

ASCE. Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance. **American Society of Civil Engineers Task Committe**, USA, p. 600, 2000.

BRAGA, L. P. V. **Compreendendo probabilidade e estatística**. Rio de Janeiro: E-papers, 2010. 26 p.

CERQUEIRA. **Critérios de Projeto para Instrumentação Piezométrica de Diversas Estruturas Geotécnicas em Mineração**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 3. 2017.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e estatística**. 2. ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.

CRUZ, P. T. D. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. 2ª edição. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

DEVORE, J. **Probability and statistics for engeneering and the sciences**. 8th. ed. San Luis Obispo: CENGAGE Learning, 2011.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Perfomance**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

FUSARO, T. C. **Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto, p. 80. 2007.

KUPPERMAN et al. Reavaliação da Instrumentação de Auscultação Instalada em Barragens da CESP. **Anais do XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Salvador, 2003.

LINDQUIST, L. N. Instrumentação Geotécnica: tipos, desempenho, confiabilidade, eficiência da qualidade e quantidade. **Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná. ABMS/ABGE/CBGB. v. IB**, São Paulo, 1983.

MENGA et al. Gestão, Tratamento e Interpretação de Dados de Monitoração Estrutural para Controle de Barragens. **Anais do XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Belo Horizonte, 1999. 329-335.

MORETTIN; BUSSAB. **Estatística básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

RENEAU, J. K. Process control: timely feedback for quality milk production at the farm. **NACIONAL MASTITIS COUNCIL: Proceedings national mastitis council annual meeting.**, 2000.

REY, G. O. D. **Resumo Teórico e Prático para Testes de Aquíferos na Zona Saturada e Não Saturada: Ensaio de Infiltração in situ, Slug Test e Testes de Bombeamento**. Adasa. Brasília. 2016.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. T. **Controle Estatístico do Processo**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

ROYSTON, J. P. An extension of Shapiro and Wilk's test for normality to large samples. **Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)**, v. 31, p. 115-124, 1982.

ROYSTON, P. Remark AS R94: A remark on Algorithm AS 181: The W test for normality. **Applied Statistics**, 1995. 547-551.

RYAN, T. **Estatística moderna para engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011. 14 p.

SILVEIRA, J. F. A. **Glossário de Instrumentação**. São Paulo: ABGE, 1979.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina, 2006.

TAKAHASHI, F. H. **Aplicação de controle estatístico de processos (CEP) como ferramenta para a melhoria de qualidade do leite**. Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 26. 2011.

VIOTTI, C. B. Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento. **Anais do XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Tema I, Rio de Janeiro, 1980.

8 APÊNDICE

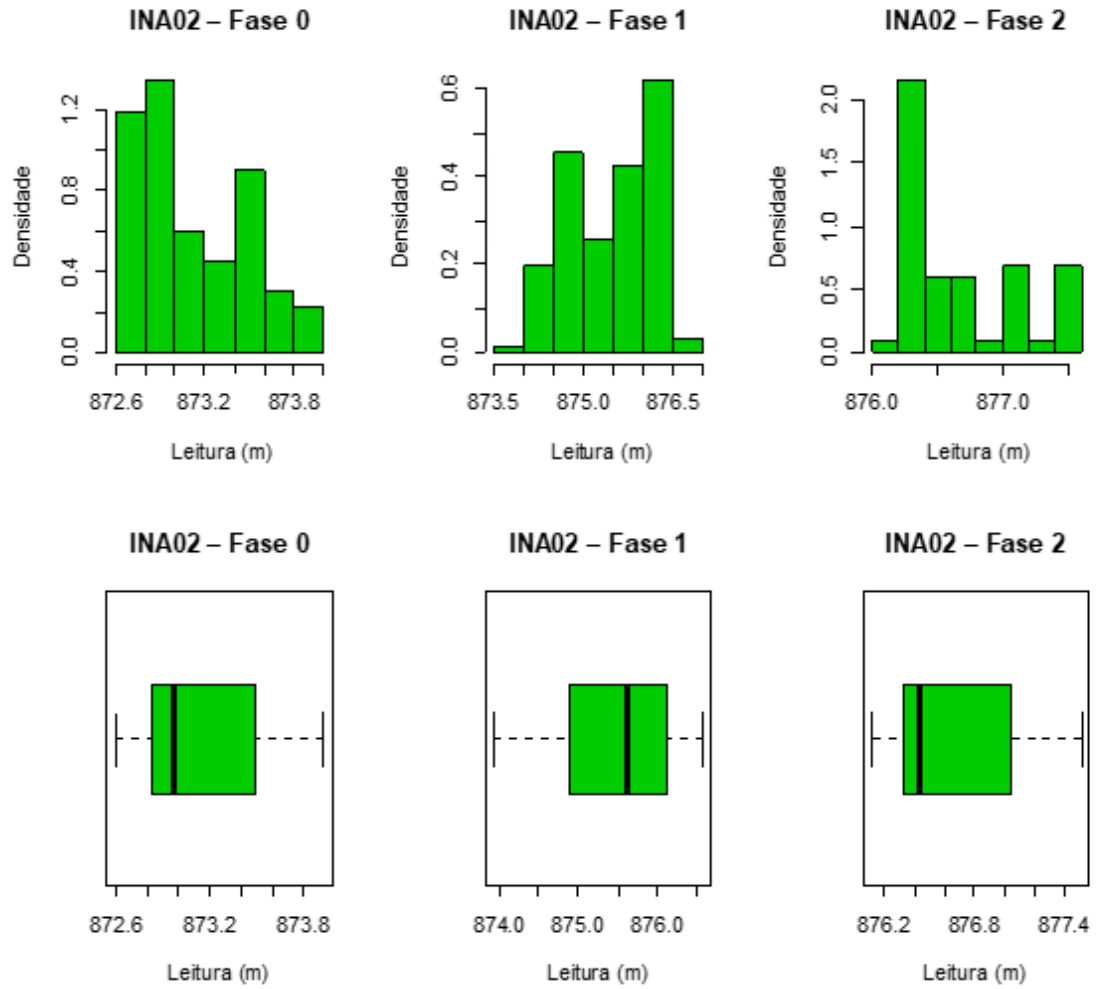


Figura 23 - Outliers das leituras do INA02 obtidos através do método boxplot

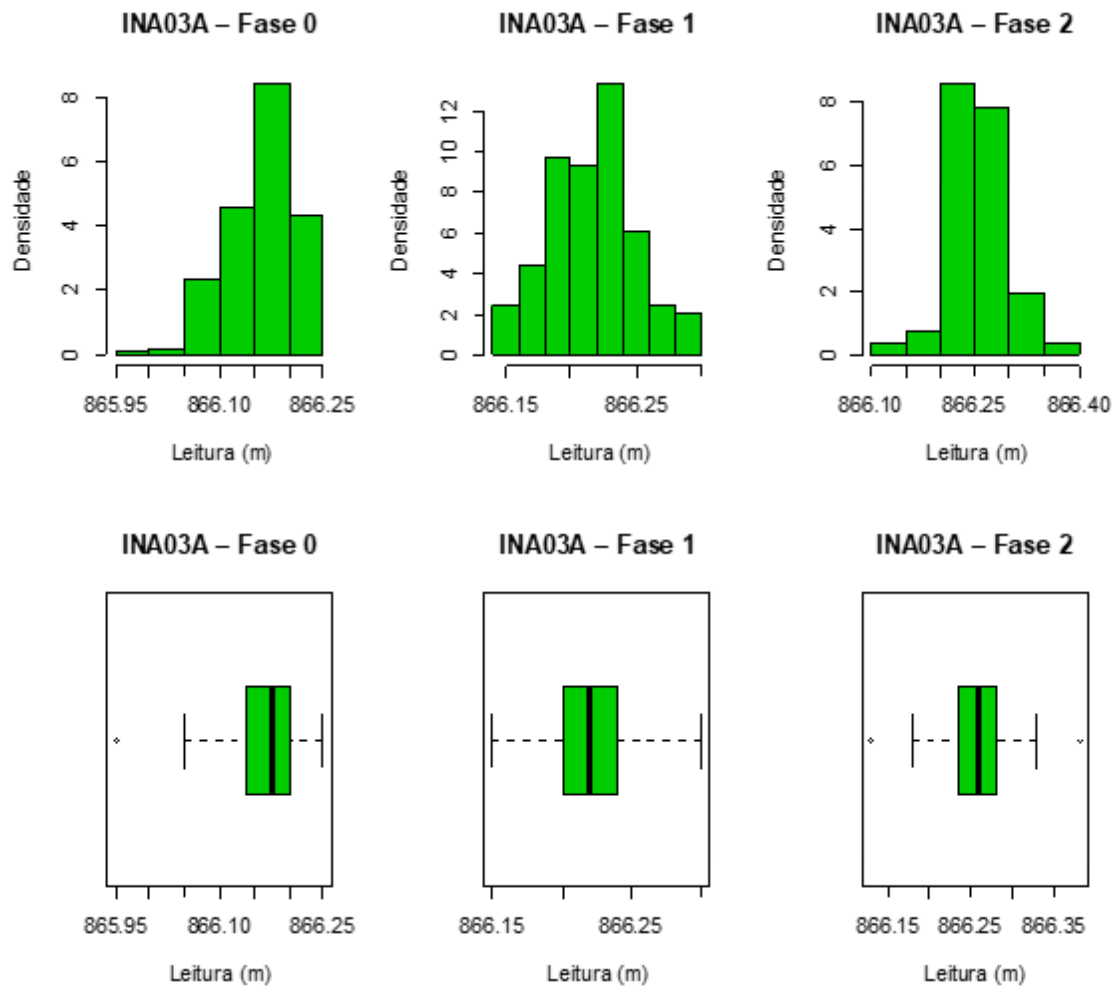


Figura 24 - Outliers das leituras do INA03A obtidos através do método boxplot

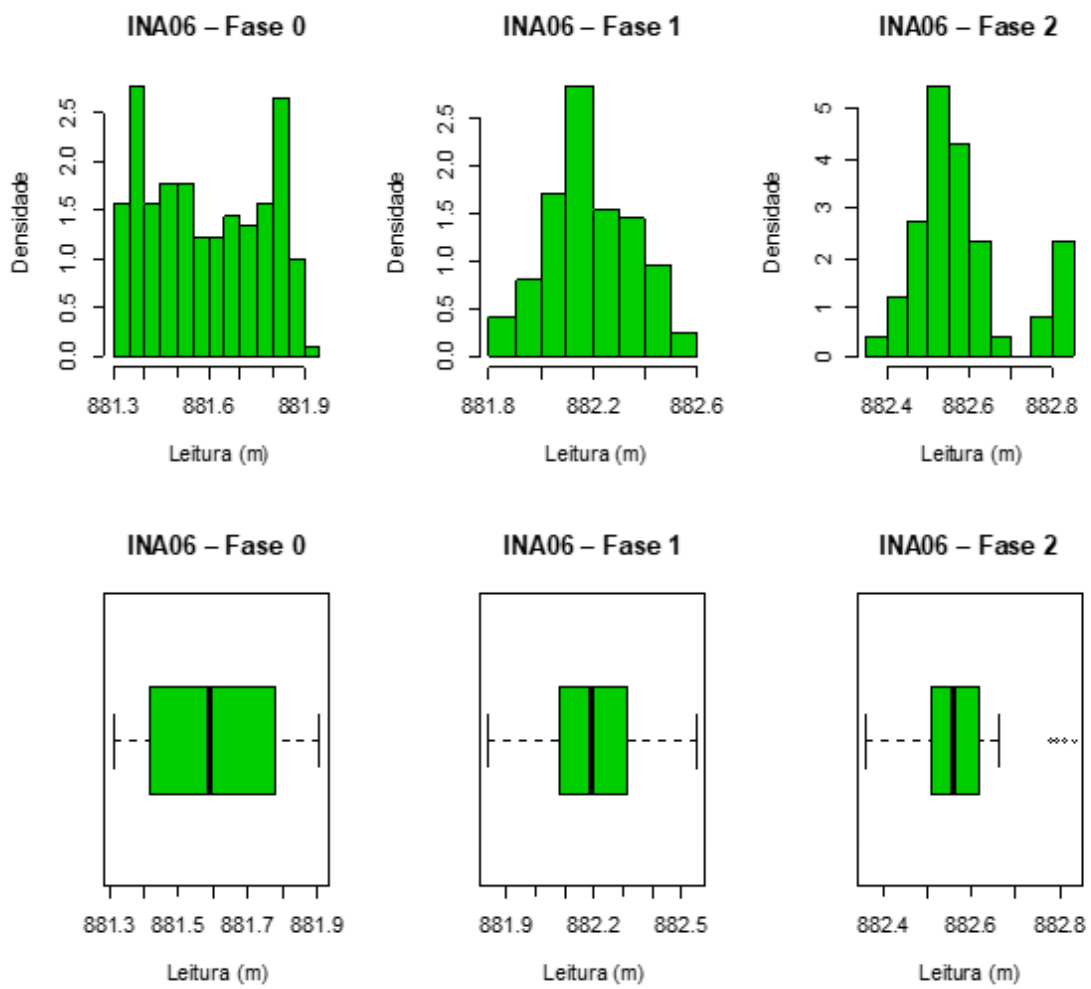


Figura 25 - Outliers das leituras do INA06 obtidos através do método boxplot

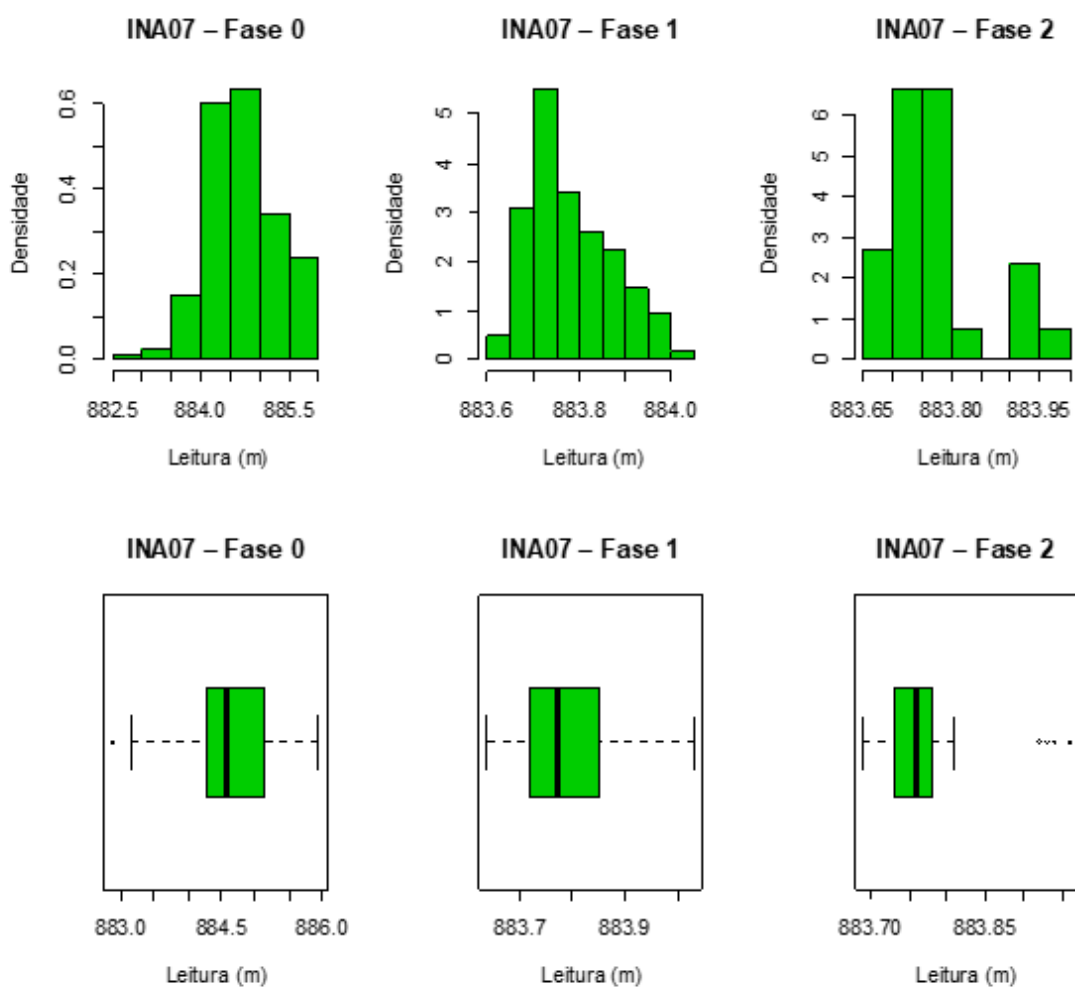


Figura 26 - Outliers das leituras do INA07 obtidos através do método boxplot

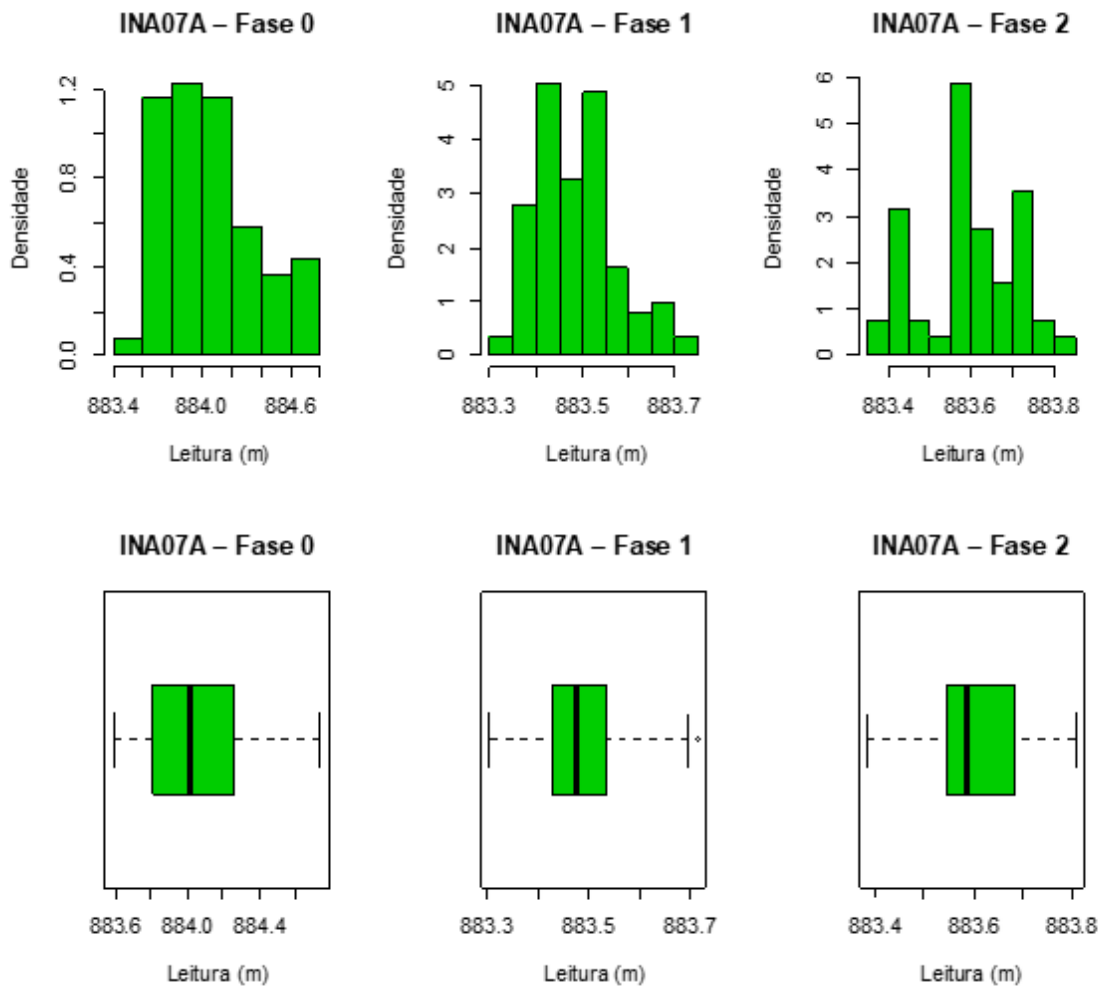


Figura 27 - Outliers das leituras do INA07A obtidos através do método boxplot

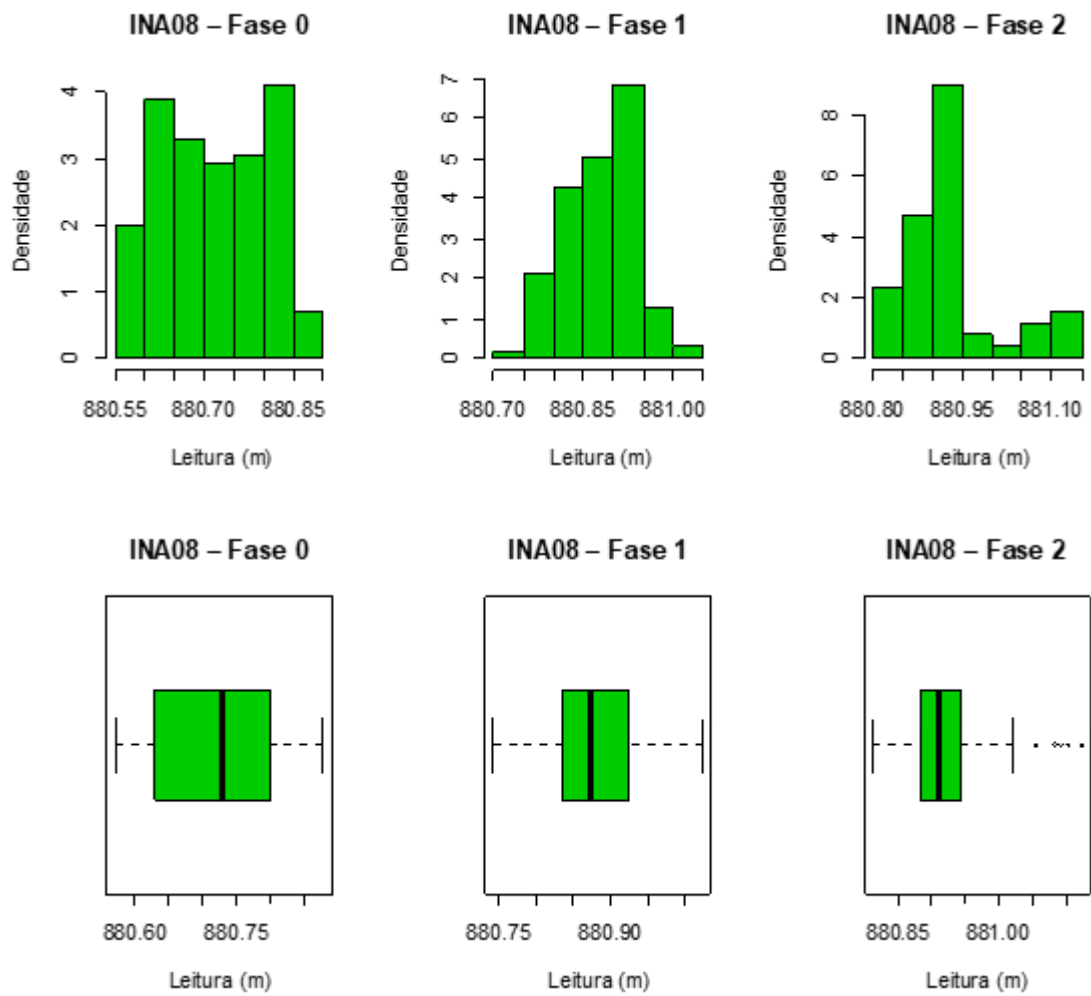


Figura 28 - Outliers das leituras do INA08 obtidos através do método boxplot

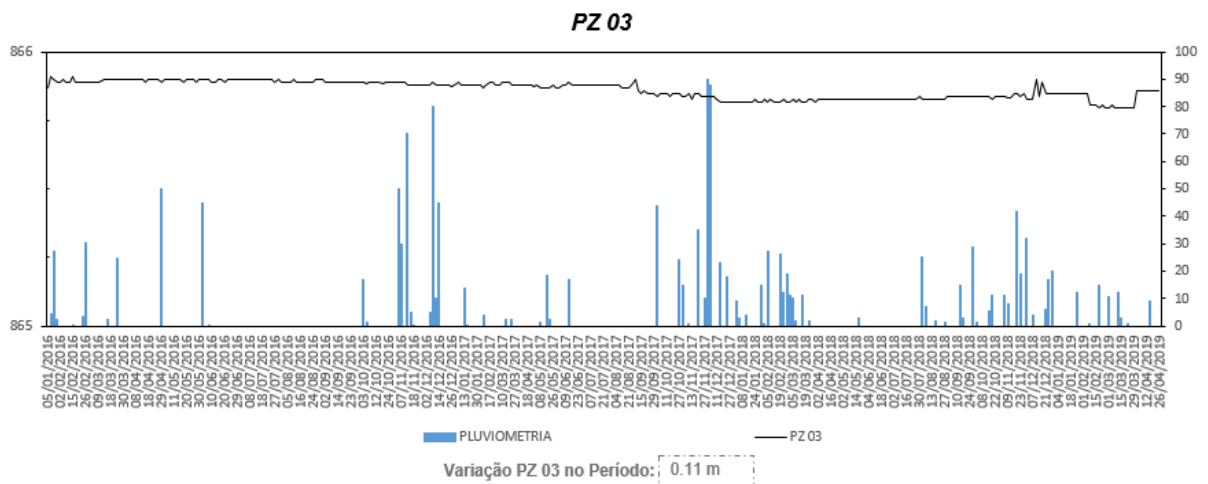


Figura 29 – Gráfico de leituras do PZ03 e pluviometria local nas fases 0 à 2

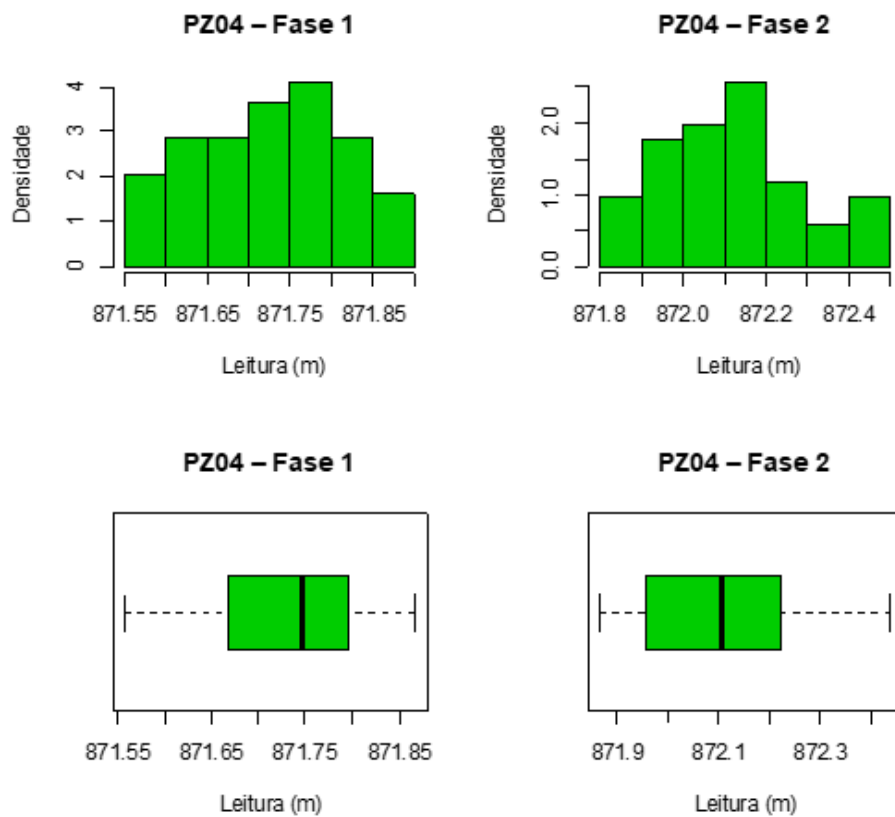


Figura 30 - Outliers das leituras do PZ04 obtidos através do método boxplot

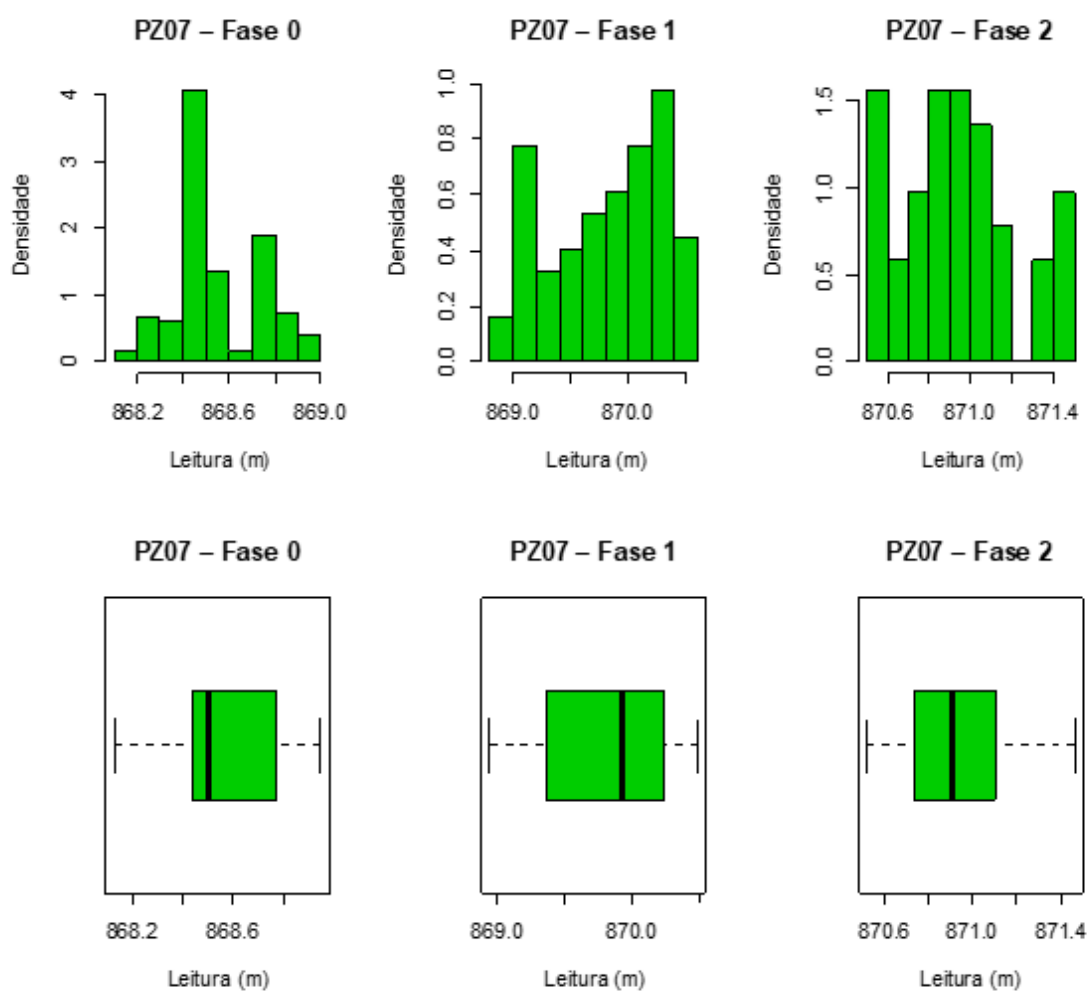


Figura 31 - Outliers das leituras do PZ07 obtidos através do método boxplot

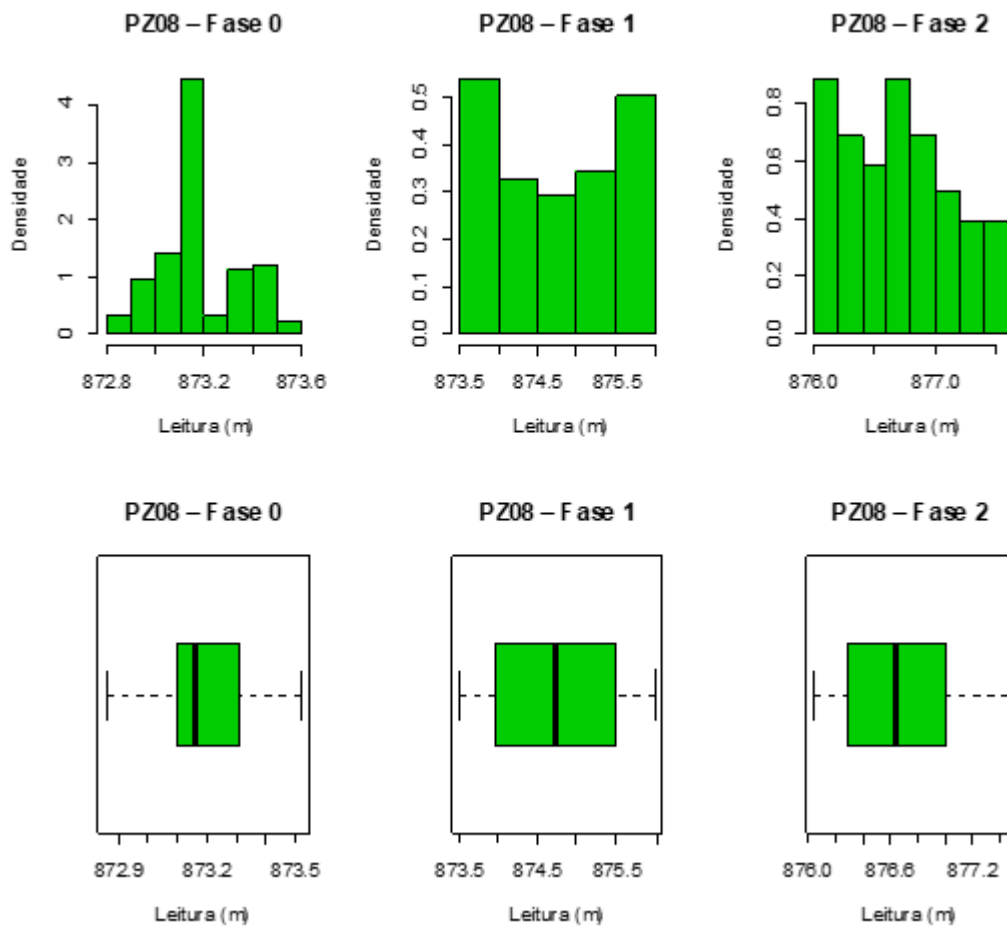


Figura 32 - Outliers das leituras do PZ08 obtidos através do método boxplot

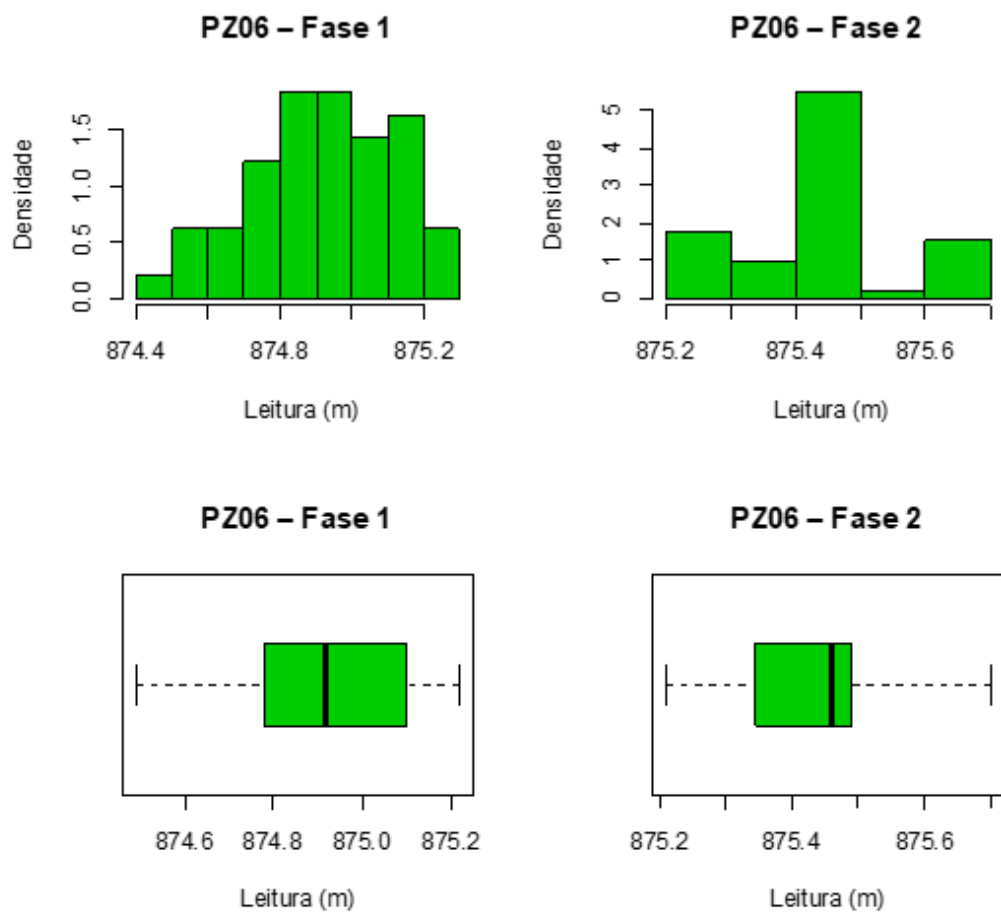


Figura 33 - Outliers das leituras do PZ06 obtidos através do método boxplot