

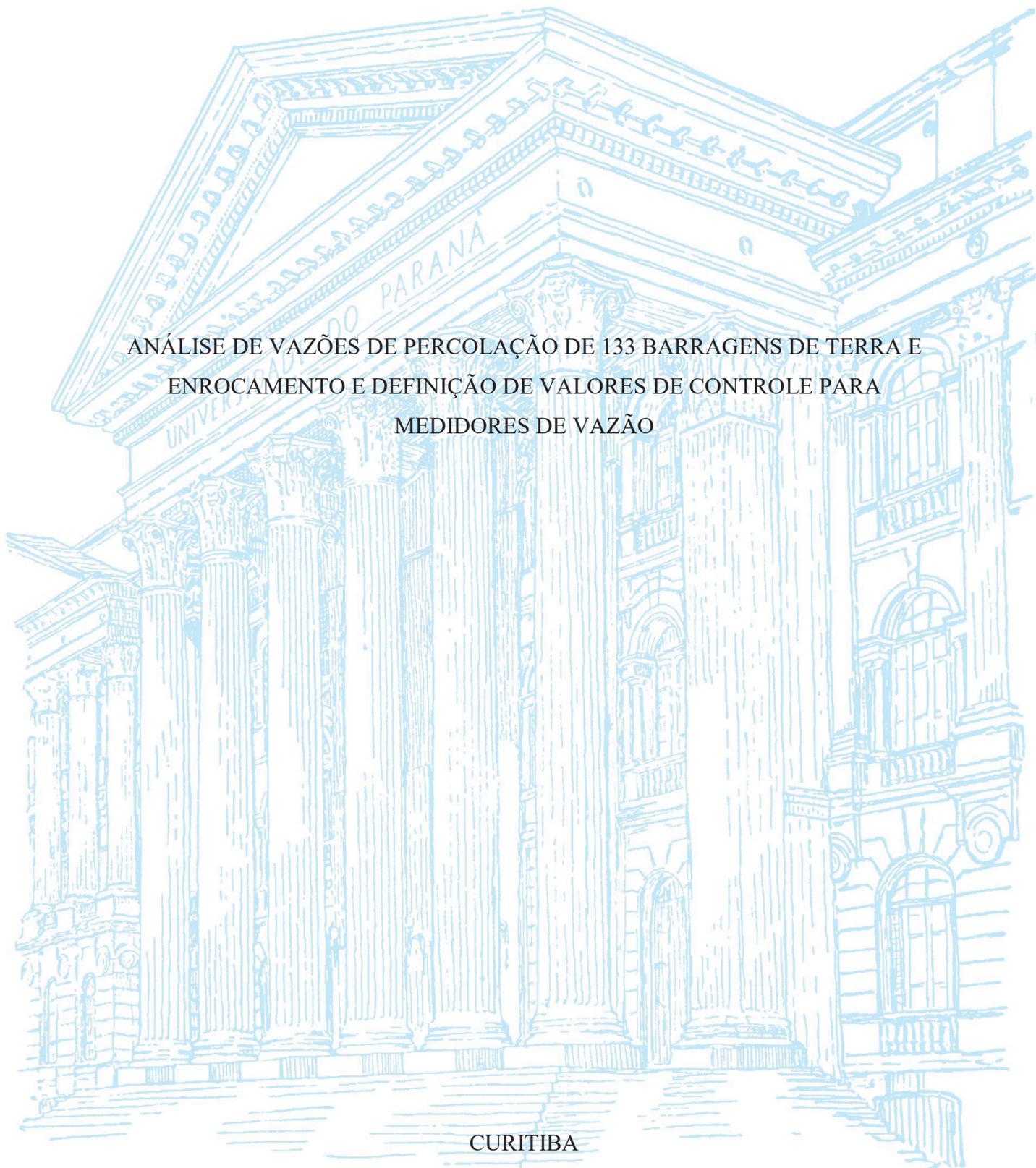
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO DE PAULA BARRETO

ANÁLISE DE VAZÕES DE PERCOLAÇÃO DE 133 BARRAGENS DE TERRA E
ENROCAMENTO E DEFINIÇÃO DE VALORES DE CONTROLE PARA
MEDIDORES DE VAZÃO

CURITIBA

2023



MARCELO DE PAULA BARRETO

ANÁLISE DE VAZÕES DE PERCOLAÇÃO DE 133 BARRAGENS DE TERRA E
ENROCAMENTO E DEFINIÇÃO DE VALORES DE CONTROLE PARA
MEDIDORES DE VAZÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Barreto, Marcelo de Paula

Análise de vazões de percolação de 133 barragens de terra e enrocamento e definição de valores de controle para medidores de vazão / Marcelo de Paula Barreto. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Sidnei Helder Cardoso Teixeira

1. Barragens de terra. 2. Medidores de fluxo. 3. Engenharia civil. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Teixeira, Sidnei Helder Cardoso. IV. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARCELO DE PAULA BARRETO** intitulada: **ANÁLISE DE VAZÕES DE PERCOLAÇÃO DE 133 BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO E DEFINIÇÃO DE VALORES DE CONTROLE PARA MEDIDORES DE VAZÃO**, sob orientação do Prof. Dr. SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Março de 2023.

Assinatura Eletrônica

28/04/2023 11:27:17.0

SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

06/06/2023 15:05:33.0

PAULO MÁRCIO FERNANDES VIANA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS)

Assinatura Eletrônica

04/05/2023 22:27:01.0

JOSÉ MARQUES FILHO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos professores Sidnei Helder Cardoso e Vitor Faro, por toda parceria e coleguismo em permitirem novos profissionais enriquecerem o acervo técnico do universo da geotecnia.

Aos colegas de profissão que com suas dicas assertivas permitiram a elevar este trabalho ao nível que foi apresentado, obrigado Alex Calcina, Soraia Bastos e Rafael Marques Cardoso.

A minha esposa e filhos, que de forma sempre imparcial, me incentivaram e entenderam minha ausência durante à realização deste trabalho.

A empresa de projetos Intertechne Consultores, por permitir a utilização dos dados, que sem os quais não seria possível realizar este trabalho.

RESUMO

No Brasil, medidas legais têm se intensificado dentro da preocupação de redução de acidentes em barragens por meio de gerenciamento e fiscalização de órgãos governamentais. Entretanto, resalta-se a importância de avaliação de danos e anomalias causados pelo rompimento de barragens. Considerando o cuidado a ser tomado em novos projetos, surge a importância de observar aspectos importantes com base em lições aprendidas. Para o caso de barragens, atualmente a engenharia geotécnica através de investidores, construtoras e empresas de projeto dispõe de um grande acervo de dados através de monitoramento de instrumentação geotécnica, valores importantes para verificação e validação de novos projetos. Fazer uso destes dados ajudam na interpretação do comportamento estático e dinâmico de uma estrutura geotécnica, além subsidiarem e permitirem o ajuste e calibração de modelos físicos e computacionais dentro do comportamento da infiltração através do maciço de barragens, ainda estes dados podem ser utilizados para dimensionar a geometria da drenagem interna, sendo um elemento crucial em barragens de terra e enrocamento. O problema se resume em observar que um projeto de uma barragem não é limitado somente à verificação da estabilidade de um aterro, de modo que o mesmo atenda aos fatores de segurança exigidos (CRUZ, 2004; ANA, 2019). O objetivo principal desta pesquisa é consolidar dados reais do histórico de monitoramento de auscultação de obras já executadas e em operação no Brasil, a fim de contribuir no âmbito de análise de instrumentação com valores de vazões reais observados em medidores de vazão, podendo ainda enriquecer dados atualmente existentes em bibliografias que auxiliam na sensibilidade dos valores de leituras de instrumentação a serem analisados. Os dados a que se pretende ter acesso serão selecionados no banco de dados de empresa projetista, sendo em geral relatórios de construção, e dados históricos de leitura de instrumentação relacionados ao monitoramento de barragens brasileiras. Os resultados esperados são dados consolidados reais de vazões específicas de infiltração em barragens de terra e enrocamento.

Palavras-chave: Barragem de terra e enrocamento. Instrumentação. Monitoramento. Medidor de Vazão. Vazão específica. Vazão total

ABSTRACT

In Brazil, legal measures have been intensified within the concern of reducing accidents in dams through management and inspection by government agencies. However, the importance of assessing the damage and anomalies caused by dam breakage is emphasized. Considering the care to be taken in new projects, the importance of observing important aspects based on lessons learned arises. In the case of dams, geotechnical engineering, through construction companies, investors and design companies, currently has a large collection of data through geotechnical instrumentation monitoring, important values for verification and validation of new projects. Making use of this data helps in the interpretation of the static and dynamic behavior of a geotechnical structure, in addition to supporting and allowing the adjustment and calibration of physical and computational models within the behavior of seepage through the dam mass. Furthermore, this data can be used to size the geometry of the internal drainage, a crucial element in earth and rock-fill dams. The problem comes down to observing that a dam design is not limited only to verifying the stability of an embankment so that it meets the required safety factors (CRUZ, 2004; ANA, 2019). The main objective of this research is to compile real data from the historical monitoring of auscultation of construction sites already executed and in operation in Brazil, in order to contribute in the scope of instrumentation analysis with real flow rate values observed in flow meters, and to enrich existing data in bibliographies that help in the sensitivity of the instrumentation reading values to be analyzed. The data to be accessed will be selected from the design company's database, usually construction reports and historical instrumentation reading data related to the monitoring of Brazilian dams. The expected results are actual consolidated data of specific seepage flows in earth and rockfill dams.

Keywords: Earth and rockfill dams. Instrumentation. Monitoring. Flow Meter. Specific Flow. Total Flows.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 - TIPOS DE BARRAGENS (MATERIAIS).....	24
FIGURA 2-2 - ESQUEMA DE UMA BARRAGEM DE TERRA.....	25
FIGURA 2-3 – BARRAGEM HOMOGÊNEA E DE TERRA E ENROCAMENTO.....	26
FIGURA 2-4 - INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE VAZIOS.....	29
FIGURA 2-5 - COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE (CONSTRIÇÕES).....	33
FIGURA 2-6 - EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE RUPTURA (PIPING)	37
FIGURA 2-7 - EROSÃO INTERNA DE UMA BARRAGEM.....	38
FIGURA 2-8 - ÍNICIO DE RUPTURA DA BARRAGEM FONTENELLE.....	39
FIGURA 2-9 - COLAPSO DA BARRAGEM FONTENELLE.....	39
FIGURA 2-10 - EROSÃO INTERNA COM FORMAÇÃO DE BRECHA	40
FIGURA 2-11 - GRANDEZAS A MONITORAR EM BARRAGENS DE ATERRO	42
FIGURA 2-12 – MEDIDOR DE VAZÃO (INVESTIGAÇÃO).....	43
FIGURA 2-13 - INSTRUMENTAÇÃO (SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA).....	47
FIGURA 2-14 - INSTRUMENTAÇÃO (SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA).....	48
FIGURA 2-15 - TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO.....	50
FIGURA 2-16 - MEDIDOR DE VAZÃO (PLANTA)	51
FIGURA 2-17 - MEDIDOR DE VAZÃO (PERFIL LONGITUDINAL).....	51
FIGURA 2-18 - MEDIDOR DE VAZÃO (CORTE E VISTA).....	52
FIGURA 2-19 - MEDIDOR DE VAZÃO COM MURETA EXTERNA	52
FIGURA 2-20 - MEDIDOR DE VAZÃO COM MURETA EXTERNA	52
FIGURA 2-21 - MEDIDOR DE VAZÃO COM MURETA EXTERNA	53
FIGURA 2-22 - ESQUEMA DO MEDIDOR TIPO TRIANGULAR	53
FIGURA 2-23 - MEDIDOR TRIANGULAR ABERTURA 90°	54
FIGURA 2-24 - LEITURA DA RÉGUA (THOMPSON).....	55
FIGURA 2-25 - MEDIDOR DE VAZÃO TRIANGULAR.....	56
FIGURA 2-26 - ESQUEMA MEDIDOR DE VAZÃO.....	56
FIGURA 2-27 - EXEMPLO DE TRECHOS DE CONTRIBUIÇÃO	57
FIGURA 2-28 - DIQUE INTERCEPTO EM BARRAGEM DE TERRA	58
FIGURA 2-29 - DIQUE INTERCEPTO (DETALHE).....	58
FIGURA 2-30 - MEDIDOR ÚNICO.....	59
FIGURA 2-31 - MEDIDOR ÚNICO (DETALHE).....	59
FIGURA 2-32 - MEDIDORES DIQUE INTERCEPTO CENTRAL	60

FIGURA 2-33 - MEDIDORES DIQUE INTERCEPTO CENTRAL (DETALHE)	60
FIGURA 2-34 - MEDIDORES LIMITADOS A ÁREA ALAGADA A JUSANTE.....	61
FIGURA 2-35 - SELO INTERCEPTO EM OMBREIRA (DETALHE)	61
FIGURA 2-36 - MEDIDOR LIMITADO A ÁREA ALAGADA A JUSANTE.....	62
FIGURA 2-37 - TUBULAÇÃO NA REGIÃO DE CAPTAÇÃO.....	62
FIGURA 2-38 - CARREAMENTO DE MATERIAL EM SUSPENSÃO.....	63
FIGURA 2-39 - CARREAMENTO DE MATERIAL SÓLIDO	64
FIGURA 2-40 - FENÔMENO SAND BOIL (AREIA MOVEDIÇA)	64
FIGURA 2-41 - PROGRESSÃO DA EROSÃO	65
FIGURA 2-42 - SURGÊNCIA NA BARRAGEM MORADA DOS LAGOS	67
FIGURA 2-43 - SURGÊNCIA EM BARRAGEM NA BAHIA	68
FIGURA 2-44 - DIQUE INTERCEPTO COM SACOS DE AREIA.....	69
FIGURA 2-45 - POÇO DE ALÍVIO DE FUNDAÇÃO.....	71
FIGURA 2-46 - POÇO DE ALÍVIO EM OPERAÇÃO.....	72
FIGURA 2-47 - INSTALAÇÃO DE POÇO DE ALÍVIO	73
FIGURA 2-48 - INSTALAÇÃO DE POÇO DE ALÍVIO EM TALUDE	73
FIGURA 2-49 - POÇO DE ALÍVIO COM MEDIDOR DE NÍVEL	74
FIGURA 2-50 - POÇO DE ALÍVIO EMBUTIDO	75
FIGURA 2-51 - POÇOS DE ALÍVIO PARA CONTROLE DA SAÍDA D'ÁGUA	76
FIGURA 2-52 - POÇOS DE ALÍVIO (CORTE A)	76
FIGURA 2-53 - FILTRO INVERTIDO	77
FIGURA 2-54 - FILTRO INVERTIDO (DETALHE)	78
FIGURA 2-55 - CARREAMENTO DE MATERIAL SÓLIDO	80
FIGURA 2-56 - SISTEMA DE ACUMULAÇÃO DE MATERIAIS SÓLIDOS.....	81
FIGURA 2-57 - PENEIRA DE CONTENÇÃO DE MATERIAIS SÓLIDOS	81
FIGURA 2-58 - INSTRUMENTOS NA OMBREIRA ESQUERDA.....	84
FIGURA 2-59 - VAZÕES BARRAGEM ÁGUA VERMELHA.....	84
FIGURA 2-60 - DIQUE DA CÂMARA DE CARGA DA UHE SANTA CLARA.....	85
FIGURA 2-61 - MEDIDOR DE VAZÃO DIQUE DA CÂMARA DE CARGA.....	85
FIGURA 2-62 - SEÇÃO DA BARRAGEM DE FONTENELLE.....	86
FIGURA 2-63 - MATERIAIS DE JUSANTE DE TETON E FONTENELLE	86
FIGURA 2-64 - VAZÃO <i>versus</i> NÍVEL DO RESERVATÓRIO.....	89
FIGURA 2-65 - VAZÃO <i>versus</i> TEMPO (RESERVATÓRIO).....	89
FIGURA 2-66 - VAZÃO EM FUNDAÇÃO HOMOGÊNEA	96

FIGURA 2-67 - RESULTADO DE ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO.....	97
FIGURA 3-1 - PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS E FONTES	109
FIGURA 3-2 - METODOLOGIA PARA ANÁLISES	110
FIGURA 3-3 - MAPA MENTAL DAS ANÁLISES	111
FIGURA 4-1 - CORRELAÇÃO PEARSON.....	133
FIGURA 4-2 - EVIDÊNCIA DE RELAÇÃO DO VALOR-P (PROBABILIDADE).....	138
FIGURA 4-3 - ETAPAS PARA REGRESSÃO LINEAR	139
FIGURA 4-4 - PROBABILIDADES E DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	143
FIGURA 4-5 - ESQUEMA DOS PERCENTIS	156
FIGURA 4-6 - VALORES DE CONTROLE E DE REFERÊNCIA	160

LISTA DE TABELAS

TABELA 1-1 - BARRAGENS EM ESTADO CRÍTICO POR TIPO DE ANOMALIA	18
TABELA 2-1 - RUPTURA DE BARRAGENS DE TERRA	19
TABELA 2-2 - PERMEABILIDADE E DRENAGEM DOS SOLOS	28
TABELA 2-3 - PERMEABILIDADES (CONDUTIVIDADES HIDRÁULICAS)	29
TABELA 2-4 - ESTIMATIVA DOS DC'S DE CONTROLE DE FILTRAÇÃO.....	34
TABELA 2-5 - SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO.....	35
TABELA 2-6 – GRANDEZAS A MONITORAR EM BARRAGENS DE ATERRO.....	43
TABELA 2-7 - QUANTIDADE DE INSTRUMENTOS EM BARRAGENS	44
TABELA 2-8 – ALTURA DA BARRAGEM <i>versus</i> NÚMERO DE INSTRUMENTOS	45
TABELA 2-9 –ESTIMATIVA DE QUANTIDADE DE INSTRUMENTOS	45
TABELA 2-10 - CAPACIDADE E FAIXA RECOMENDADA DE MEDIÇÕES.....	50
TABELA 2-11 - GEOLOGIA E GEOMETRIA DE BARRAGENS BRASILEIRAS	66
TABELA 2-12 - VAZÕES OBSERVADAS EM BARRAGENS BRASILEIRAS.....	67
TABELA 2-13- REGISTRO DE VAZÕES ANTES DOS INCIDENTES	87
TABELA 2-14 - AUMENTO SÚBITO DE VAZÃO NA BARRAGEM DE SONGA.....	88
TABELA 2-15 - VAZÕES DE PROJETO <i>versus</i> VAZÕES MEDIDAS.....	90
TABELA 2-16 - FREQUÊNCIA MÍNIMAS DE LEITURAS	91
TABELA 2-17 - EXEMPLO DE TABELA DE VALORES DE CONTROLE.....	94
TABELA 2-18 - EXEMPLO DE TABELA DE VALOR DE REFERÊNCIA.....	94
TABELA 2-19 - ESTIMATIVA DE VALORES DE CONTROLE	95
TABELA 2-20 - RELATÓRIOS DE ANÁLISE DA INSTRUMENTAÇÃO	95
TABELA 2-21 - VAZÕES OBSERVADAS EM BARRAGENS BRASILEIRAS.....	99
TABELA 2-22 - GEOLOGIA DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS DE TERRA.....	100
TABELA 3-1 - FORMATOS DOS ARQUIVOS.....	108
TABELA 4-1 - VAZÕES TOTAIS E VAZÕES ESPECÍFICAS OBSERVADAS	112
TABELA 4-2 - PERMEABILIDADES DO NÚCLEO COMPACTADO.....	118
TABELA 4-3 - PERMEABILIDADES DA FUNDAÇÃO.....	124
TABELA 4-4 - VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA POR TIPO DE ROCHA DE ORIGEM ...	128
TABELA 4-5 - FAIXAS DE VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA.....	128
TABELA 4-6 - VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA POR ORIGEM DA ROCHA	129
TABELA 4-7 - VAZÃO MEDIDAS <i>versus</i> VAZÕES DE CONTROLE	129
TABELA 4-8 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA (VAZÃO ESPECÍFICA).....	132

TABELA 4-9 - CORRELAÇÃO R (PEARSON) – VAZÃO ESPECÍFICA	133
TABELA 4-10 - ESPERANÇA MATEMÁTICA (ÍGNEAS PLUTÔNICAS)	134
TABELA 4-11 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA (ÍGNEAS PLUTÔNICAS).....	134
TABELA 4-12 - ESPERANÇA MATEMÁTICA (ÍGNEAS VULCÂNICAS).....	135
TABELA 4-13 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA (ÍGNEAS VULCÂNICAS).....	135
TABELA 4-14 - ESPERANÇA MATEMÁTICA (METAMÓRFICAS)	136
TABELA 4-15 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA (METAMÓRFICAS).....	136
TABELA 4-16 - ESPERANÇA MATEMÁTICA (SEDIMENTARES CLÁSTICAS).....	137
TABELA 4-17- ESTATÍSTICA DESCRITIVA (SEDIMENTARES CLÁSTICAS)	137
TABELA 4-18 - MODELO 1 - REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA (F<0,05) (P<0,05) ...	140
TABELA 4-19 - VARIÁVEIS ESCOLHIDAS PARA FORMULAÇÃO	141
TABELA 4-20 - ORIGEM ROCHA (MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO)	143
TABELA 4-21 - QUANTÍS E FUNÇÃO (ÍGNEAS PLUTÔNICAS)	144
TABELA 4-22 - CÁLCULO PICTORIAL (ÍGNEAS PLUTÔNICAS).....	145
TABELA 4-23 - QUANTÍS E FUNÇÃO (ÍGNEAS VULCÂNICAS).....	146
TABELA 4-24 - CÁLCULO PICTORIAL (ÍGNEAS VULCÂNICAS)	147
TABELA 4-25 - QUANTÍS E FUNÇÃO (METAMÓRFICAS)	148
TABELA 4-26 - CÁLCULO PICTORIAL (METAMÓRFICAS).....	149
TABELA 4-27 - QUANTÍS E FUNÇÃO (SEDIMENTARES CLÁSTICAS).....	150
TABELA 4-28 - CÁLCULO PICTORIAL – SEDIMENTARES CLÁSTICAS	151
TABELA 4-29 - HISTOGRAMA E FREQUENCIA (VAZÃO ESPECÍFICA).....	152
TABELA 4-30 - ESTIMATIVA DE VALORES DE CONTROLE	153
TABELA 4-31 - MAIOR VALOR OBSERVADO.....	154
TABELA 4-32 - VALOR DE REFERÊNCIA POR TIPO DE FUNDAÇÃO	154
TABELA 4-33 – VALORES DE CONTROLE (PERCENTIS)	157
TABELA 4-34 - RESULTADOS (ESTATÍSTICA DESCRITIVA)	158
TABELA 4-35 - RESULTADOS	159

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1-1 – NÚMERO DE BARRAGENS BRASILEIRAS CRÍTICAS.....	18
GRÁFICO 1-2 - ESTATÍSTICA DE RUPTURAS DE BARRAGENS DE TERRA.....	19
GRÁFICO 1-3 - OFERTA INTERNA DE ENERGIA NO BRASIL (2014).....	22
GRÁFICO 2-1 - BARRAGENS INSTRUMENTADAS NO BRASIL ATÉ 1995.....	41
GRÁFICO 2-2 - SURGÊNCIA EM BARRAGEM NA BAHIA	68
GRÁFICO 2-3 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> ALTURA MÁXIMA	101
GRÁFICO 2-4 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> ALTURA MÁXIMA	102
GRÁFICO 4-1 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> ALTURA MÁXIMA DA BARRAGEM...	116
GRÁFICO 4-2 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> ALTURA MÁXIMA RESERVATÓRIO..	117
GRÁFICO 4-3 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> COMPRIMENTO TOTAL	117
GRÁFICO 4-4 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> VAZÃO TOTAL.....	118
GRÁFICO 4-5 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> ANO DE INÍCIO DE OPERAÇÃO	122
GRÁFICO 4-6 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> ANO DE INÍCIO DE OPERAÇÃO	123
GRÁFICO 4-7 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> PERMEABILIDADE DO ATERRO.....	123
GRÁFICO 4-8 - VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> PERMEABILIDADE DA FUNDAÇÃO ..	127
GRÁFICO 4-9 - VAZÃO MEDIDAS <i>versus</i> VAZÕES DE CONTROLE	131
GRÁFICO 4-10 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL (ÍGNEAS PLUTÔNICAS)	144
GRÁFICO 4-11 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO (ÍGNEAS PLUTÔNICAS).....	145
GRÁFICO 4-12 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL (ÍGNEAS VULCÂNICAS).....	146
GRÁFICO 4-13 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO (ÍGNEAS VULCÂNICAS).....	147
GRÁFICO 4-14 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL (METAMÓRFICAS)	148
GRÁFICO 4-15 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO (METAMÓRFICAS)	149
GRÁFICO 4-16 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL (SEDIMENTARES CLÁSTICAS).....	150
GRÁFICO 4-17 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO (SEDIMENTARES CLÁSTICAS).....	151
GRÁFICO 4-18 - HISTOGRAMA E FREQUENCIA (VAZÃO ESPECÍFICA).....	152
GRÁFICO 4-19 – EVOLUÇÃO ESTATÍSTICA DAS VAZÕES	156
GRÁFICO 4-20 – VALORES DE CONTROLE (PERCENTIS).....	157
GRÁFICO 4-21 – RESULTADOS.....	159

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.1.1 Justificativa ambiental	20
1.1.2 Justificativa tecnológica.....	21
1.1.3 Justificativa social.....	21
1.1.4 Justificativa econômica.....	22
1.1.5 Objetivo geral.....	23
1.1.6 Objetivos específicos	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 REFERENCIAL TEÓRICO DE BARRAGENS.....	24
2.1.1 Barragens	24
2.1.2 Aspectos geológicos.....	26
2.1.3 Fluxo de água.....	27
2.1.4 Percolação de água.....	30
2.1.5 Retenção de partículas	31
2.1.6 Instabilidade interna.....	32
2.1.7 Distribuição das constrições	32
2.1.8 Sistemas de drenagem interna.....	34
2.1.9 Erosão interna	36
2.1.10 Instrumentação.....	40
2.1.11 Medidores de vazão	49
2.1.12 Medidor de vazão triangular	51
2.1.13 Dique intercepto.....	57
2.1.14 Surgências de água.....	63
2.1.15 Poços de observação	70
2.1.16 Poços de alívio	70
2.1.17 Filtro invertido	77
2.1.18 Carreamento de materiais	78
2.1.19 Análise de comportamento	82
2.1.20 Aumento súbitos de vazão	85
2.1.21 Variação do reservatório	88
2.1.22 Vazões teórica.....	90

2.1.23	Frequência de leituras	91
2.1.24	Valores de referência	92
2.1.25	Cálculo teórico	96
2.1.26	Modelagem numérica.....	97
2.1.27	Vazão específica	98
2.2	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	103
2.2.1	Estatística Descritiva.....	103
2.2.2	Correlação R (Pearson)	103
2.2.3	Esperança Matemática	104
2.2.4	Regressão Linear Múltipla.....	104
2.2.5	Distribuição Normal (Gaussiana)	104
2.2.6	Histograma.....	104
3	MÉTODOS E MATERIAIS	106
3.1	MÉTODOS	106
3.1.1	Análise de dados	106
3.1.2	Delimitação do trabalho.....	107
3.2	MATERIAIS.....	108
3.2.1	Protocolo de dados.....	108
3.2.2	Vazões observadas.....	109
4	VAZÕES REAIS OBSERVADAS EM BARRAGENS BRASILEIRAS.....	112
4.1	VAZÕES TOTAIS E VAZÕES ESPECÍFICAS OBSERVADAS	112
4.2	VAZÃO ESPECÍFICA <i>versus</i> PERMEABILIDADE DO NÚCLEO.....	118
4.3	VAZÕES MEDIDAS <i>versus</i> PERMEABILIDADE DA FUNDAÇÃO	124
4.4	VAZÕES MEDIDAS <i>versus</i> VAZÕES DE CONTROLE.....	129
4.5	ANÁLISES PROBABILÍSTICAS	131
4.5.1	Estatística Descritiva.....	132
4.5.2	Correlação R (Pearson)	132
4.5.3	Esperança Matemática	133
4.5.3.1	Rochas Ígneas Plutônicas	134
4.5.3.2	Rochas Ígneas Vulcânicas	135
4.5.3.3	Rochas Metamórficas	136
4.5.3.4	Rochas Sedimentares Clásticas.....	137
4.5.4	Regressão Linear Múltipla.....	138
4.5.4.1	Modelo 1 (<i>133 Barragens Brasileiras</i>).....	140

4.5.4.2 Modelo 2 (133 Barragens Brasileiras).....	141
4.5.5 Distribuição Normal (<i>Gaussiana</i>).....	143
4.5.5.1 Rochas Ígneas Plutônicas	144
4.5.5.2 Rochas Ígneas Vulcânicas	146
4.5.5.3 Rochas Metamórficas	148
4.5.5.4 Rochas Sedimentares Clásticas.....	150
4.5.6 Histograma.....	152
4.6 VALORES DE CONTROLE	153
4.6.1 Valores de controle (<i>Referência Bibliográfica</i>).....	153
4.6.2 Valores de controle (<i>Valor esperado</i>).....	154
4.6.3 Valores de controle (<i>Percentis</i>)	155
4.6.4 Valores de controle (<i>Histórico de Leituras</i>)	158
4.7 RESUMO DOS RESULTADOS.....	158
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	161
5.1 CONCLUSÕES	161
5.1.1 Vazões analisadas	161
5.1.2 Análises Estatísticas.....	162
5.1.3 Valores de Controle	164
5.2 SUGESTÕES.....	165
REFERÊNCIAS.....	167
ANEXOS.....	180

1 INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas que beneficiam a humanidade há centenas de anos com inúmeras aplicações, tais como: controle de enchentes, abastecimento comunitário e empreendimento, amenização de secas e estiagens, engenharia de irrigação, transposição de navegação, contenção de rejeitos e geração de energia (ICOLD, 2017; ANA, 2019).

Assim as barragens do tipo de terra e enrocamento no Brasil, apontam no ranking de construção como 82% do total (SAYÃO, 2009). De modo que a barragem de terra é a mais comum em nosso país, com maior disponibilidade de jazidas de solo, além de ser indicada para vários tipos de fundação (MENDONÇA, 2012).

Onde de acordo com estimativas propostas pela ANA-*Agência Nacional de Águas* em 2019, 70% da eletricidade do Brasil é gerada por usinas hidrelétricas (ANA, 2019). No entanto, as barragens necessitam condições de segurança suficientes para suportar os eventos que podem ocorrer durante toda a sua operação (ANA, 2016). Entretanto a segurança de uma barragem tem sido uma preocupação permanente para as entidades governamentais, tanto por causa de sua importância econômica específica quanto pelo risco potencial que representa (ELETROBRÁS, 2003).

De modo que somente no Brasil, dois grandes acidentes envolvendo barragens ocorreram nos últimos seis anos e o primeiro destes acidentes foi o colapso da barragem do Fundão, que ocorreu em 2015. Esta barragem tinha a função de armazenar rejeitos de mineração e foi construída pela metodologia de alteamento a montante, método que foi proibido pelo poder público e judiciário e não pode mais ser utilizada em novos projetos. Semelhantemente o segundo acidente ocorreu em 2019 em uma barragem para retenção de rejeitos pertencentes a empresa privada Vale, localizada no município de Brumadinho - MG.

A garantia da qualidade dos materiais de uma barragem é fundamental para assegurar um bom desempenho desta estrutura, em relação a sua estabilidade e boa funcionalidade do gradiente hidráulico. De modo que esta pesquisa tem o intuito de consolidar compilação de dados das medições de *vazões específicas* reais observadas em barragens já construídas e em operação, trazendo resultados importantes para verificação e elaborações de novos projetos de barragens, bem como a análise de instrumentação geotécnica para monitoramento de vazões de drenagem, comparando com valores já consolidados atualmente em referências bibliográficas de suporte e pesquisa.

Logo a escolha de reunir dados reais de *vazões específicas* em barragens brasileiras, resulta em um trabalho de consolidação de informações que auxiliará no acompanhamento do comportamento de barragens de terra e enrocamento e análise periódicas de instrumentação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Para o dimensionamento de uma barragem existem inúmeros critérios e cuidados que necessitam ser observados, registrados e acompanhados. Portanto, o projeto de uma barragem não é limitado somente à verificação da estabilidade de um aterro (CRUZ, 2004; ANA, 2019). De modo que o sistema de drenagem interna contribui para a estabilidade da barragem de terra. Um sistema de drenagem eficaz reduz o risco de acidentes. Massad (2003) apontou que a maioria dos acidentes envolvendo barragens de terra são causados pela falta de um sistema de controle de fluxo eficaz.

Somando os tipos de estruturas, barragem do tipo (*homogênea*) e barragem de terra e enrocamento (*mista*), a principal causa de incidentes é o transbordamento da barragem mediante à capacidade insuficiente das estruturas extravasoras, seguida do evento de erosão interna do corpo da barragem, conhecida como *piping* (ANA, 2019).

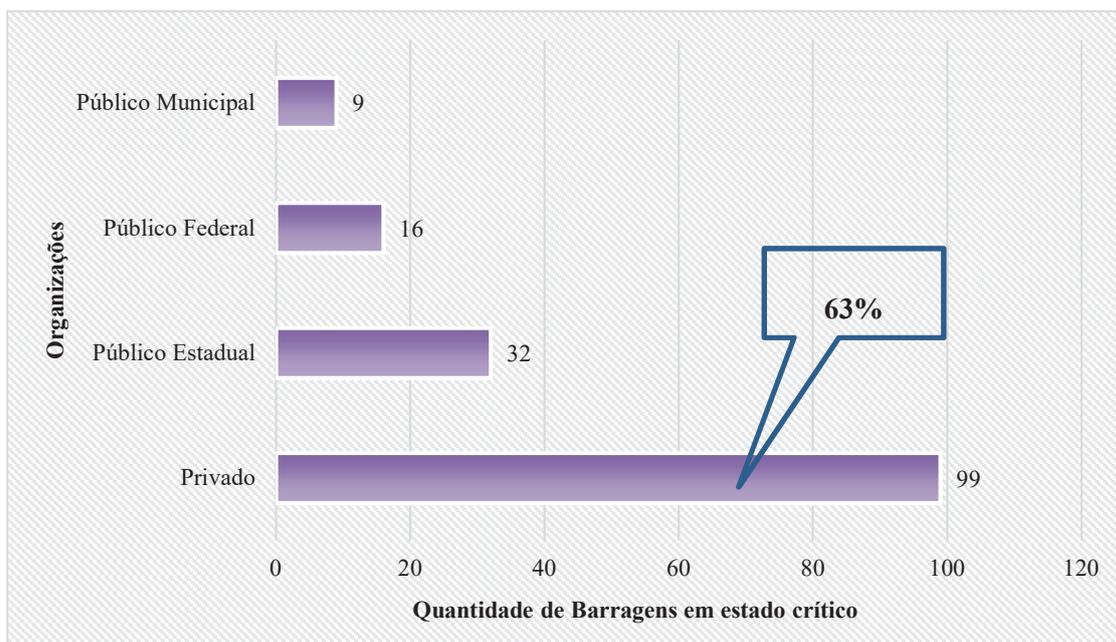
De acordo com os dados divulgados no relatório de segurança de barragens publicado em 2018, elaborado pelo Serviço Nacional de Água, a ruptura de barragens geralmente ocorre nos primeiros dez anos de operação.

Com o intuito conscientizar em relação probabilidade de ruptura em barragens, foi promulgada a lei federal 12.334 a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), em 20 de setembro de 2010, substituindo o texto publicado no DOU (Diário Oficial da União) de 21.9.2010, onde o não cumprimento das disposições desta lei resultará na punição do infrator pelas leis e regulamentos pertinentes.

No entanto, apesar dos esforços do governo para melhorar a segurança das barragens no Brasil, o país tem tido inúmeras ocorrências anuais de incidentes, baseado em ocorrências destacadas no relatório de segurança de barragens (RSB) que apontam um número de 156 barragens consideradas em estado crítico, distribuídas em 22 estados brasileiros onde também através das inspeções de campo constatou-se que 63% destas barragens são pertencentes a empresas privadas.

A seguir apresentado no GRÁFICO 1-1 a distribuição das barragens em estado crítico separando-as pelo número de barragens por organizações, seguido do registro das ocorrências por classificação.

GRÁFICO 1-1 – NÚMERO DE BARRAGENS BRASILEIRAS CRÍTICAS



FONTE: adaptado de ANA (2019).

A seguir apresentado na TABELA 1-1 o percentual separado por tipo de anomalia das 156 barragens consideradas em estado crítico.

TABELA 1-1 - BARRAGENS EM ESTADO CRÍTICO POR TIPO DE ANOMALIA

Anomalia	(%)
Dano potencial associado	1%
Características de Projeto	2%
Nível de Alerta	24%
Estado de Conservação	73%

FONTE: adaptado de ANA (2019).

De modo que em 2019, foram registrados 12 acidentes e 58 incidentes em barragens de 15 estados brasileiros diferentes, sendo este um registro superior comparado com o relatório do ano anterior.

Um mês após o acidente da barragem de Brumadinho em Minas Gerais, foi sancionada a Lei Estadual nº 23.291 / 2019, que determinou que o empresário responsável pela construção das barragens de rejeitos com métodos de elevação a montante desativa-se suas estruturas em um prazo de três anos, bem como fica proibido construção de novas barragens com este método. A barragem I da mina Córrego do Feijão em Brumadinho-MG, que causou o número de 270 mortos, sem contar com abrangência de impacto social, econômica e ambiental (FREITAS e ALMEIDA, 2020).

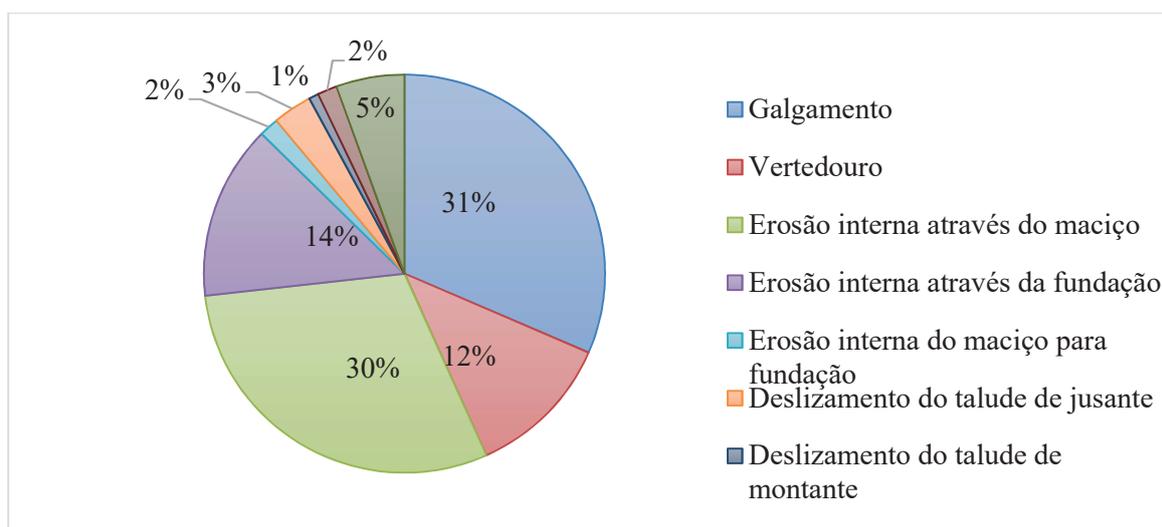
TABELA 1-2 - RUPTURA DE BARRAGENS DE TERRA

Modo de Ruptura	Nº de Casos		% de Rupturas	
	Todas as Rupturas	Rupturas em Operação	Todas as Rupturas	Rupturas em Operação
Galgamento	46	40	35,9	34,2
Vertedouro	16	15	12,5	12,8
Erosão interna através do maciço	39	38	30,5	32,5
Erosão interna através da fundação	19	18	14,8	15,4
Erosão interna do maciço para fundação	2	2	1,6	1,7
Deslizamento do talude de jusante	6	4	4,7	3,4
Deslizamento do talude de montante	1	1	0,8	0,9
Terremoto / Liquefação	2	2	1,6	1,7
Modo desconhecido	8	7		
Total de Rupturas	139	127		

FONTE: Adaptado de ICOLD (2017).

É apresentada no GRÁFICO 1-2 a estatística geral de rupturas de barragens de terra, por modo de ruptura, sendo em destaque as por galgamento e descreve de acordo com ICOLD (2017) que a primeira condição para a erosão interna ocorrer é o desprendimento de partículas. Desta forma os sistemas de drenagem interna são reconhecidos como as estruturas responsáveis por controlar e direcionar o fluxo de percolação de água da barragem e fundação (CRUZ, 1996).

GRÁFICO 1-2 - ESTATÍSTICA DE RUPTURAS DE BARRAGENS DE TERRA



FONTE: Adaptado de ICOLD (2017).

1.1.1 Justificativa ambiental

Importante destacar o desenvolvimento de projetos considerando as restrições ambientais para construir barragens, objetivando o menor impacto possível na área de implantação (ANA, 2020).

Entretanto, é essencial que as estruturas sejam seguras e bem conservadas de modo que possam derivar os benefícios esperados sem prejudicar a vida, a economia e o meio ambiente, principalmente em áreas povoadas (ANA, 2020).

Referente aos danos potenciais em função da probabilidade de acidentes, caso haja uma ocorrência catastrófica, as consequências podem envolver a perda de vidas, impactos severos ambientais e impactos socioeconômicos, resultando em anomalias irreparáveis. Além disso, independentemente do tamanho das estruturas, as barragens somadas aos seus respectivos reservatórios estão potencialmente sob risco de algum incidente ou acidente, o que pode causar danos à população, ao meio ambiente e à economia. Esse dano pode ser ainda maior quando várias represas são atingidas por efeito em cascata (ANA, 2020).

De modo que é necessário que a sociedade conheça a importância de uma barragem e reservatórios, pois tem impacto direto as comunidades do entorno. Onde estas estruturas auxiliam não só na geração energética mais também apoiam a capacidade de abastecimento local, auxiliam na contenção de cheias, evitando grandes inundações, e o espelho de água utilizados como opção de navegação e áreas de lazer. O desenvolvimento econômico induz a percepções que preveem a competição da agricultura, indústria e água humana, se tornando estas áreas cada vez mais disputadas (BRK, 2020).

Desta forma à competição irá aumentar cada vez mais entre os três principais usuários de água em termos globais que são a agricultura (67%), indústria (19%) e uso municipal/residencial (9%), sendo um processo contínuo recorrendo cada vez mais a necessidade de água (CBM, 2020).

Contudo, em regiões com climas áridos, um importante fator de consumo é a evaporação do reservatório, estimada em cerca de 5% da retirada total de água. As previsões da *Vision for Water and Food* indicam que até 2025, a irrigação por si só pode ocasionar um aumento no abastecimento de água de 15% a 20%. Em 2025, 3,5 bilhões de pessoas poderão viver em meio a países com escassez de água (CBM, 2020).

Para tanto, há ocorrências de redução de abastecimento de água relacionadas diretamente às práticas agrícolas atuais e ao crescimento populacional, resultando na falha de países no compromisso em atingir a meta de autossuficiência alimentar, reduzindo a segurança no desenvolvimento de alimentos e outros recursos ambientais (CBM, 2020).

1.1.2 Justificativa tecnológica

Com o avanço tecnológico computacional tem ficado cada vez mais fácil efetuar o processamento de dados de instrumentação, bem como o aumento da capacidade de armazenamento de informações em grandes servidores e nuvens digitais, podendo ainda simultaneamente com a programação de rotinas, acelerar resultados demonstrando o comportamento e a indicação de indícios de riscos potenciais de uma barragem (MACHADO, 2007).

De modo que é importante a manutenção da instrumentação, bem como sempre reavaliar sua evolução referente ao avanço tecnológico. Desta forma com a evolução tecnológica vem a proposta de novos desenvolvimentos, uma delas é a auscultação por meio de fibra ótica, sendo um passo importante na velocidade de obtenção de dados, sem contar que são instrumentos mais portáteis, sem condutividade com risco de queimas elétricas e que é um problema em piezômetros elétricos e pneumáticos. Tendo em vista um ponto indispensável, é considerar que após o termino de uma obra, se faz necessário pensar no futuro do monitoramento, e com progresso tecnológico, é recomendável a implantação ainda na fase de construção pode trazer celeridade na medição de dados. (MACHADO, 2007).

1.1.3 Justificativa social

Fontes renováveis de energia como solar, eólica, geotérmica, hidrelétrica e biomassa representam apenas 14% da matriz energética global. De modo que o desenvolvimento econômico e social de um país está diretamente relacionado à sua capacidade de produzir energia para uso final e proporcionar que a população tenha acesso universal a esse recurso (IEA, 2020).

Importante destacar o momento delicado vivido em relação à pandemia de Covid-19 onde milhões de casos da doença foram confirmados com milhares de pessoas mortas e resultado dos esforços para diminuir a propagação do vírus levou a uma reação proporcional aumento de uso de energia que saltou de 5% em meados de março para 50% em meados de abril de 2021. Segundo estimativas feitas pela IEA – *International Energy Agency*, em 2018 aproximadamente 90% da população mundial passou a ter acesso à energia elétrica. Entretanto, o número de pessoas sem acesso a este recurso ainda era grande, totalizando cerca de 789 milhões de pessoas (IEA, 2020).

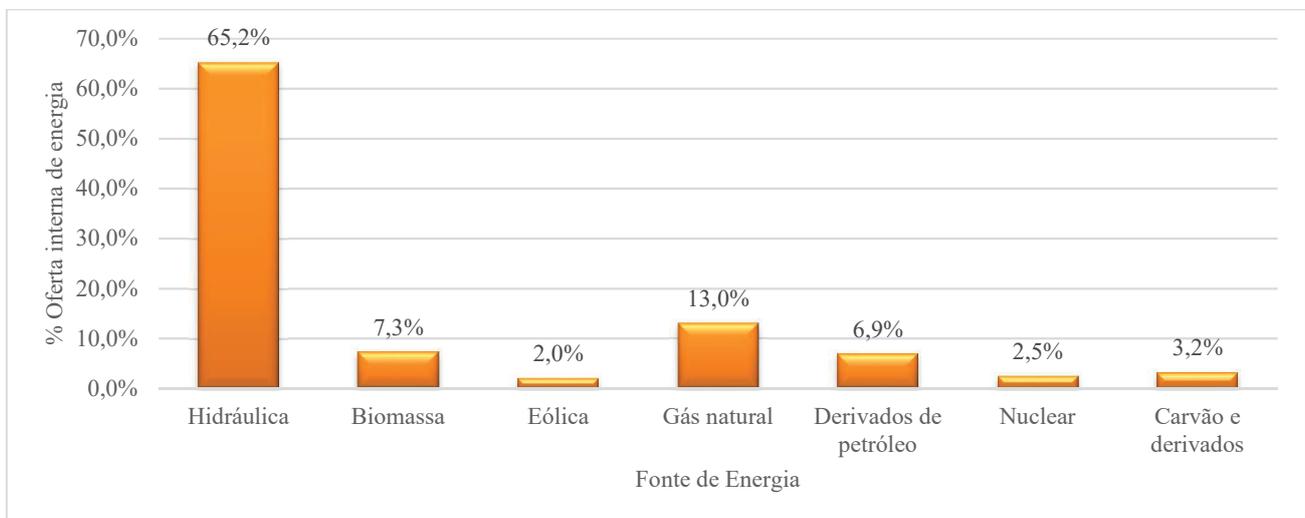
A disponibilidade de água para consumo humano na região metropolitana de São Paulo é conhecida há décadas por autoridades e especialistas da região, onde a atual crise hídrica era previsível.

Desta forma, a mudança climática também é um problema que permeia a vida moderna há algum tempo. Em 2004, quando a concessão da Sabesp foi prorrogada para continuar captando água do sistema Cantareira, São Paulo enfrentou grandes problemas de abastecimento de água e a prorrogação desta outorga gerou um debate acalorado. Ainda, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), ao renovar o subsídio, não escondeu a má gestão dos recursos hídricos e impôs uma série de obrigações à Sabesp. Essas medidas, se tomadas em conjunto e devidamente respeitadas, poderiam evitar uma crise tão grave, que tem se apresentado atualmente. De modo que o racionamento de água tem atingindo pequenas e grandes cidades, indicando deficiência na distribuição de água, muitas vezes devido a investimentos insuficientes na modernização e construção de infraestruturas adequadas. (LUTTI, 2014).

1.1.4 Justificativa econômica

Estima-se um potencial aproveitamento hidráulico do Brasil de aproximadamente 260 GW, colocando o país entre um dos cinco maiores países do mundo em demanda de energia elétrica. O estado do Paraná lidera com 23% do total considerando toda bacia hidrográfica da região. O Brasil tem crescido quando se trata de energia renovável, sendo o destaque predominante do país na matriz energética nacional. Tendo como referência o balanço energético nacional – BEN 2015, 65,2% da oferta total de energia é renovável (BEN, 2015). O GRÁFICO 1-3 a seguir indica a distribuição de oferta de energia elétrica no ano de 2014 no Brasil, liderando em fornecimento de energia elétrica firme os empreendimentos de UHEs, PCHs e CGHs.

GRÁFICO 1-3 - OFERTA INTERNA DE ENERGIA NO BRASIL (2014)



FONTE: adaptado de Arandanet (2022).

Uma apólice de seguro de barragem é uma forma de proteção financeira contra possíveis danos ou riscos associados à operação da barragem e oferece cobertura para eventuais danos causados por acidentes como deslizamentos, rompimentos, vazamentos, entre outros, que possam ocorrer durante a construção, operação ou manutenção da barragem. De modo que o seguro de uma barragem pode variar dependendo da finalidade do represamento e sua localização. O seguro de barragens é importante para garantir o funcionamento em caso de sinistro e garantir a indenização de terceiros afetados pela ocorrência. Entretanto, quanto aos riscos associados ao empreendedor, tratando-se de danos patrimoniais, este tipo de apólice cobre danos físicos ao patrimônio material do segurado e eventuais prejuízos consequentes. Além de todas as máquinas, equipamentos, matérias-primas, bem como a possível perda de lucro. Uma cobertura do tipo (risco total), ou seja, cobre todos os riscos, exceto os expressamente excluídos, podendo oferecer a proteção para danos materiais causados, danos por erro de projeto, remoção de entulhos, entre outros. (AYRES, 2016).

OBJETIVOS

1.1.5 Objetivo geral

Consolidar dados reais de vazões observadas em maciços e fundações de 133 barragens de terra e enrocamento brasileiras, com intuito de auxiliar na elaboração de novos projetos, diagnóstico de comportamento e também estabelecimento de parâmetros para avaliação de rotina, regular e periódica de segurança de barragens.

1.1.6 Objetivos específicos

Plotagem gráfica do histórico de vazões específicas, consolidando a maior medição observada, correlacionando com o nível histórico do reservatório, geologia do solo de fundação e aspectos geométricos (comprimento e altura) de barragens de terra e enrocamento brasileiras, aumentando o acervo já existente de vazões publicados em livros e artigos de referência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

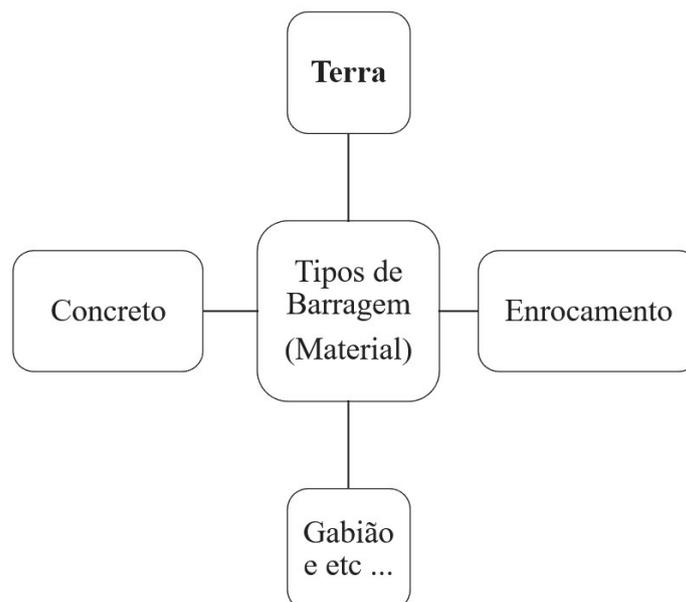
2.1 REFERENCIAL TEÓRICO DE BARRAGENS

Este capítulo apresenta de forma abrangente a base teórica, consultada na literatura de barragens, desde aspectos geológicos, sistema de drenagem interna e medidores de vazão. Apresentam-se também os métodos para estimativa de vazões que percolam em barragens.

2.1.1 Barragens

Na escolha do tipo de barragem a ser construída, deve-se considerar fatores que possam condicionar o desenvolvimento das atividades do empreendimento dentro da programação e planejamento da obra. Entretanto, destaca-se a importância da disponibilidade de materiais, bem como o balanço físico dos volumes de projeto, considerando todas as perdas e empolamento no transporte no percurso das jazidas, pedreiras e materiais provenientes de escavações obrigatórias até a área de implantação. De modo que estes materiais tenham a sua utilidade comprovada por controle tecnológico com ensaios geológicos geotécnicos de campo e laboratório. A seguir na FIGURA 2-1 são apresentados os principais tipos de barragens utilizadas no Brasil e no mundo, e no caso das barragens de enrocamento, o seu sistema de vedação pode variar podendo ser em núcleo de terra, núcleo asfáltico betuminoso, face de concreto asfáltico e face de concreto convencional (ANA, 2016).

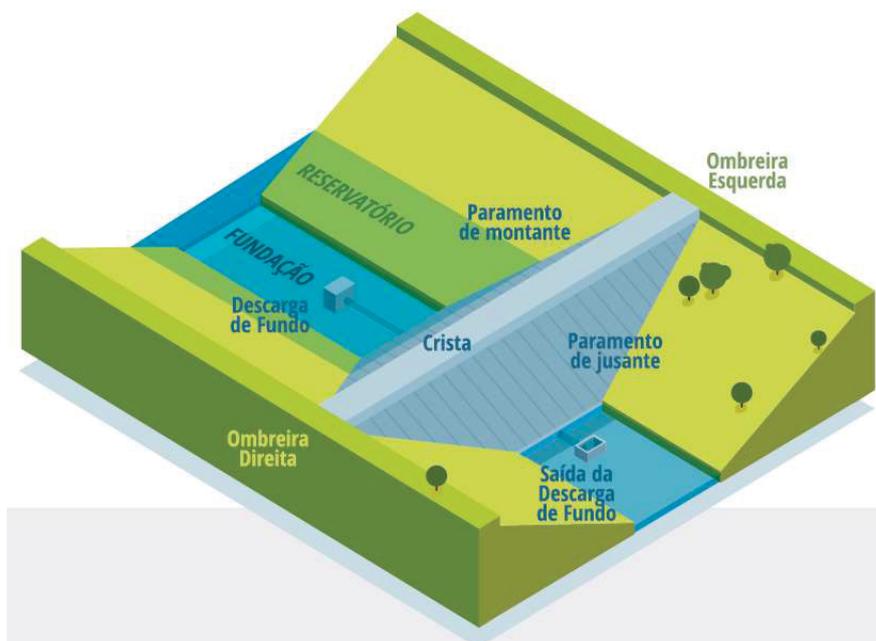
FIGURA 2-1 - TIPOS DE BARRAGENS (MATERIAIS)



FONTE: adaptado de ANA (2016).

Uma barragem é uma estrutura construída transversalmente a um curso de água, permanente ou temporário, para fins de contenção ou acumulação de água, de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos. De modo que podem ser construídas para irrigação, produção de energia elétrica, abastecimento público, regularização de cheias, contenção de resíduos sólidos, abastecimento de indústrias agropecuárias, piscicultura e recreação, entre outros. No entanto, a criação de pequenos reservatórios está frequentemente associada a pequenas explorações agrícolas ou o abastecimento de pequenas comunidades, com orçamentos limitados para a caracterização do local de implantação, o projeto, a construção e a operação (ANA, 2016).

FIGURA 2-2 - ESQUEMA DE UMA BARRAGEM DE TERRA

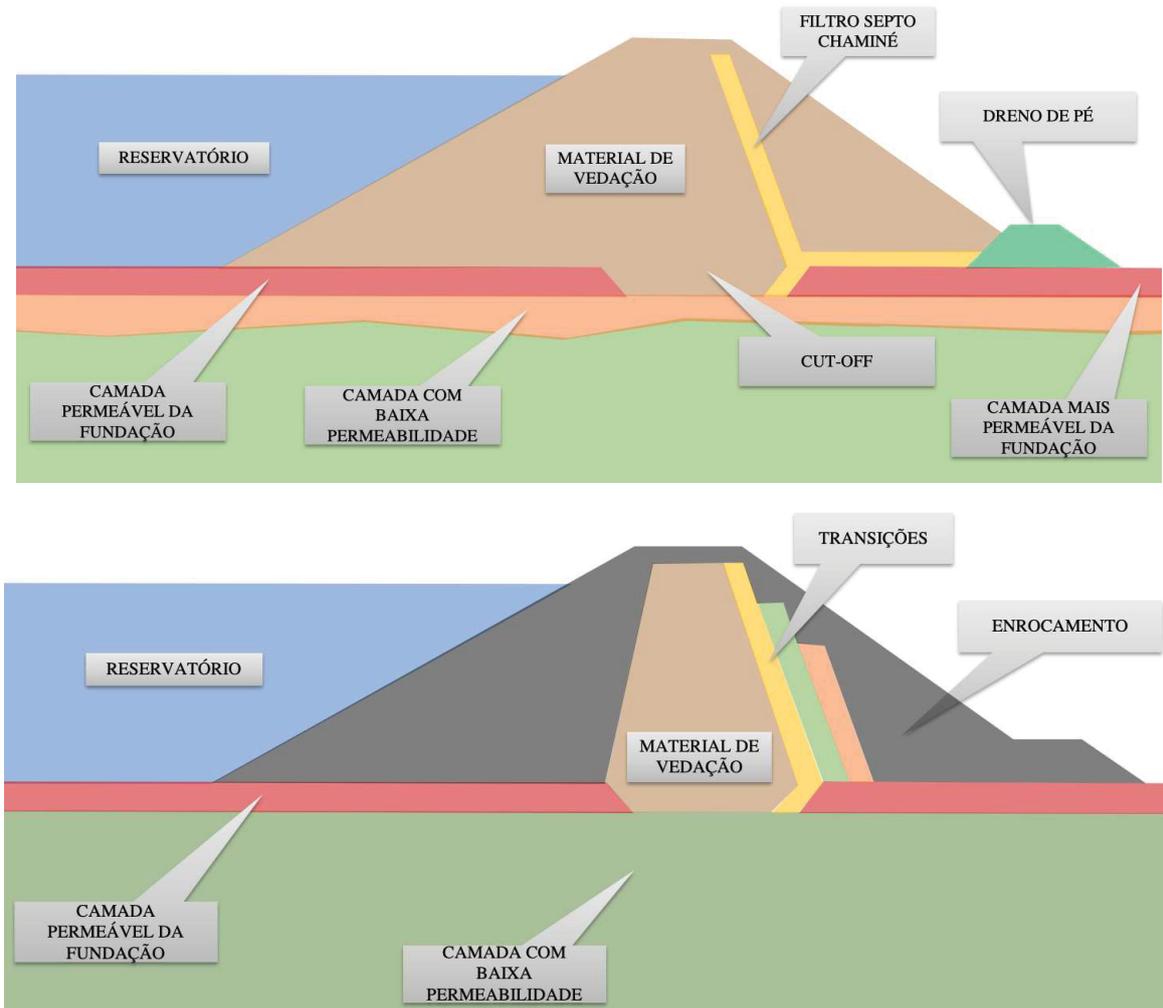


FONTE: ANA (2019).

A seção transversal do barramento é aproximadamente trapezoidal conforme apresentado na FIGURA 2-3, sendo o lado maior do contato com o terreno natural, chamado de fundação e o lado menor denominado de coroamento ou crista da barragem.

Ainda a parte do barramento em contato com a água é chamada de paramento (ou talude) de montante, sendo o outro paramento, do lado oposto à água, designado por paramento (ou talude) de jusante. De modo que as zonas das margens em contato direto com o barramento são denominadas de ombreiras, a margem direita, designada de ombreira direita, e outra na margem esquerda, a ombreira esquerda (ANA, 2016).

FIGURA 2-3 – BARRAGEM HOMOGÊNEA E DE TERRA E ENROCAMENTO



FONTE: adaptado de ANA (2016).

2.1.2 Aspectos geológicos

Os estudos geológicos para cada projeto de uma barragem visam descrever as características geológicas da área de estudo, descrição geomorfologia, descrição pedológica e estudos sísmicos de uma determinada região. De modo a apresentar a evolução do padrão de drenagem da região, a litologia da bacia hidrográfica, a hidrogeologia, estratigrafia local, principais falhas geológicas. Dando continuidade com estudos geotécnicos, investiga-se a morfologia geológica local e do reservatório da barragem, bem como a estabilidade de encostas e a permeabilidade das ombreiras e fundação. Ainda os recursos das jazidas e pedreiras também são examinados, principalmente para avaliar a acessibilidade dos materiais necessários para construir o maciço da barragem. (COSTA, 2012).

Gouveia et al. (2015) descrevem que a caracterização geomecânica e classificação dos materiais de aterro e fundação, são baseadas na interpretação de dados de campo, sondagens e testes de laboratório, incluindo a caracterização estratigráfica e suas descontinuidades. Contudo, a interpretação da aplicação desses dados do terreno é demonstrada graficamente a partir de uma seção geológico-geotécnica, na qual são apresentadas as propriedades com intuito de dar maior compreensão do problema e para visualizar um conjunto de soluções de projeto.

Combinar mapas e seções transversais interpoladas em um único sistema de visualização pode gerar um modelo tridimensional, com muitas vantagens sobre os modelos bidimensionais, pois pode-se analisar seções transversais em qualquer direção, além de representar com mais precisão a autenticidade do local estudado, calcular o volume, visualizar a geometria e a tendência de cada subdivisão (GOUVEIA et al. (2015).

As características geológicas a serem observadas no projeto de uma barragem, resumem-se na avaliação das propriedades dos materiais de fundação, a topografia do terreno, informações sobre nível de água, estratigrafia e descrição dos testemunhos de sondagens realizados no local. Com o intuito de auxiliar na avaliação do comportamento de uma barragem é feito um acompanhamento dos elementos meteorológicos como (variações climáticas sazonais, precipitação e temperatura). Desta forma, as variações climáticas sazonais, principalmente a precipitação, têm frequentemente efeitos significativos nos níveis das águas subterrâneas. A percolação pelas barragens também pode ser visivelmente afetada pelas precipitações (FEMA, 2015).

2.1.3 Fluxo de água

O escoamento em meios porosos é um fenômeno importante para analisar o comportamento de barragens de terra. Destaca-se ainda que o fluxo em ambientes saturados e insaturados, por causa dessas duas áreas, resulta na linha divisória é chamada de linha de freática e ainda indica o significado que a sucção está diretamente relacionada à quantidade de água presente no vazio. O contato do solo com a linha freática neutra promove a ascensão capilar do líquido através dos pequenos canais formados pelas partículas e aponta que a análise de fluxo por meios não saturados representa-se mais complexa do que em meios saturados. O efeito da sucção é inversamente proporcional ao diâmetro do poro e apresenta as curvas características de diferentes solos da relação da umidade volumétrica com a sucção (ARAÚJO, 2013).

O modelo de VAN GENUCHTEN, o mais utilizado para simular o comportamento de solos não-saturados, descreve que para estimar o volume de água percolada pelo maciço de uma barragem de terra, torna-se necessário determinar o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica dos materiais. Descreve ainda que a permeabilidade e velocidade de percolação da água pelo maciço variam de acordo com granulometria e apresentasse sensível à quantidade e em sua dissertação apresenta a TABELA 2-1 a seguir com as características de permeabilidade e drenagem dos solos (TERZAGHI, 1996).

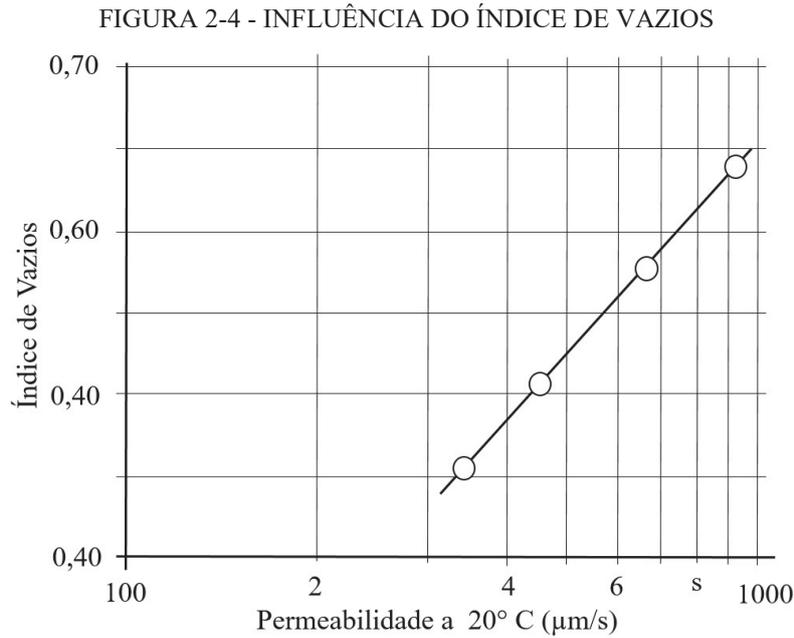
Os solos com maior índice de vazios representam maior porosidade do meio, o qual consequentemente são mais permeáveis (LAMBE E WHITMAN, 1969).

TABELA 2-1 - PERMEABILIDADE E DRENAGEM DOS SOLOS

k (cm/s)	Permeabilidade	Drenagem	Tipo de solo		k (cm/s)
1,00E+02	elevada	boa	Pedregulhos limpos		1,00E+02
1,00E+01					1,00E+01
1,00E+00			Areia limpa, areia limpa e mistura de pedregulho		1,00E+00
1,00E-01					1,00E-01
1,00E-02	média			solo "impermeável" modificado pelos efeitos da vegetação e intemperismo	1,00E-02
1,00E-03					1,00E-03
1,00E-04	baixa	pobre	areia muito fina, silte orgânico e inorgânico, mistura de silte arenoso e argila, depósito de argila estratificada, etc.		1,00E-04
1,00E-05					1,00E-05
1,00E-06	muito baixa				1,00E-06
1,00E-07					1,00E-07
1,00E-08	praticamente impermeável	praticamente impenetrável	solo "impermeável", argilas homogêneas abaixo da zona intemperizada		1,00E-08
1,00E-09					1,00E-09

FONTE: Adaptada de Terzaghi et. al (1996).

A FIGURA 2-4 a seguir apresenta a influência do índice de vazios na permeabilidade. Menciona ainda sobre composição do solo, estrutura do arranjo das partículas, grau de saturação e anisotropia em relação à permeabilidade.



FONTE: Lambe e Whitman (1969).

Uma barragem de aterro, mesmo que feita com materiais de alta qualidade, boa densidade e práticas de construção adequadas, sempre há percolação de água pelo corpo do maciço, o que é normal após se atingir um estágio de estabilidade com o enchimento do reservatório (COSTA, 2012).

Portanto, métodos para reduzir e controlar infiltração são de extrema importância, em que o emprego adequado drenagem e filtração como uma camada de transição entre as camadas do solo usando diferentes granulometrias para manter a estabilidade da barragem corpo evita o aumento da pressão dos poros, maneira eficaz de controlar a infiltração e prevenir o rompimento da barragem mediante à força de infiltração (MLYNAREK ET AL., 1990).

Entre os efeitos negativos da infiltração de água no corpo e fundações de barragens de aterro está a possibilidade de deslocamento e, finalmente, lixiviação de partículas de solo formado na fundação e o corpo da barragem pela água. As redes de drenagem com pouca proteção são mais propensas a vazamentos e erosões internas. (MLYNAREK ET AL., 1990).

A TABELA 2-2 apresenta valores consolidados médios de permeabilidade de materiais comuns em construção de aterros de barragens e suas fundações.

TABELA 2-2 - PERMEABILIDADES (CONDUTIVIDADES HIDRÁULICAS)

descrição	faixa k (cm/s)
areias finas	1,00E-03
areias grossas	1,00E-02 5,00E-02
areias médias	1,00E-02

descrição	faixa k (cm/s)	
arenitos	1,00E-04	
arenitos silicificados	1,00E-08	1,00E-09
argilas marinhas	1,00E-08	
argilas sedimentares	1,00E-07	1,00E-08
brita	1,00E+00	1,00E-01
concreto	1,00E-09	
concreto fissurado	1,00E-04	
concreto poroso	7,00E-02	
enrocamento limpo uniforme d50 = 60cm	5,00E+01	
enrocamento sem finos	1,00E+00	
enrocamentos com finos	1,00E-03	
fratura / falhas em rocha	2,00E+02	5,00E+02
fratura em rocha de 0,05 mm	1,00E+01	
fratura rochosa 1,0 mm	7,00E+01	
fratura rugosa 0,75 mm	5,00E+01	
pedregulhos	1,00E-01	
rocha maciça com fissuras de 0,1 mm/m	4,00E-03	
rochas alteradas	1,00E-06	
rochas maciças	1,00E-09	1,00E-10
siltos	1,00E-06	
siltos grossos	1,00E-05	
siltitos	1,00E-06	1,00E-07
solo porosos	1,00E-02	1,00E-04
solos compactados	1,00E-04	1,00E-06
tubos em descontinuidades rochosas	2,00E+01	

FONTE: Cruz (2004).

2.1.4 Percolação de água

O método mais utilizado na determinação da percolação em barragens de terra, é a aplicação da rede de fluxo por um problema bidimensional, sendo apresentadas hipóteses básicas para aplicação na equação da continuidade de Laplace. (MUSKAT, 1937).

A rede de fluxo é o método mais utilizado para determinar o comportamento do fluxo em barragens e ainda se possibilita a determinação de parâmetros como a vazão, gradiente hidráulico e distribuição de subpressão. Destaca também a importância da imposição das condições de contorno para limitação externa da rede de percolação. Apresentado os cenários de percolação de água pelo maciço e através da fundação (MUSKAT, 1937).

2.1.5 Retenção de partículas

Santos (2008) indica que referente ao *critério de retenção* os filtros necessitam ter uma porção de finos adequada para que os vazios distribuídos em meio as partículas do material filtrante possam reter parte das partículas de maior dimensão do solo de vedação (VAUGHAN E SOARES, 1982).

Araújo (2019) descreve que os critérios de retenção baseados na distribuição de partículas consistem em relacionar os diâmetros das partículas do filtro com os diâmetros das partículas do solo base e indica que o primeiro critério adotado em projetos de filtros granulares foi proposto por Terzaghi na década de 1920.

O método define ainda dois requisitos a serem atendidos (retenção e drenagem). Cita ainda que Bertram (1940 apud MOFFAT, 2005) foi o primeiro trabalho publicado a analisar a relação de retenção de Terzaghi. O estudo utilizou areias uniformes como materiais para os testes. O método adotado consistiu em impor um fluxo de água unidirecional, no sentido descendente, percolando através das combinações de materiais (solo base e filtro) com gradientes hidráulicos.

Karpoff (1955 apud MOFFAT, 2002) realizou uma série de testes de filtração para filtros com granulometrias uniformes e bem graduados, usando como solo base um silte, uma areia fina e média uniformes e uma areia com pedregulhos bem graduada. Sherard, Dunnigan e Talbot (1984) realizaram um experimento de filtração, utilizando areias relativamente uniformes como solo base, e areias e pedregulhos uniformes como material para o filtro, com D₁₅ variando entre 1 a 10 mm.

Para complementar ao estudo anterior (SHERARD; DUNNIGAN; TALBOT, 1984a), Sherard, Dunnigan e Talbot (1984) investigaram a utilização de filtros granulares para solos bases siltosos e argilosos. Nesse estudo, foram utilizados dois métodos de ensaio de filtração, no qual ambos os materiais, solo base e filtro granular, eram submetidos a um fluxo de água sob alta pressão.

Honjo e Veneziano (1989) estudaram a capacidade de filtros capturarem partículas de solos de baixa coesão, por meio de uma combinação de modelagem física de transporte de partículas de solo e análise estatística do comportamento geral de filtros. Sherard e Dunnigan (1989) desenvolveram um novo método de ensaio de filtração e propuseram novas relações granulométricas de filtros satisfatórios para diferentes tipos de solo base. O método de ensaio foi chamado de No Erosion Filter – NEF e consiste, resumidamente, em submeter um fluxo de água sob pressão em uma combinação de granulometrias de solo base e filtro.

Lafleur, Mlynarek e Rollin (1989) estudaram os mecanismos de filtração em solos base de baixa coesão amplamente graduados ($C_u > 20$), apresentando dois processos fundamentais nestes solos: a autofiltração e a estabilidade interna.

A autofiltração consiste no processo de retenção gradual, iniciado pela captura das partículas mais grossas na interface com o filtro granular, que, progressivamente, promove a formação de camadas, que auxiliam na retenção de partículas cada vez menores, similar à camada autocicatrizante apresentada por Honjo e Veneziano (1989).

2.1.6 Instabilidade interna

Santos (2008) indica que referente ao critério de *autoestabilidade* menciona que a porção mais grossa dos materiais filtrantes necessitam obedecer ao critério de retenção paralelamente à sua fracção de menor granulometria mais fina. A susceptibilidade de solos bem graduados ou de granulometria descontínua estarem sujeitos à instabilidade interna depende bastante da forma na qual suas partículas estão distribuídas (KENNEY, 1985; LAU, 1986).

Esses solos podem apresentar uma configuração, onde um desequilíbrio cria: uma fração grossa, que é estrutural, mas com poucos grãos em contato sob altas tensões; e uma fração fina, não estrutural, com grãos livres para se movimentar, sem ocorrer nenhuma transferência de tensões entre eles (RÖNNQVIST; VIKLANDER, 2014).

O método de Kenney e Lau (1985, 1986 apud RÖNNQVIST; VIKLANDER, 2014) foi desenvolvido a partir de observações experimentais de amostras de areias bem graduadas submetidas a um fluxo unidirecional descendente, com carga constante de 10 kPa. Se ocorresse alguma alteração na curva granulométrica após o ensaio, significava que o solo apresentou instabilidade interna.

Li (2008) realizou uma análise dos critérios de avaliação de instabilidade interna por meio de uma série de testes em seis solos amplamente graduados (*widely graded soils*) de baixa coesão. Dois permeâmetros foram utilizados, um menor que se limitava a solos com partículas inferiores a 8 mm, atingindo um gradiente hidráulico máximo de 15, e outro maior para solos com partículas inferiores a 23 mm, atingindo um gradiente máximo de 65.

2.1.7 Distribuição das constrições

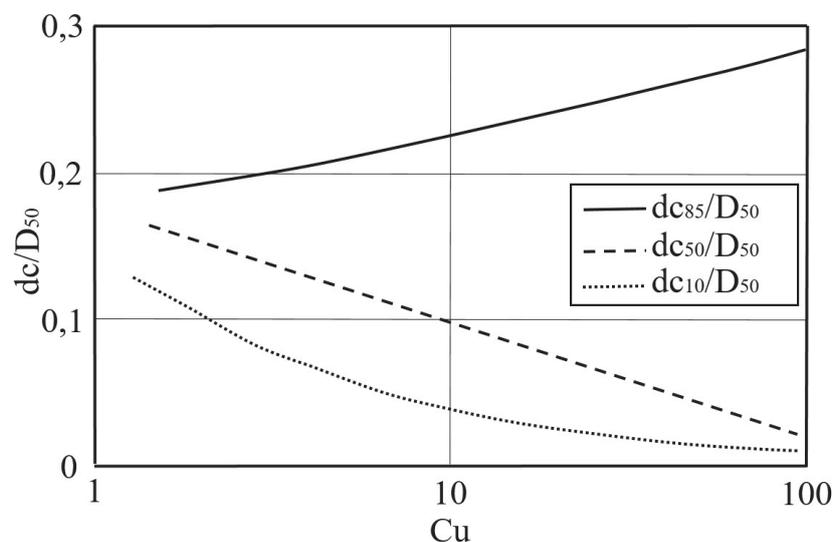
As constrições podem ser definidas como as menores aberturas existentes que dão acesso aos poros internos de um solo granular. Os primeiros estudos sobre as constrições procuravam verificar a espessura ideal de filtros, na qual a movimentação de partículas de determinado tamanho carregadas pelo fluxo cessava, mesmo quando a granulometria não atendia aos critérios usuais de dimensionamento. Considerando que filtros granulares estão dificilmente compactados em seu estado máximo de compacidade, Silveira, Peixoto Júnior e Nogueira (1975 apud RAUT, 2006) apresentaram uma nova

forma de cálculo da distribuição das constrições, assumindo um estado de compacidade mínimo, um estado fofo (ARAÚJO, 2019).

De Mello (1977) analisou o modelo analítico de Silveira (1965) e Silveira, Peixoto Júnior e Nogueira (1975 apud RAUT, 2006), no qual foram baseados para curvas de filtros uniformes, e mostrou que ocorre um aumento na razão entre o dc_{85} , diâmetro da constrição correspondente a 85% mais fino, e o D_{50} , diâmetro médio da partícula do filtro, com o aumento do coeficiente de uniformidade (ARAÚJO, 2019).

Humes (1998) criticou os métodos de Silveira (1965) e de Musso e Federico (1982), no tocante à forma na qual as frequências de ocorrências das partículas eram utilizadas, em função da massa ou do número de partículas. Conforme demonstrado por De Mello (1977), FIGURA 2-5 a seguir, o método de Silveira (1965) produz constrições muito maiores por conta do efeito das frequências em massa, pois quanto maior a partícula, maior a massa e, então, maior a participação na formação de constrições, o que não ocorre em solos não uniformes (ARAÚJO, 2019).

FIGURA 2-5 - COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE (CONSTRIÇÕES)



FONTE: Adaptado de De Mello (1977).

Os modelos anteriores (SILVEIRA, 1964; PEIXOTO JÚNIOR; NOGUEIRA, 1975) as constrições eram determinadas baseadas num tipo específico de agrupamento dos grãos para os estados extremos de compacidade, denso e fofo (ARAÚJO, 2019).

Entretanto, dificilmente um filtro consegue atingir esses estados completamente, estando, na verdade, num estado intermediário. Locke, Indraratna e Adikari (2001) apresentaram uma abordagem

mais realista para distribuição das contrações, considerando a influência do índice de densidade (ID) na formação das contrações (ARAÚJO, 2019).

Apresentado na TABELA 2-3 a comparação entre métodos de estimativa de controle de filtração.

TABELA 2-3 - ESTIMATIVA DOS DC'S DE CONTROLE DE FILTRAÇÃO

Filtro	Kenney et al. (1985)		Witt (1993) (mm)	Foster e Fell (2001) (mm)	Sherard, Dunnigan e Talbot (1984a) (mm)	Indraratna, Raut e Khabbaz (2007)	
	0,20D ₁₅ (mm)	0,25D ₅ (mm)				D ₃₅ (70%) (mm)	D ₃₅ (100%) (mm)
F1	0,213	0,225	0,240	0,167	0,191	0,215	0,181
F2	0,209	0,200	0,210	0,167	0,188	0,200	0,188
F3	0,210	0,177	0,198	0,168	0,189	0,178	0,167
F4	0,095	0,115	0,108	0,076	0,086	0,096	0,081
F5	0,023	0,028	0,026	0,019	0,021	0,024	0,020

FONTE: Indraratna, Raut e Khabbaz (2007).

2.1.8 Sistemas de drenagem interna

O objetivo da implantação de materiais filtrantes entre si no corpo de uma barragem é estabelecer um sistema de drenagem com capacidade de dar alívio as pressões internas dos materiais empregados nos aterros, bem com suas fundações, assim evitando o potencial de carreamento de partículas destes maciços arrastados pelo fluxo de água.

Berigo (2005) aborda a importância do controle da linha freática em barragens evitando a instabilidade interna dos materiais, ainda menciona que a permissividade e a capacidade de vazão dos materiais empregados no sistema interno de drenagem em barragens.

Também descreve quanto ao dimensionamento de projeto na busca a determinação das dimensões e geometrias que melhor atendem o controle dos fluidos percolantes (BERIGO, 2005).

Apresentado na TABELA 2-4 os critérios empíricos de projeto de sistemas de drenagem e filtração de barragens, destaca-se ainda que Silveira (1965) propõe um modelo probabilístico para

avaliar a capacidade de retenção de partículas de um filtro a partir da distribuição dos diâmetros (ASSIS, 2003).

TABELA 2-4 - SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO

Autor	Material Adjacente	Critério de Filtro	Principais Características
Terzaghi (1922)	Areia uniforme	$D_{15}/d_{15} > 4 - 5$ e $D_{15}/d_{85} < 4 - 5$	Baseado na experiência do autor.
US Bureau of Reclamation (1963)	Cu = 3 - 4 (solos não coesivos)	$5 < D_{50}/d_{50} < 10$ (areia fina)	$D_{100} < 75 \mu$ $D_5 > 0,074 \text{ mm}$ e as frações finas dos materiais do filtro e do solo adjacente devem ter granulométricas paralelas.
	Cu > 4 (solos bem graduados)	$12 < D_{50}/d_{50} < 58$ e $12 < D_{15}/d_{15} < 40$ (partículas arredondadas)	
		$9 < D_{50}/d_{50} < 30$ e $6 < D_{15}/d_{15} < 18$ (partículas angulares)	
Vaughan e Soares (1982)	-	$kF < 6,7 \cdot 10^{-6} \cdot \delta d^{1,52}$	δ em μm .
Sherard e Dunningan (1985)	Siltes finos e Argilas (+ 85% < 0,074 mm)	$D_{15}/d_{85} \leq 9$	Filtros de solos finos (mais de 40% < 0,074 mm) devem ter menos de 60% mais grosseiro que 4,76 mm e tamanho máximo de partícula de 50 mm. Para condutividade hidráulica propõe $D_{15}/d_{85} < 3 - 5$.
	Siltes e Areia Argilosa (40 a 85% < 0,074 mm)	$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$	
	Material intermediário (15 a 40% < 0,074 mm)	$D_{15} = (40 - A / 40 - 15) \cdot ((4 \cdot d_{85}) - 0,7) + 0,7 \text{ mm}$	
	Material Grosso (- 15% < 0,074 mm)	$D_{15}/d_{85} < 4 - 5$	

FONTE: Assis (2003).

Legendas:

Cu = corresponde ao coeficiente de não-uniformidade do solo, dado pela relação d_{60}/d_{10} .

D_n = é diâmetro máximo (mm) das % partículas mais finas do material do filtro;

d_n = é o diâmetro máximo (mm) das % partículas mais finas do material adjacente ao filtro;

kF = condutividade hidráulica do filtro;

δ = é o diâmetro equivalente representativo das partículas do solo adjacente ao filtro, frequentemente $\delta = d_{85}$,

A = é a porcentagem de partículas (%), do material adjacente ao filtro, menores que 0,074 mm.

Santos (2008) resume a seguir os critérios de permeabilidade, uniformidade e de material granular, seguida das devidas referências que podem ser consultadas para aprofundamento destas avaliações para materiais filtrantes.

Tratando-se do *critério de permeabilidade*, destaca-se que os materiais filtrantes necessitam ser suficientemente grosso para possibilitar que o fluxo de água de infiltração transpasse pelo filtro, eliminando a ocorrência de elevadas pressões nos vazios, afetando a diferença de carga hidráulica e o comprimento de fluxo (VEIGA PINTO, 1984).

Quanto ao *critério de uniformidade*, compreende-se que a granulometria dos materiais filtrantes terá que ter uma suficiência de uniformidade para permitir que, com uma boa metodologia de construção, para que não ocorra a segregação do material durante os trabalhos necessários para qualidade de implantação do material in situ não sofra segregação durante o manuseamento, a colocação, o espalhamento e a compactação (USACE, 1955).

Para o *critério de filtro (granular)*, a maioria dos autores recomenda que o material filtrante não deve ser plástico e não pode ultrapassar mais que 5% de material fino passante na peneira número #200, ainda estudos mais atuais discute que o critério citado é considerado conservador, pois como resultado conclui-se que materiais filtrantes não plásticos com mais de 12% de finos consideram um alto risco de ocorrência de uma fissura com o material não saturado, deste modo conclui-se que os filtros necessitam ter comportamento de materiais granulares evitando assim estas possíveis fissuras (PARK et al. 2006 e FELL E FRY, 2007).

2.1.9 Erosão interna

A maioria dos colapsos de barragens são causados pelo caminho de percolação que movimentam as partículas do solo como o efeito de transporte em direção à zona externa do aterro, gerando a formação de uma erosão interna conhecida no meio geotécnico como *piping* (FREITAS, 2019).

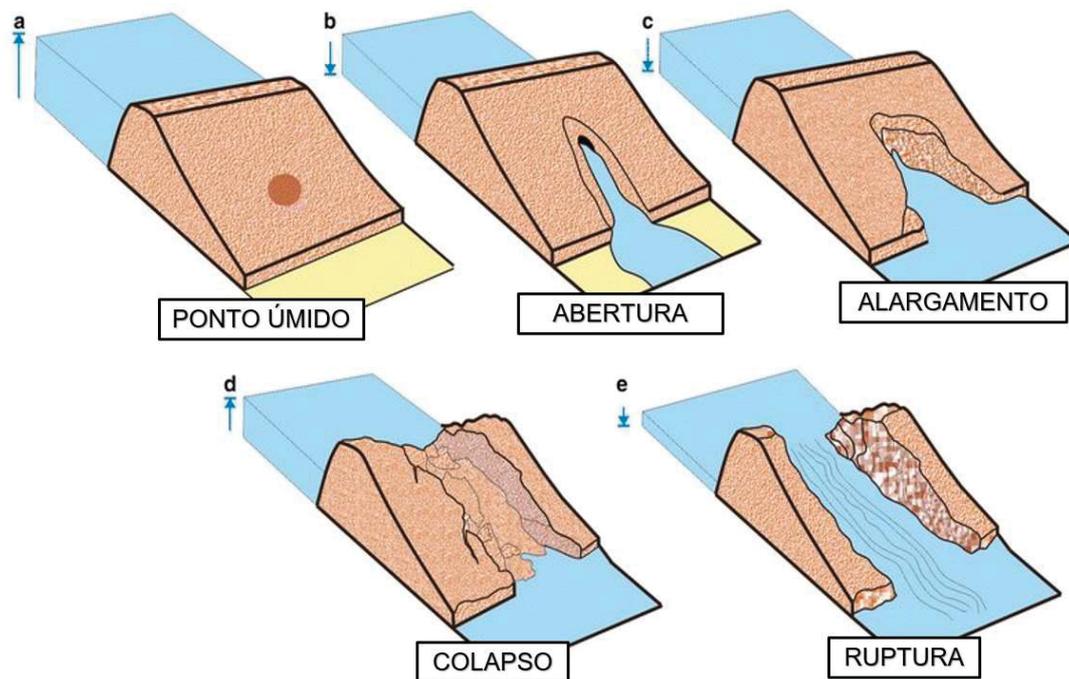
De acordo com Sandroni (2021), o carregamento de partículas pode gerar colmatação dos elementos filtrantes importantes para o comportamento de estabilidade da barragem, uma vez que espaços vazios podem aparecer em função de um mau funcionamento da drenagem interna.

A região do pé de jusante é uma localidade delicada como mais tendência de formação do *piping*, há uma grande concentração dos gradientes hidráulicos nesta região com vazões bem elevadas, este evento pode formar o arraste de finos do solo de forma gradativa. Considera-se com um fenômeno com evolução no sentido de jusante em direção a montante em forma de tubulação, que ocorre por evento descontrolado de percolação de água pelo maciço. Há ocorrências que uma erosão interna pode iniciar pela existência de raízes e material vegetal do processo de degradação, ou ainda pela existência de tocas de animais (ZUFFO, 2005).

Este fenômeno *piping* é uma preocupação principalmente em aterros propensos a erosão por concentração de carreamento de partículas por fissuras ou fraturamento hidráulico, isto pode ocorrer logo no após o enchimento do reservatório. Qualquer percolação sem controle, somados a regiões com aplicações de aterros com solos dispersivos, é um condicionante de alerta (SHERARD, 1973).

Na FIGURA 2-6 apresenta as etapas de evolução do processo de ruptura em função de erosão interna com carreamento de partículas.

FIGURA 2-6 - EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE RUPTURA (PIPING)



- a) Ponto úmido na encosta a jusante b) Formação e crescimento de um furo de tubulação c) Progressão e alargamento do tubo d) Colapso do telhado do tubo e) Perfil de ruptura final da barragem

FONTE: Okeke et al. (2013)

Para elaboração de um projeto de filtro de uma barragem, é necessário ter como diretriz fundamental o conhecimento da granulometria do material a ser utilizado, considerando que as partículas menores se distribuam de forma uniforme nos vazios nos espaços entre as partículas maiores. Este sistema de filtro visa impedir o carreamento de solo podendo refletir em uma erosão interna (*piping*). Uma forma visual de monitoramento é verificar se as águas estão limpas na saída do sistema de drenagem interna no pé de jusante da barragem. (FEMA, 2015).

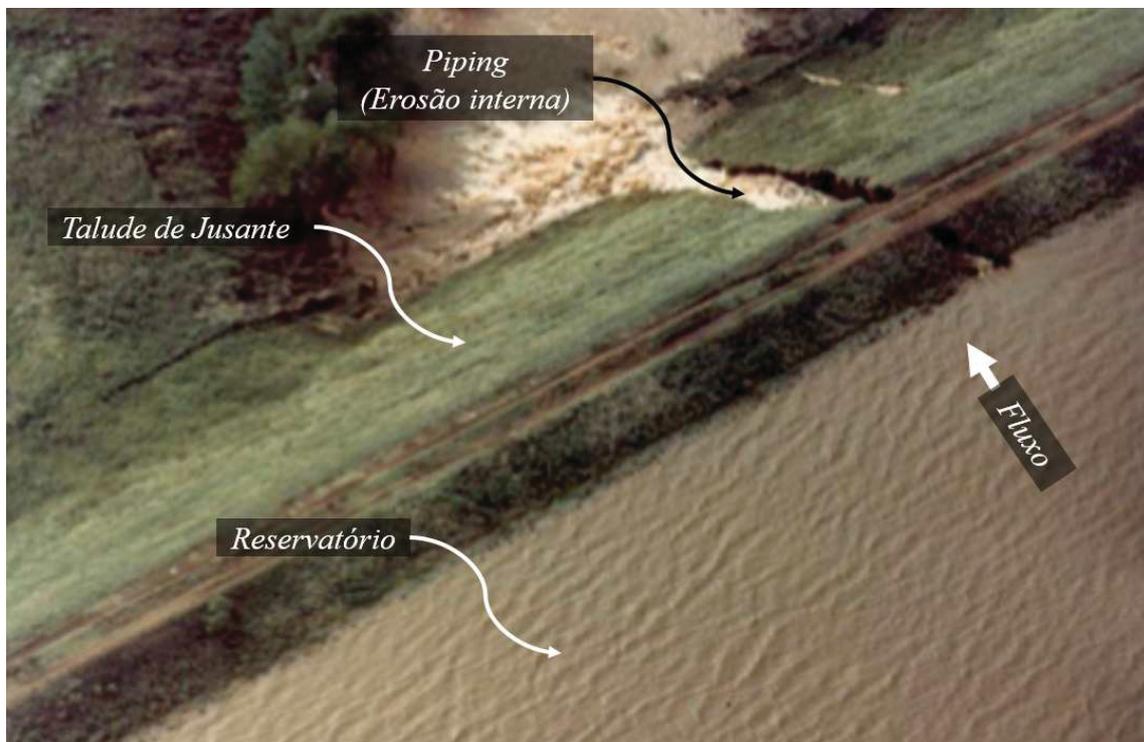
O fenômeno (*piping*) é uma consequência das forças de infiltração causadas pelo movimento das águas que percolam pelo interior do maciço de uma barragem e fundação. Este fenômeno inicia-

se quanto há um arrastamento de partículas e finos. O fenômeno (*piping*) ocorre quando as forças resistentes do solo são inferiores às forças de infiltração (FLORES, 2019).

Os solos mais susceptíveis a evento de erosão interna (*piping*) são os materiais mais arenosos sem compactação, as argilas de alta plasticidade são os materiais de maior resistência a este evento quando bem executados (FEMA, 2015).

Na FIGURA 2-7 demonstra a consequência causada por erosão interna, com seu provável início e aberturas causadas por assentamentos diferenciais do maciço da barragem, sismos, aberturas de tensão, ou problemas durante a execução com vazios deixados por raízes, troncos de árvores e até mesmo por buracos ou tocas escavadas por animais.

FIGURA 2-7 - EROSÃO INTERNA DE UMA BARRAGEM



FONTE: adaptada de FEMA (2015).

O processo de erosão interna tem uma sequência lógica de evolução, que consiste na fase inicial, fase de permanência, fase de progressão e ruptura (FELL et al. 2004).

Fase Inicial: O princípio da erosão ocorre quando gradiente hidráulico que flui por meio de uma barragem ou da sua fundação é suficiente para separar as partículas uma das outras.

Fase de Permanência: A continuação da erosão interna ocorre quando não existe a filtração ao longo do percurso de percolação, com isso ocorre o carreamento de materiais de solo transpassando pelo material que deveria ser filtrante o suficiente para barrar as menores partículas.

Fase de Progressão: Nesta etapa o caminho de erodibilidade começa a se abrir mais com a formação de um vazio contínuo através do aterro ou da fundação (tubulação) sem autorrecuperação.

Fase de Ruptura: A barragem pode romper de várias formas diferencia, como alargamento da tubulação induzindo a uma erosão regressiva interna, perda da borda livre com o colapso da crista, formação de vazios de escoamento, afundamento do talude de jusante e colapso do talude de jusante (FEMA, 2015).

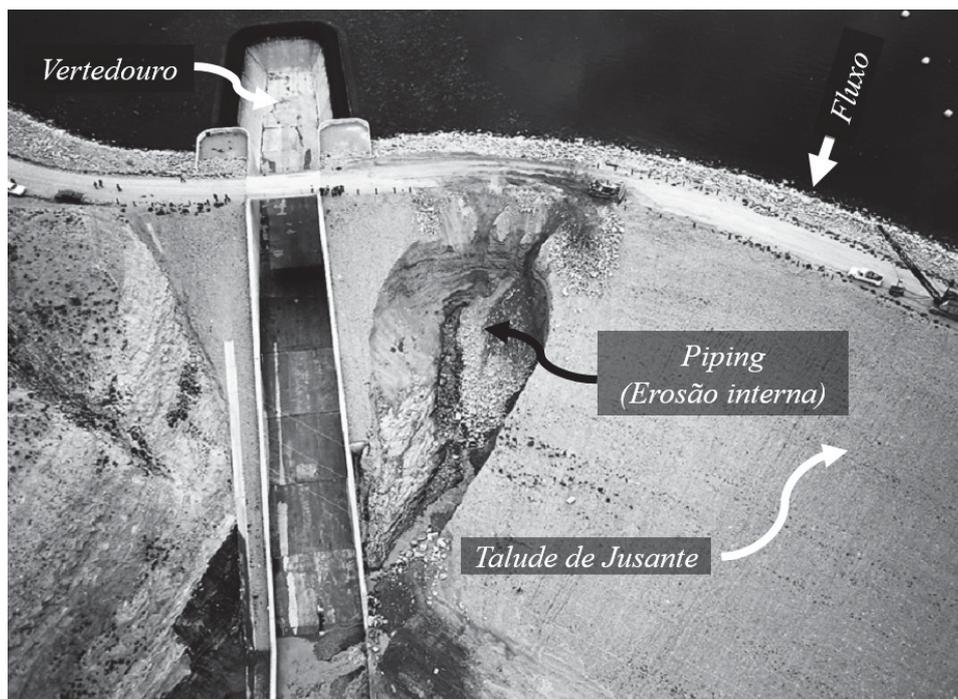
A seguir na FIGURA 2-8 e FIGURA 2-9 o exemplo da barragem Fontenelle, no ano de 1965 com o incidente com processo de erosão interna com afundamento do talude de jusante.

FIGURA 2-8 - ÍNICIO DE RUPTURA DA BARRAGEM FONTENELLE



FONTE: adaptada de FEMA (2015).

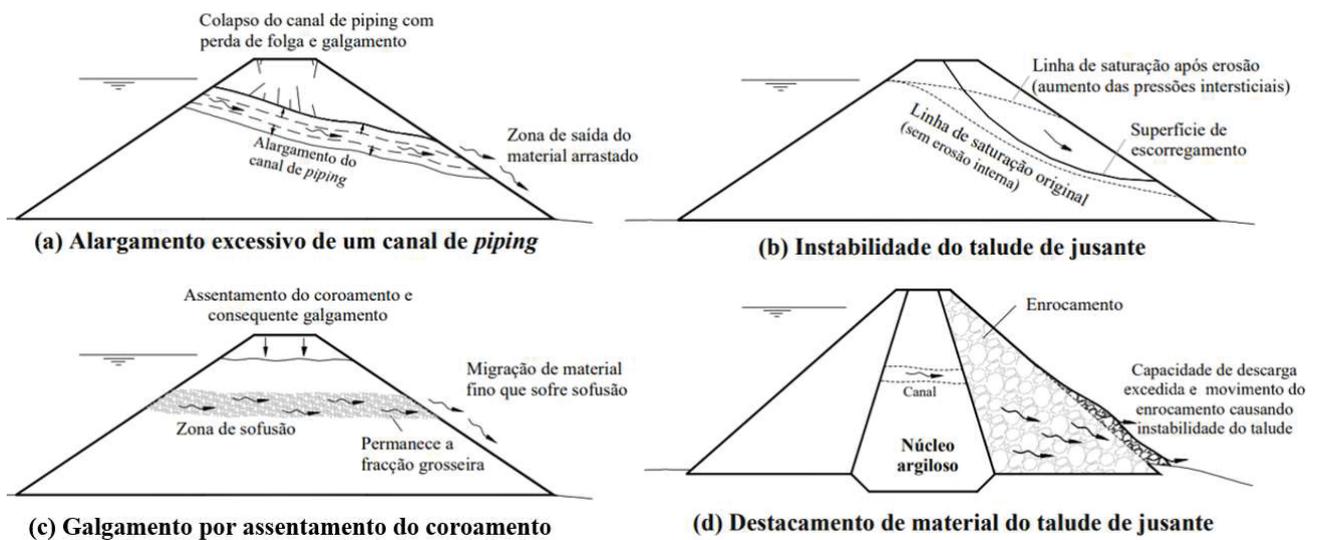
FIGURA 2-9 - COLAPSO DA BARRAGEM FONTENELLE



FONTE: adaptada de FEMA (2015).

Santos (2008) descreve que para a formação do processo de erosão interna pode-se ocorrer a formação de mecanismos de ruptura de uma brecha dentro do maciço da barragem, onde alguns fatores podem influenciar para que este fenômeno aconteça que são: baixa capacidade do sistema de drenagem interno da barragem escoar as águas que percolam pelo maciço e fundação, zoneamento do paramento de jusante com baixa permeabilidade. A FIGURA 2-10 demonstra algumas hipóteses de formação de brecha causada por erosão interna dentro do maciço compactado de uma barragem.

FIGURA 2-10 - EROSÃO INTERNA COM FORMAÇÃO DE BRECHA



FONTE: Santos (2008).

Os tipos de seções típicas de barragens com maior susceptibilidade a ocorrência de perda de estabilidade do maciço compactado do zoneamento de jusante do eixo da barragem são as “homogêneas” e barragens mistas, quando o volume e extensão do zoneamento a jusante em enrocamento é reduzido (SANTOS, 2012)

2.1.10 Instrumentação

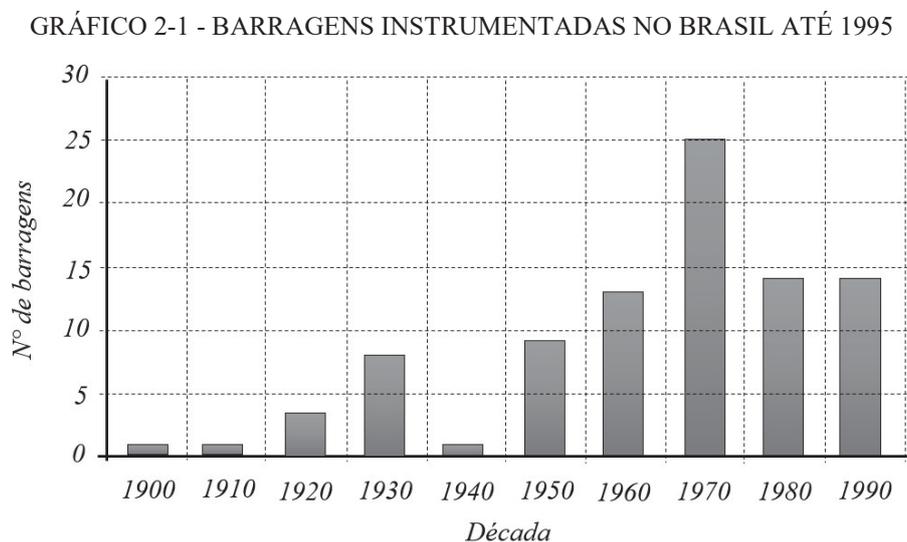
Gaioto (2003) descreve que a instrumentação tem ao longo dos anos se consolidando como parte indispensável em projetos de Barragens, essencialmente com o objetivo principal de monitorar a principais grandezas de uma estrutura imposta a carregamentos e esforços.

Considerando das etapas e informações que devem ser observadas dentro do plano de monitoramento de auscultação, sua abrangência se dá com a manutenção periódica dos instrumentos, frequência de observações das leituras, método melhor empregado para as medições in-loco, especificação técnica de cada instrumento, definição das frequência de leituras, programa de inspeções visuais de

rotina e periódicas, passando para determinação dos valores de controle para constatar com o valores reais lidos durante as fases de construção, enchimento do reservatório e operação (ELETROBRÁS, 2003).

O acervo técnico formado ao longo dos anos nas barragens instrumentadas pode ainda alimentar e aumentar muito mais as informações reais medidas em campo ao longo do tempo, indicando de forma geral o desempenho e comportamento das estruturas construídas em operação (ELETROBRÁS, 2003).

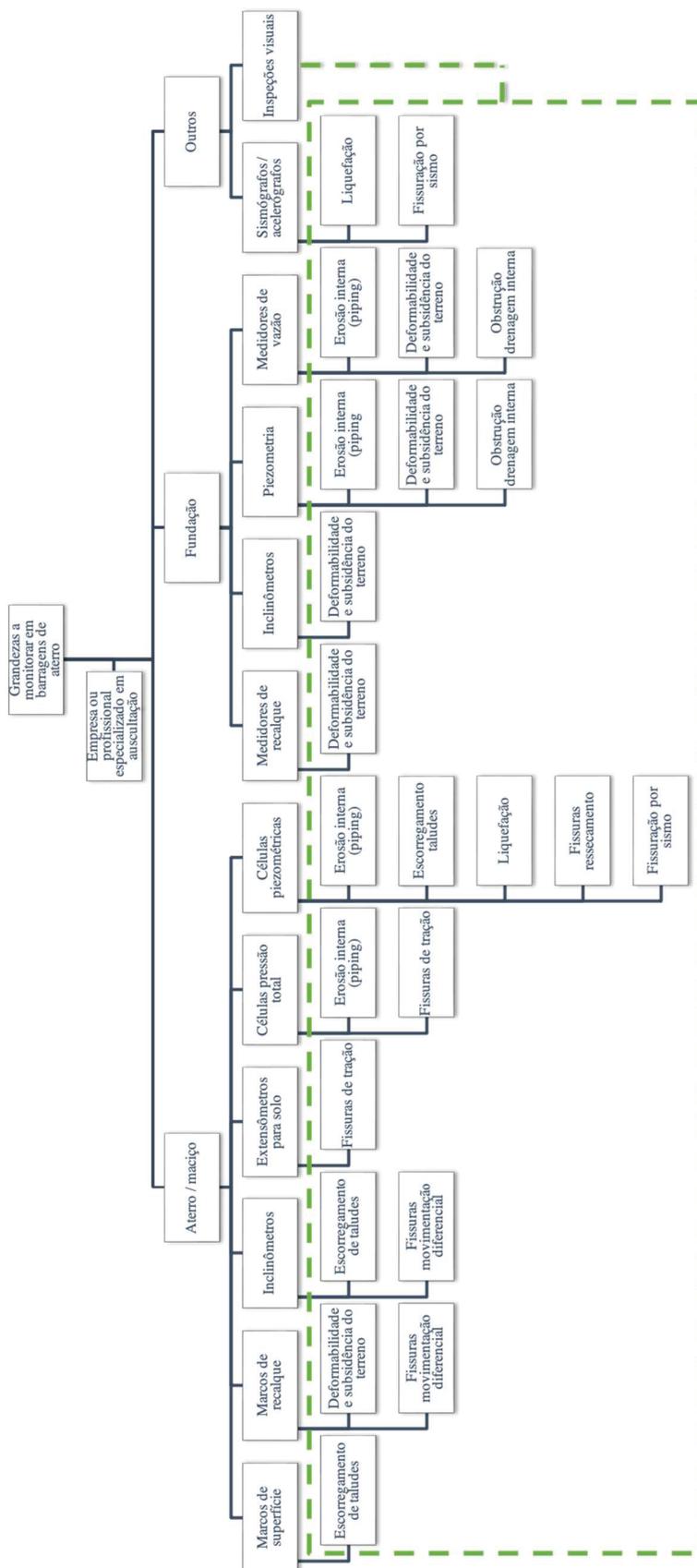
A instrumentação em barragens de terra e enrocamento no território brasileiro tomou destaque e crescimento em 1950, a seguir é apresentado até 1995 o GRÁFICO 2-1 com o histórico de barragens instrumentadas durante sua construção (SILVEIRA, 2006).



FONTE: Silveira (2006).

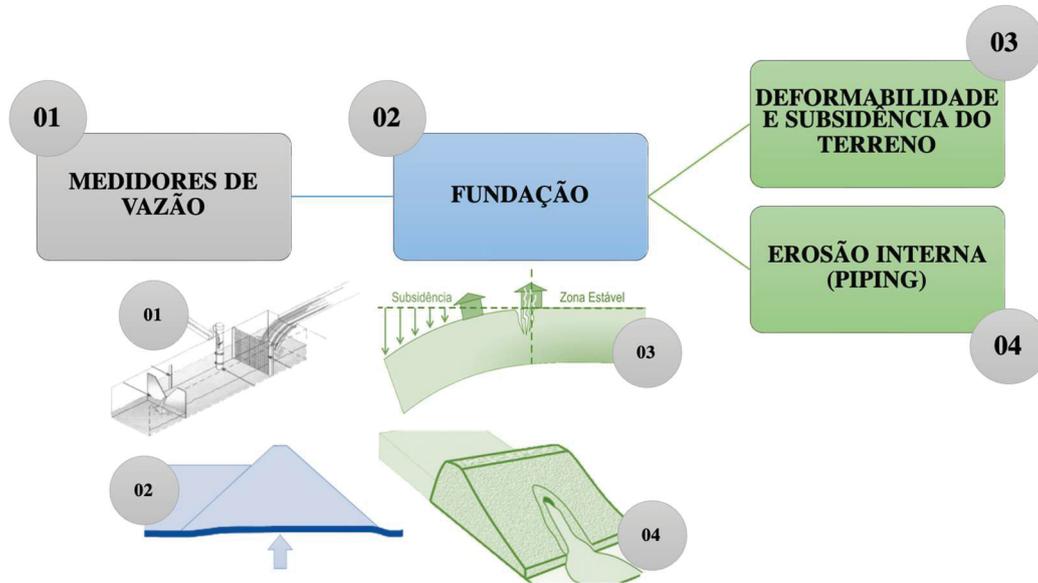
Um plano de instrumentação não deve estar associado apenas a obtenção de leituras para futuramente pensar de como manipular estes dados, de modo a obter resultados conclusivos (SILVEIRA, 2006). Na FIGURA 2-11 é apresentada a correlação dos instrumentos de monitoramento com as grandezas e anomalias que podem ser investigadas e acompanhadas através da observação dos dados de leitura e observações obtidas por inspeções visuais. Na FIGURA 2-12 destaca-se a utilidade do medidor de vazão correlacionado com os itens de investigação, tendo como base a fundação de uma barragem, os principais itens que podem ser avaliados de forma expedita, além do histórico de leituras, é o registro de inspeções visuais. Busca-se durante estas inspeções verificar se há indícios de deformabilidade e subsidência do terreno e/ou algum indício de erosão interna (*piping*), estas anomalias podem ser constadas a princípio observando se há vestígios de material em suspensão, água turva ou material depositado no fundo da caixa do medidor de vazão.

FIGURA 2-11 - GRANDEZAS A MONITORAR EM BARRAGENS DE ATERRO



FONTE: adaptado de Eletrobrás (2003).

FIGURA 2-12 – MEDIDOR DE VAZÃO (INVESTIGAÇÃO)



FONTE: adaptado de Eletrobrás (2003).

O projeto de instrumentação de uma barragem deve ser elaborado questionando o que de fato esperasse obter de dados e informações de monitoramento de uma estrutura, onde a distribuição e quantidade de instrumentos precisa fazer sentido considerando a grandezas a serem monitoradas, bem como os aspectos geométricos e geológicos (SILVEIRA, 2006).

Na FIGURA 2-6 são indicadas as grandezas a serem monitoradas por categoria de barragem com intuito de se obter um diagnóstico do comportamento da estrutura do maciço e sua fundação. Cabe observar a importância das inspeções visuais de campo de modo a confirmar se os dados lidos refletem em algum aspecto de insegurança para empreendimento (SILVEIRA, 2006).

TABELA 2-5 – GRANDEZAS A MONITORAR EM BARRAGENS DE ATERRO

Grandeza	Tipo de barragens			
	barragem de terra	barragem de terra e enrocamento	barragem de terra com galeria enterrada	barragem de enrocamento com face de concreto
pressões neutras no aterro (poropressões)	X	X	X	X
recalques do aterro	X	X	X	X
deslocamentos superficiais (planialtimétricos)	X	X	X	X
subpressões na fundação	X	X	X	
vazões de percolação	X	X	X	X

Grandeza	Tipo de barragens			
	barragem de terra	barragem de terra e enrocamento	barragem de terra com galeria enterrada	barragem de enrocamento com face de concreto
materiais sólidos carregados pelas águas de percolação	X	X	X	-
pressões totais e poropressões nas interfaces	X	X	X	-
deslocamentos diferenciais da junta perimetral	-	-	-	X
deslocamentos entre lajes na região das ombreiras	-	-	-	X
tensões internas no concreto	-	-	-	X (*)
deflexão da laje de montante	-	-	-	X
tensões na interface solo-concreto da galeria	-	-	X	-
recalques ao longo da galeria	-	-	X	-

FONTE: ANA (2016).

(*) barragens de altura superior a 100 m.

Ainda a depender das condições geológicas geotécnicas de uma fundação de uma Barragem de Terra e Enrocamento, se tratando de estruturas de água e energia de pequeno porte, uma média de 10 a 20 instrumentos apenas pode monitorá-las adequadamente (ELETROBRÁS, 2003).

Na TABELA 2-6 indica a recomendação expedita de quantidade de instrumentos a serem implantados em barragens de terra e enrocamento, a classificação fica subdividida por porte da barragem, o que estamos falando é que em barragens maiores de forma razoável é possível monitorá-las com uma faixa de 30 a 70 instrumentos (ELETROBRÁS, 2003).

TABELA 2-6 - QUANTIDADE DE INSTRUMENTOS EM BARRAGENS

Descrição	Quantidade de Instrumentos
Barragem de pequeno porte	de 10 a 20
Barragem de grande porte	de 30 a 70

FONTE: Adaptado de Eletrobrás (2003).

De qualquer maneira, a quantidade deve estar ligada além do tamanho da barragem, as condições geológicas de fundação identificadas e mapeadas durante a construção, que pode acabar exigindo uma

intervenção diferenciada de tratamento geológico geotécnico e conseqüentemente a recomendação que se tenha um monitoramento mais adequado com uma maior quantidade de instrumentos de auscultação (ELETROBRÁS, 2003). A seguir apresentado na TABELA 2-7 observa-se um critério para se estimar quantidades de instrumentos considerando uma correlação direta com a altura das barragens, certamente está correlação tende a variar em função do tipo de instrumento (MAXWELL, 2023).

TABELA 2-7 – ALTURA DA BARRAGEM *versus* NÚMERO DE INSTRUMENTOS

Casos Barragens Estrangeiras	Correlação H:N
Baixas H < 20m	1:3
Altas H > 200m	1:1
Casos Barragens Brasileiras	Correlação H:N
Baixas H < 20m	1:1
Baixas H até 100m	1:1,3
Muito Altas >100m	1:1

FONTE: Adaptado de Maxwell (2023).

H: Altura da barragem

N: Número de instrumentos

Entretanto, de modo a simplificar esta estimativa, afirma-se que uma correlação por volta de H1:N1 é adequadamente aceitável (KANJI E FIGUEIRA, 1990).

A seguir na TABELA 2-8 observam-se as porcentagens com valores médios de peso para quantificar cada tipo de instrumento de monitoramento em barragens (KANJI E FIGUEIRA, 1990).

TABELA 2-8 – ESTIMATIVA DE QUANTIDADE DE INSTRUMENTOS

Instrumento	Média	Faixa de Variação
Piezômetros	50%	(20% a 80%)
Marcos Topográficos	30%	(20% a 40%)
Medidores de Deslocamento	20%	(10% a 30%)
Inclinômetros	5%	(0% a 8%)

FONTE: Adaptado de Kanji e Figueira (1990).

É importante na escolha dos instrumentos observar a sensibilidade, limite do campo de leitura, desvio padrão e precisão do equipamento, pois se estes forem incompatíveis da grandeza que se quer medir, isto pode danificar o instrumento ou até mesmo fornecer leituras anômalas, prejudicando a análise histórica do comportamento da estrutura (SILVEIRA, 2006).

Cinquenta anos ou mais, em geral, é tempo que barragens de terra e enrocamento são construídas para operar, neste caso a instrumentação deve apresentar características robustas com proteções de modo a

suportar todo tempo de operação até que seja necessário a intervenção de manutenção. Para prolongar a vida útil da instrumentação é recomendável periodicamente uma checagem, limpeza e verificação da funcionalidade do mesmo. Por exemplo, instrumentos metálicos (Piezômetros, Medidores de Vazão, etc.) em contato com água com confirmação da existência de sulfetos, estes devem ser construídos com materiais resistentes a este evento, confeccionados com materiais plásticos, fibra de vidro ou o mais convencional em aço inoxidável (SILVEIRA, 2006).

Ao longo dos anos as obras já construídas reúnem um acervo importantíssimo de monitoramento de barragens de terra e enrocamento, possibilitando consolidar parâmetros de projeto, influenciando e contribuindo na compreensão do comportamento para aplicação de melhorias contínuas em obras futuras (CRUZ, 2004).

O histórico de instrumentação de obras já em operação certamente pode ajudar a entender alguns comportamentos na instrumentação quando um instrumento apresenta um comportamento anômalo, muitas vezes assumindo que o instrumento possa estar defeituoso, podendo resultar em consequências graves. A análise de instrumentação deve estar associada em observar o conjunto de leituras dos demais instrumentos adjacentes, bem como em complementação uma inspeção visual pontual, verificando a evidência de alguma anomalia na estrutura. Destaca-se que a utilidade para barragens a instrumentação considerando a manipulação de dados, implantação e planejamento de monitoramento de modo a auxiliar a segurança destas estruturas. À medida que o tempo passa, para as barragens mais antigas, tem sido corrente a proposta de projetos de atualização, de modo a permitir alguns fatores como corrigir alguma deficiente observada ao longo da operação ou até mesmo ter um aumento na capacidade de reserva de água. O monitoramento da instrumentação permite auxiliar na observação do comportamento de uma barragem, sendo um dado importante que podem permitir alterações no projeto (DRIP, 2018).

Na FIGURA 2-13 e FIGURA 2-14 há uma lista indicando siglas, simbologia em planta e simbologia em seção para instrumentação de monitoramento de barragens, esta nomenclatura pode variar a depender da empresa projetista que detalha os projetos, entretanto pode-se utilizar a referência publicada no “II Simpósio sobre Instrumentação de Barragens – Volume I”. Convencionalmente para os medidores de vazão utiliza-se a simbologia com um retângulo recortado na parte superior em formato de “V”, esta simbologia é válida para todos os tipos de medidores de vazão, vertedouro triangular, retangular, parshal, tubo dreno e etc. (CBGB, 1996).

FIGURA 2-13 - INSTRUMENTAÇÃO (SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA)

Nome do Instrumento	Sigla	Símbolo em Planta	Símbolo em Seção	Observação
Acelerógrafo	AC			Válido para Acelerômetro
Base para Alongâmetro	BA			Válido para Tensotast
Base para Alongâmetro (Par de Fios)	BA			
Base para Convergência	BC			
Base de Coordenômetro	CO			
Cadeia Clinométrica	CL			Válido para Eletrônível ou Clinômetro Isolado
Célula de Carga para Tirantes	CC			
Célula Hidráulica de Recalque (Caixa Sueca)	CS			
Célula de Pressão Total	CP			
Deformímetro (Extensômetro para Concreto)	DF			
Deformímetro Corretor (No Stress Strain Meter)	DC			
Estação Topográfica	ET			Para controle de deslocamento horizontal e /ou vertical
Extensômetro (Simples ou Múltiplo)	ES EM			Válido para qualquer direção
Inclinômetro	IN			
Marco Superficial	MS			Para controle de recalques e/ou deslocamento horizontal
Medidor Elétrico de Junta	MJ			
Medidor de Nível d'água	NA			

FONTE: adaptado de CBGB (1996).

FIGURA 2-14 - INSTRUMENTAÇÃO (SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA)

Nome do Instrumento	Sigla	Símbolo em Planta	Símbolo em Seção	Observação
Medidor de pressão intersticial	MI			
Medidor de Recalques	KM MM MR BR			Tipo KM Tipo Magnético Tipo Telescópicos Tipo Bureau of Reclamation
Medidor de Vazão	MV			Vertedouro Triangular, Retangular, Parshal, Tubo, etc.
Medidor Triortogonal	MT			
Painel de Leitura	PL			Válido para caixa seletora
Pêndulo Direto	PD			Vide Base Coordinômetro
Pêndulo Invertido	PI			Vide Base Coordinômetro
Piezômetro de Tubo	PZ			
Piezômetro Elétrico ou Pneumático ou Hidráulico	PE PN PH			PE – Válido para Piezômetros Elétricos de corda vibrante ou de resistência
Sismógrafo	SM			Válido para Sismômetro
Referencial de Nível	RN			
Roseta de Deformímetros	RO			
Roseta de Tensômetros para Concreto	RT			
Tensômetros para Armadura	TA			
Tensômetro para Concreto	TC			
Termômetro para Concreto	TE			Embutido ou de superfície
Termopar	TP			

FONTE: adaptado de CBGB (1996).

2.1.11 Medidores de vazão

Para medir as vazões que passam pela fundação de suporte de uma barragem e pelo maciço compactado, utiliza-se um dispositivo, o denominado “Medidor de Vazão”, as águas podem ser canalizadas e direcionadas para um ponto de medição. O Medidor do tipo triangular é o mais utilizado em barragens brasileiras (GAIOTO, 2003).

Dispositivos e formas para efetuar o monitoramento de infiltrações por uma barragem necessitam ser indispensáveis com parte integrante da campanha de monitoramento e plano de segurança do empreendimento. Em complemento a implantação destes dispositivos para efetuar medição de vazões, devem acompanhar junto destas campanhas as eficientes inspeções visuais, que podem fisicamente detectar as infiltrações (SILVEIRA, 2006).

De forma emergencial e preliminar recomenda-se medir as infiltrações de forma expedita quando possível, com ferramentas como, por exemplo, baldes de medição de volume conhecido, cronômetros, fitas métricas e mangueiras. Também ter equipamentos que possam medir a temperatura da água pode ser útil. Todas as informações, mesmo que preliminares, necessitam ser registrados por relatórios de coleta de dados com fotografias, croquis contendo a localização (ICOLD, 2003).

Os medidores de vazão são implantados em barragens para medir a quantidade de infiltração de águas que percolam pelos maciços e fundação. A instalação destes dispositivos é preferencialmente colocada em um ponto onde se consiga reunir toda água de infiltração. É recomendado testar a composição química da água, pois, os resultados podem indicar dissolução de materiais que possam estar sendo carregados da barragem (BUREAU, 1987).

A única porção de água de infiltração que pode ser medida de forma direta são aquelas que emergem do solo a jusante pela função somadas as águas advindas do sistema interno de drenagem da barragem (tapetes horizontais, drenos de pé, valas drenantes, etc.). Estimativas podem ser levantadas por métodos numéricos computacionais considerando os valores médios de permeabilidade dos materiais (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2004).

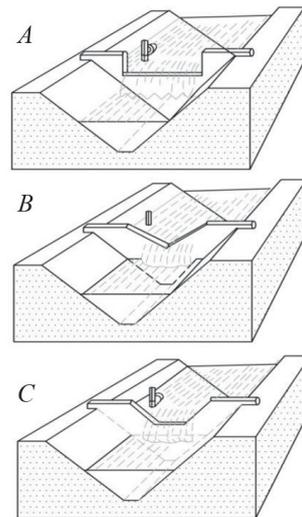
Estas águas podem ser cercadas e direcionadas para um único ponto de medida para poder permitir o monitoramento da vazão total, bem como observar por meio de inspeção visual se há algum indício de carregamento de finos que possam ser dos materiais do aterro da barragem. Importante para esta análise sempre observar outros instrumentos de medida próximos instalados na barragem como, por exemplo, os piezômetros e medidores de nível de água. De modo que uma das utilidades de uma barragem é armazenar água de forma segura, considerando sua capacidade de volume, mediante a este fato a percolação do gradiente hidráulico de um reservatório passando pelo maciço e sua fundação é normal,

porém, observando as propriedades dos materiais e condutividade hidráulica. A infiltração deve ser de forma controlada de modo que não consiga provocar qualquer indício de erosão interna no interior do corpo da barragem, poderia causar uma espécie de tubulação (piping) colaborando para perda de resistência do material. (SILVEIRA, 2006).

Considerando o número de barragens com rompimento pelo fenômeno de erosão interna (piping), destaca-se a importante de controle e monitoramento de vazões observando o enchimento do reservatório e ao longo de sua operação. Uma variedade de instrumentos pode medir infiltrações, sendo o mais comum de estes dispositivos de medição são os medidores de vazão (DRIP, 2018).

Diante da obtenção de valores acima dos esperados para medição das vazões que saem da barragem, pode ser necessário, levantamentos geofísicos que podem indicar a direção do fluxo do dentro dos aterros e fundações. A seguir é apresentado na FIGURA 2-15 e TABELA 2-9 os medidores de vazão do tipo (a) retangular, (b) triangular, e c) trapezoidal, usualmente são os mais utilizados em barragens para medir vazões que percolam pelo maciço de uma barragem e suas fundações (DRIP, 2018).

FIGURA 2-15 - TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO



FONTE: DRIP (2018).

TABELA 2-9 - CAPACIDADE E FAIXA RECOMENDADA DE MEDIÇÕES

Legenda	Tipo de Medidor	Faixa recomendada de medição - Vazão total (l/min)	Capacidade de medição - Vazão total (l/min)	Capacidade de medição - Vazão total (l/s)
A	Retangular	0l/min a 40.000 l/min	40.000 l/min	670 l/s
B	Triangular	0l/min a 600 l/min	8000 l/min	130 l/s
C	Trapezoidal (Cipolletti)	0l/min a 40.000 l/min	40.000 l/min	670 l/s

(B) – Recomenda-se para a medição de vazões abaixo de 1.800 l/min (30l/s) para medidores do tipo triangular.

FONTE: adaptada de Silveira (2006).

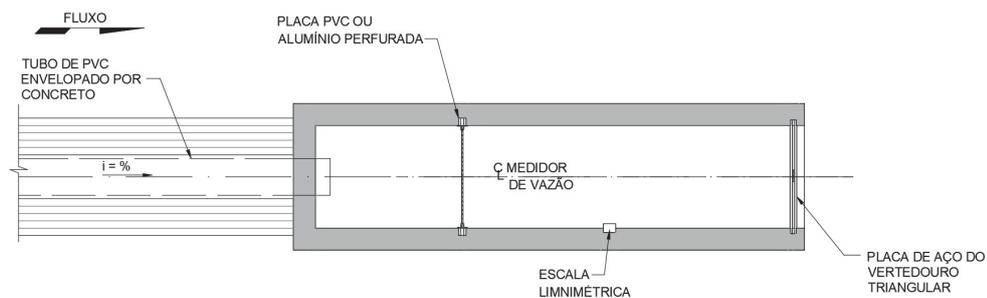
2.1.12 Medidor de vazão triangular

Para que instalação do medidor de vazão triangular proporcione resultados confiáveis, alguns elementos são fundamentais para a medição que são: placa metálica com geometria de abertura triangular instalado no término da bacia do vertedouro transversalmente ao fluxo de água. Para que o líquido chegue à placa de medição com velocidade adequada para leitura é necessário a implantação de um dispositivo tranquilizador de fluxo, que pode ser um dissipador com parede corta fluxo ou uma placa perfurada de inox / PVC rígido. O acabamento deve ter superfície hidráulica o mais linear possível. A bacia de contenção do medidor de vazão deve ter seu comprimento maior igual a 10 vezes da largura do canal. Importante também atentar-se a posição da placa de medição em relação ao fundo do canal, para não trabalhar afogado (SILVEIRA, 2006).

Os medidores de vazão do tipo triangular têm uma capacidade máxima de leitura de 8000l/min equivalente a (130 l/s), entretanto, é indicado que este funcione numa faixa de leituras de 0l/min a 600l/min para medidores do tipo triangular, em particular recomenda-se sua utilização para medições inferiores a 1800 l/min (30l/s) (SILVEIRA, 2006).

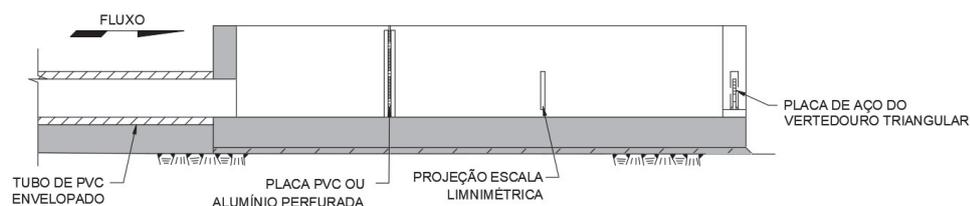
Apresentado na FIGURA 2-16, FIGURA 2-17 e FIGURA 2-18 respectivamente a planta, cortes e vista dos elementos que fazem parte da estrutura do medidor de vazão triangular, indicando a placa tranquilizadora, placa de vertimento e escala de medição limnimétrica.

FIGURA 2-16 - MEDIDOR DE VAZÃO (PLANTA)



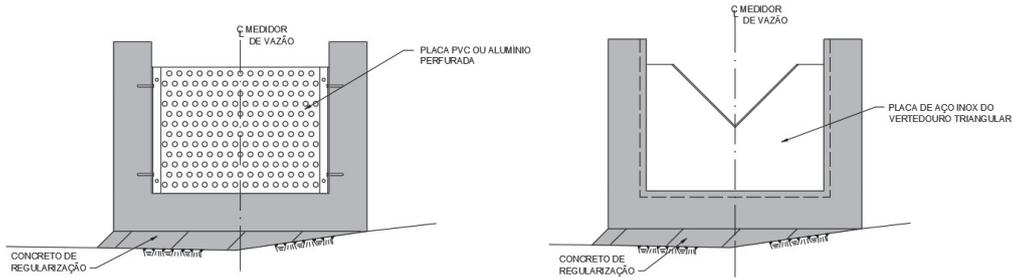
FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

FIGURA 2-17 - MEDIDOR DE VAZÃO (PERFIL LONGITUDINAL)



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

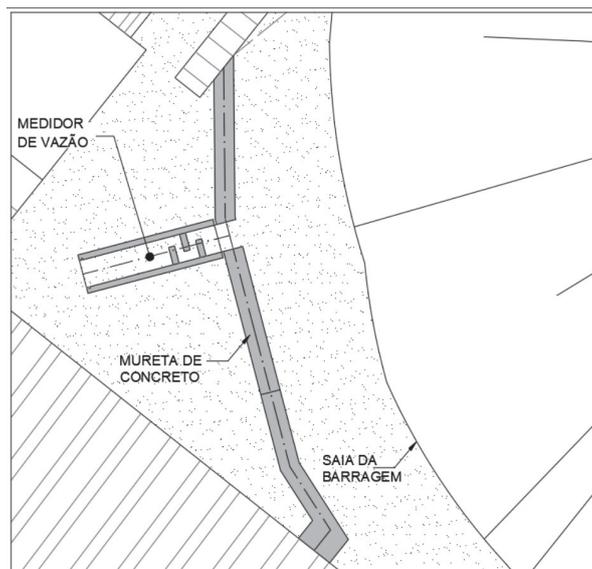
FIGURA 2-18 - MEDIDOR DE VAZÃO (CORTE E VISTA)



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

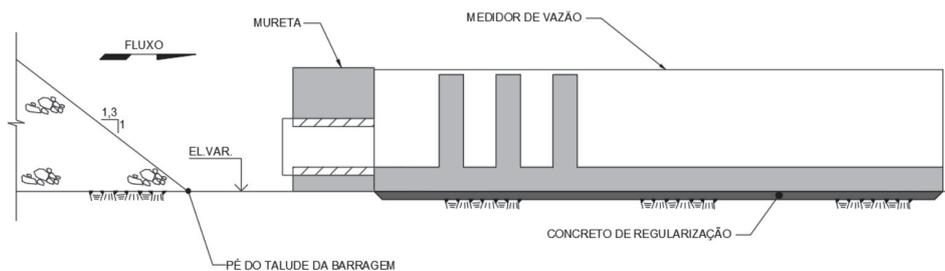
Em regiões confinadas com encosto (abraço) da barragem a alguma estrutura de concreto, a jusante da barragem de terra e enrocamento é possível executar uma mureta acompanhado o pé do talude da barragem, executando-se o medidor de vazão na região mais adequada para saída de drenagem conforme representado abaixo na FIGURA 2-19, FIGURA 2-20 e FIGURA 2-21.

FIGURA 2-19 - MEDIDOR DE VAZÃO COM MURETA EXTERNA



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

FIGURA 2-20 - MEDIDOR DE VAZÃO COM MURETA EXTERNA



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

FIGURA 2-21 - MEDIDOR DE VAZÃO COM MURETA EXTERNA

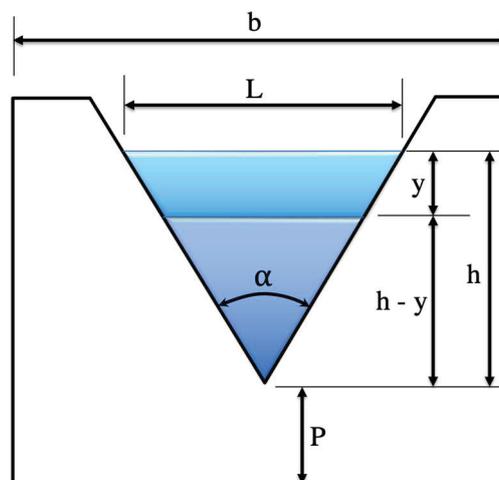


FONTE: Intertechne (2022).

Para calcular as vazões com medidores de vazão triangulares utiliza-se a equação (1) a seguir observando as dimensões da FIGURA 2-22:

$$Q = \frac{8}{19} \cdot Cd \cdot \sqrt{2g} \operatorname{tg}(\alpha / 2) h^{5/2} \quad (1)$$

FIGURA 2-22 - ESQUEMA DO MEDIDOR TIPO TRIANGULAR



FONTE: adaptado de Silveira (2006).

C_d = coeficiente de vazão (Bazin, Rehbock, Francis ou Kindsvater & Carter (MELLO PORTO, 2001).

g = aceleração da gravidade;

α = ângulo de abertura do medidor

h = altura da lâmina vertente em relação ao vértice do medidor

O medidor mais utilizado é o com o ângulo de 90° na placa, onde pode-se calcular as vazões pelas equações de Thompson ou Gouley e Crimp.

$$\text{Thompson I: } Q = 1,46 \cdot h^{5/2} \quad (2)$$

$$\text{Thompson II: } Q = 1,40 \cdot h^{5/2} \quad (3)$$

$$\text{Gouley e Crimp: } Q = 1,32 \cdot h^{5/2} \quad (4)$$

Para que os resultados sejam avaliados, devem satisfazer os seguintes critérios limites que são:

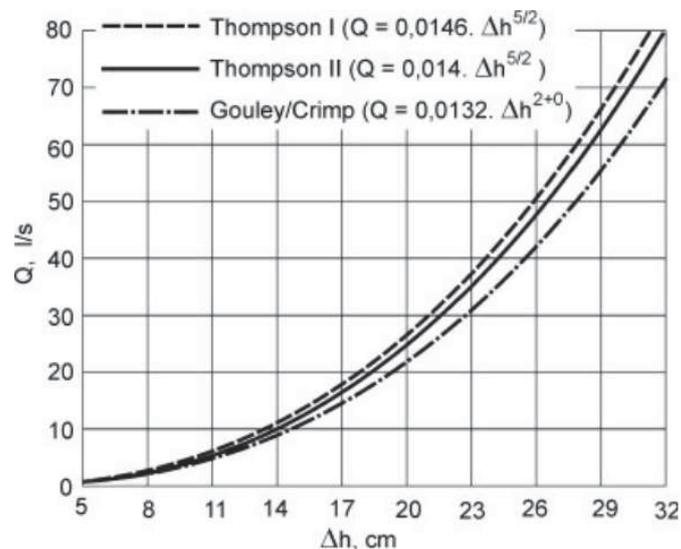
$$0,05 < h < 0,38\text{m}$$

$$P > 3h$$

$$b > 6h$$

Para medidores do tipo triangulares com abertura de 90° , em decorrência das formulas apresentadas é possível obter através da FIGURA 2-23 e forma gráfica a vazão em litros por segundo por correlação:

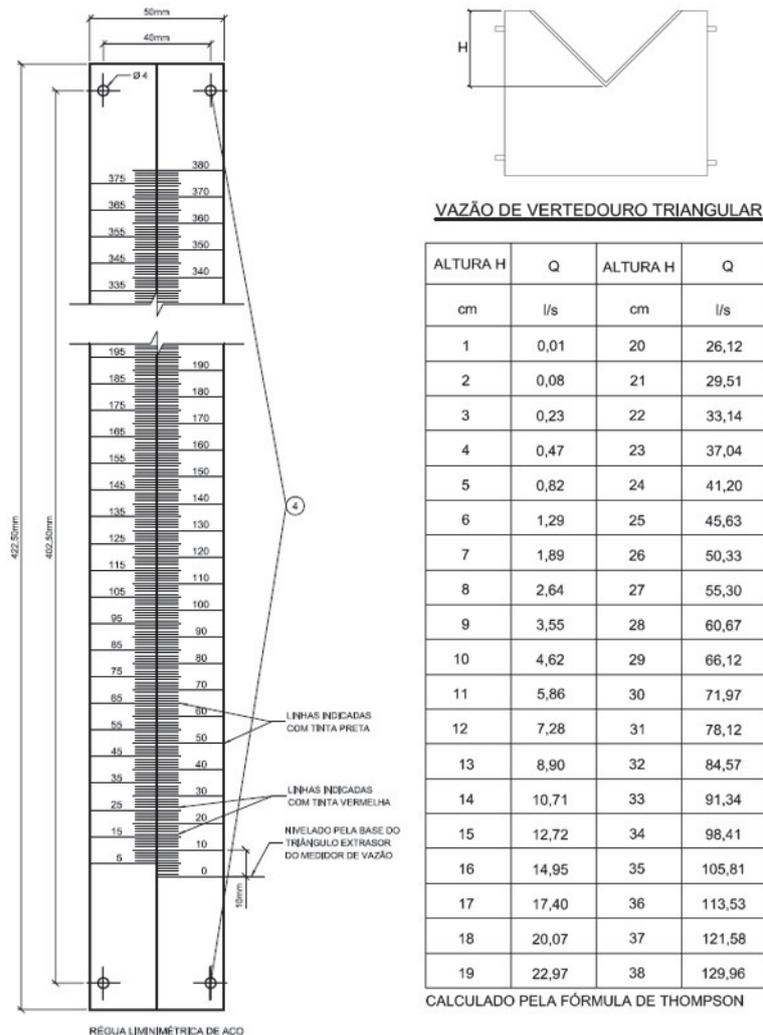
FIGURA 2-23 - MEDIDOR TRIANGULAR ABERTURA 90°



FONTE: Silveira (2006).

A FIGURA 2-24 indica o exemplo de cálculo pela fórmula de Thompson com resultados tabelados correlacionados com as medições através da leitura da régua limnimétrica para obtenção da vazão do vertedouro triangular.

FIGURA 2-24 - LEITURA DA RÉGUA (THOMPSON)



FONTE: Intertechne (2022).

Durante a campanha de leituras nos medidores de vazão de uma barragem é preciso estar atento a coloração da água, se a mesma está saindo limpa ou turva, pois, além de atenção a aumento de vazões, deve-se verificar quantidade de sedimentos sugerindo um possível carreamento de sólidos de origem do núcleo da barragem (SILVEIRA, 2006).

Na FIGURA 2-25 é apresentado um exemplo de um medidor de vazão em operação, com detalhe este executado com muretas em concreto, com uma canaleta tipo meia-cana a jusante para direcionamento das águas ao sistema de drenagem pluvial.

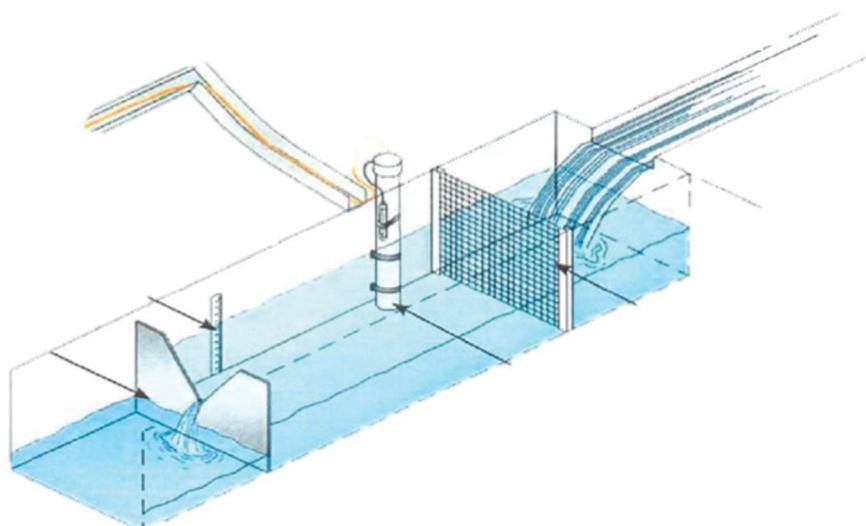
FIGURA 2-25 - MEDIDOR DE VAZÃO TRIANGULAR



FONTE: Intertechne (2022).

Na FIGURA 2-26 é um exemplo representando um medidor de vazão com sistema de leitura automatizados para transmissão de dados, permitindo o monitoramento de forma remota das leituras de vazão, este tipo de dispositivo tem sido comercializado por empresas especialistas em sistemas de monitoramento de barragens.

FIGURA 2-26 - ESQUEMA MEDIDOR DE VAZÃO



FONTE: FEMA (2022).

Referente a manutenção de instrumentos, algumas ações devem ser tomadas durante as inspeções de rotina do empreendimento, no caso os medidores de vazão necessitam ser totalmente limpos

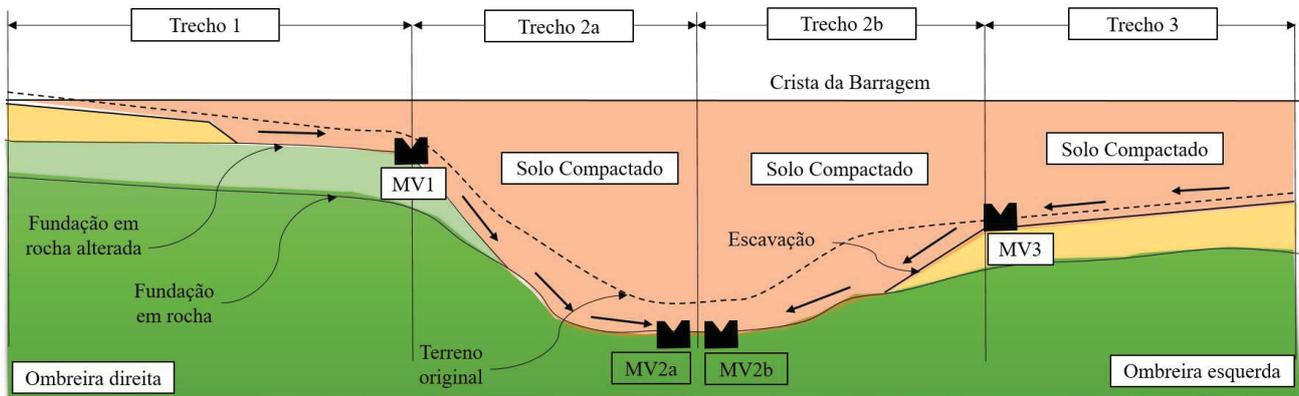
de acúmulo de sedimentação e de qualquer vegetação que venham se acumular na caixa de medição, para não ser impactada as medições e o escoamento. Também os medidores estando todos identificados facilita as inspeções e leituras (ANA, 2016).

2.1.13 Dique intercepto

A medição das vazões de infiltração pela fundação e pelo maciço da barragem constitui uma grandeza importante a ser supervisionada na fase de enchimento do reservatório e no período de operação. As observações de crescimento abrupto de água percolada e a eventual detecção de carreamento de material fino refletem alguma anomalia no trecho de influência do medidor de vazão. As posições de instalação dos medidores de vazão de uma barragem necessitam de uma avaliação previa da área de contribuição que se deseja monitorar (SILVEIRA, 2006).

Na FIGURA 2-27 de forma esquemática é indicada a depender da topografia da fundação como pode-se dividir os trechos de contribuição para medir as vazões de uma barragem.

FIGURA 2-27 - EXEMPLO DE TRECHOS DE CONTRIBUIÇÃO



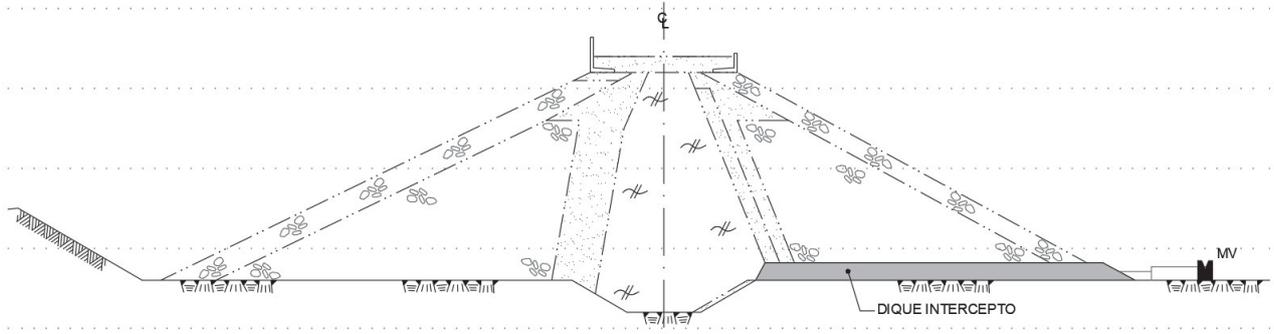
FONTE: o autor (2022).

O medidor de vazão visa prover especificamente dados e informações para avaliação de infiltrações que podem ocorrer pelo maciço e fundação. Para que se possa dividir as áreas de contribuição e limitar os trechos de medições, é necessário executar diques interceptos construídos com solo compactado, geralmente estes dispositivos cortam interrompendo o tapete drenante para poder direcionar a água coleta até a bacia de captação do medidor de vazão (SILVEIRA, 2006).

Na FIGURA 2-28 e FIGURA 2-29 é apresentado um exemplo do selo do dique intercepto interligado desde a vedação do maciço compactado até o pé de jusante da barragem, com intuito barrar às

águas em uma determinada bacia de contribuição no contato da fundação com o maciço da barragem (O AUTOR, 2022).

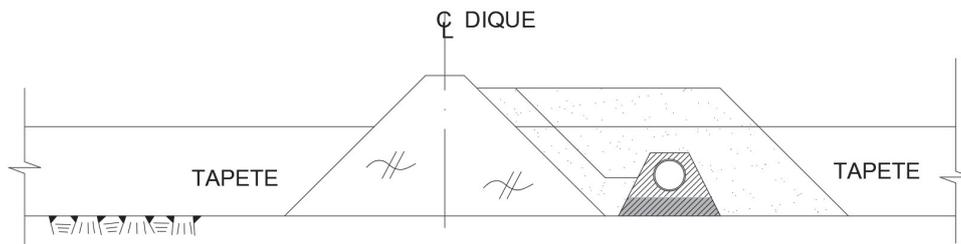
FIGURA 2-28 - DIQUE INTERCEPTO EM BARRAGEM DE TERRA



FONTE: o autor (2022).

A ligação da saída do dique intercepto deve ser bem executada junto ao núcleo de vedação para não haver fuga de água para o lado extremo da bacia interna que se pretende captar. A altura do dique intercepto deve ser o suficiente para cortar o tapete horizontal ou material disposto a jusante do eixo da barragem. O dique intercepto pode acompanhar o terreno, desde que no seu alinhamento não haja uma depressão capaz de transbordo do dispositivo (FEMA, 2022).

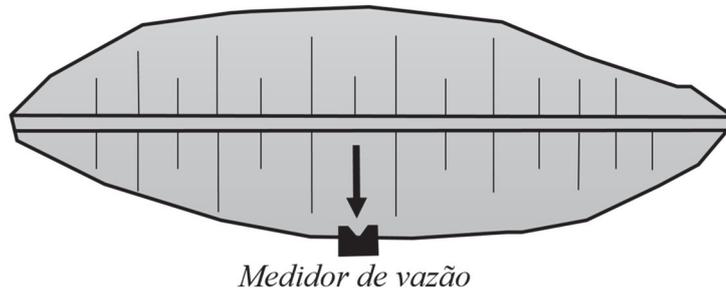
FIGURA 2-29 - DIQUE INTERCEPTO (DETALHE)



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

Para barragens de pequeno porte, quando o nível de jusante não chega no pé do talude de jusante da barragem, é possível instalar um único dispositivo conforme exemplo da FIGURA 2-30 e FIGURA 2-31 para medição da contribuição de ambas ombreiras, importante antes da implantação verificar o nível de jusante durante a época de chuvas, ou verificar se no local de instalação do medidor de vazão não seja uma depressão, ou ponto de acúmulo de água onde o dispositivo trabalhe afogado dificultando, ou até impedindo que, seja feita qualquer tipo de medição (ANA, 2016).

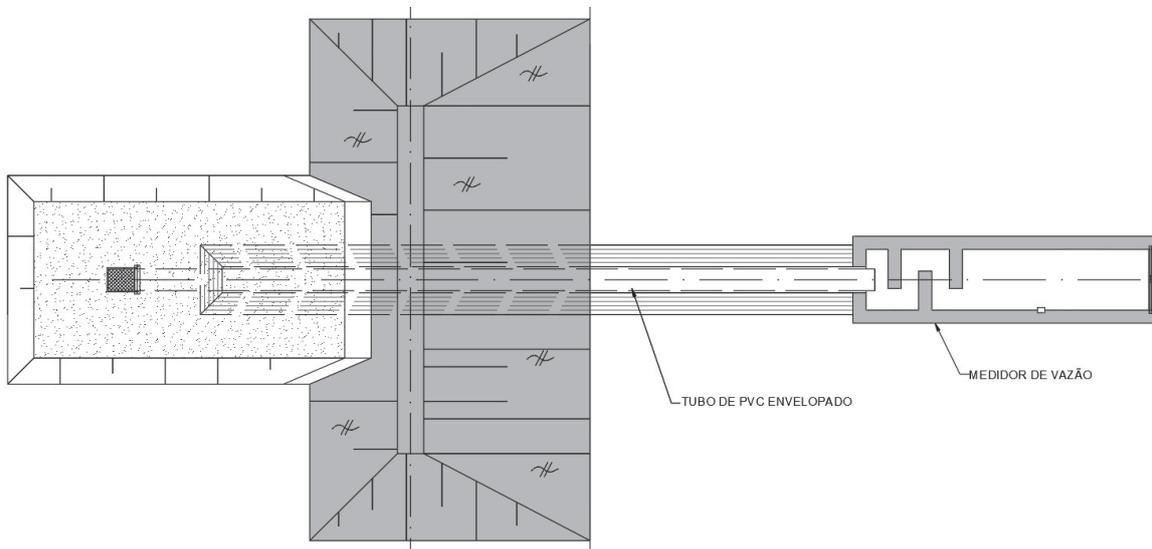
FIGURA 2-30 - MEDIDOR ÚNICO



FONTE: Adaptado de Silveira (2006).

Por experiência do autor em alguns projetos, destaca-se a importância e alguns cuidados com a área de captação do medidor de vazão, onde se recomenda que envolto do tubo de captação para não haver colmatação ou entrada de sólidos que possam entupir a tubulação, a entrada do tubo e protegida com material filtrante com tela de nylon ou bidim. Também nesta região de entrada de água pelo tubo é recomendável executar uma bacia de captação com material granular (transição média) (INTERTECHNE, 2022).

FIGURA 2-31 - MEDIDOR ÚNICO (DETALHE)

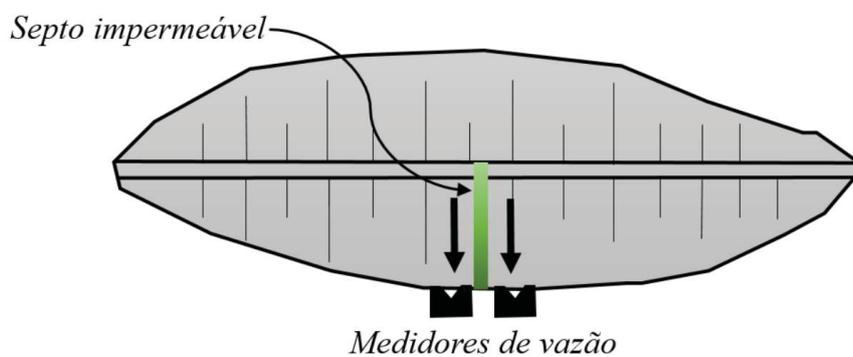


FONTE: Adaptado de Intertechne (2022).

Barragens que indicam a necessidade de instalação de um medidor em único ponto, de modo a dividir a bacia de contribuição podem ser instalados dois medidores de vazão com a construção de um dique intercepto central conforme representado na FIGURA 2-32 e FIGURA 2-33, esta divisão

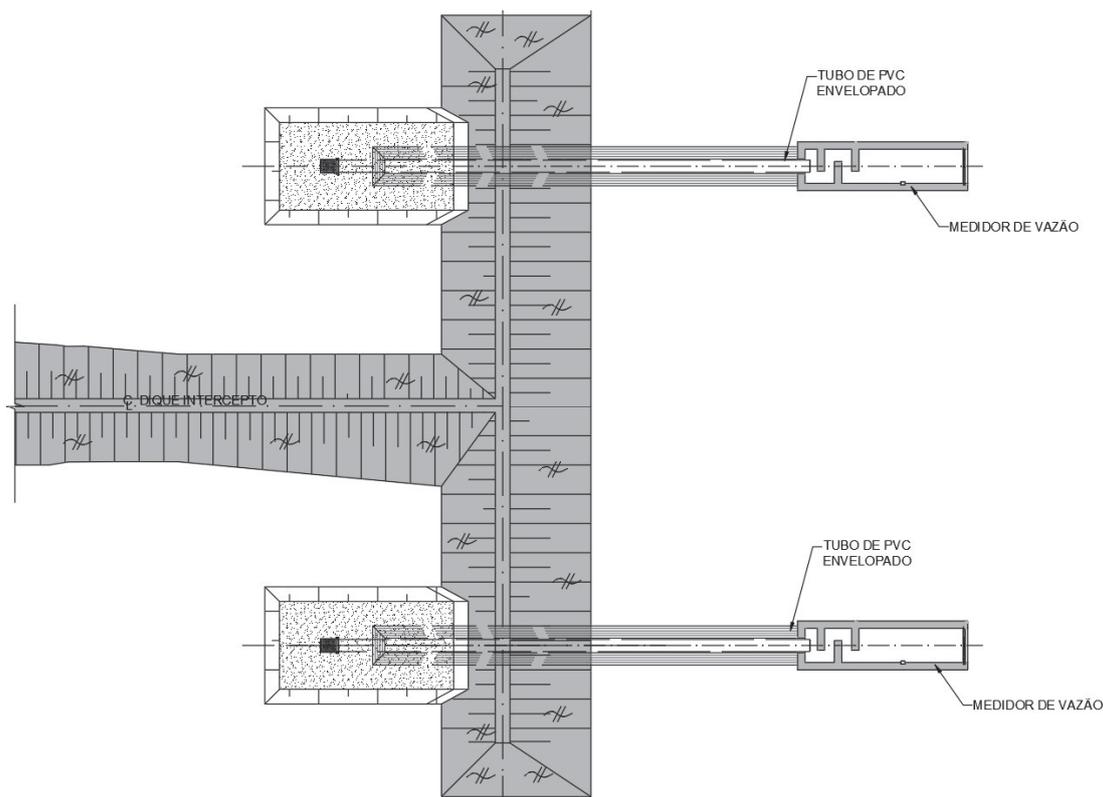
pode avaliar com mais precisão de qual lado da barragem pode haver uma concentração de água advinda do maciço da barragem ou fundação (SILVEIRA, 2006).

FIGURA 2-32 - MEDIDORES DIQUE INTERCEPTO CENTRAL



FONTE: adaptado de Silveira (2006).

FIGURA 2-33 - MEDIDORES DIQUE INTERCEPTO CENTRAL (DETALHE)

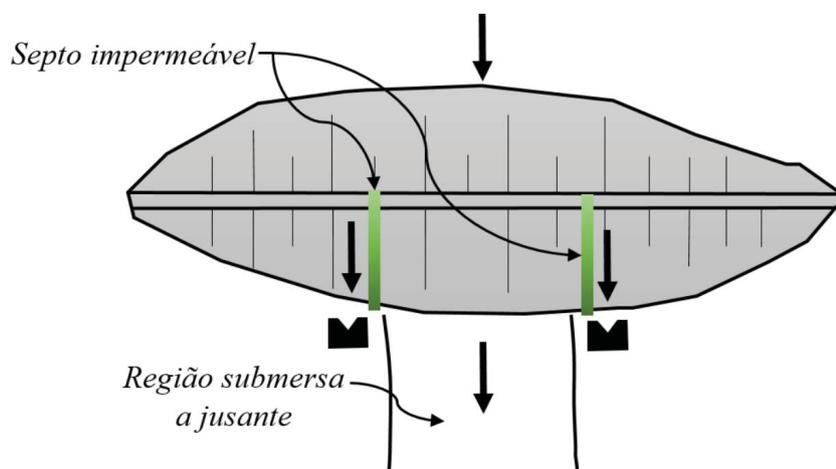


FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

É comum em barragens onde há enseadeira no leito rio, ou mesmo com nível normal de jusante em contato com o espaldar de jusante representado no exemplo da FIGURA 2-34, neste caso

os medidores de vazão se limitam as margens medindo somente as contribuições da margem esquerda e margem direita da barragem (SILVEIRA, 2006).

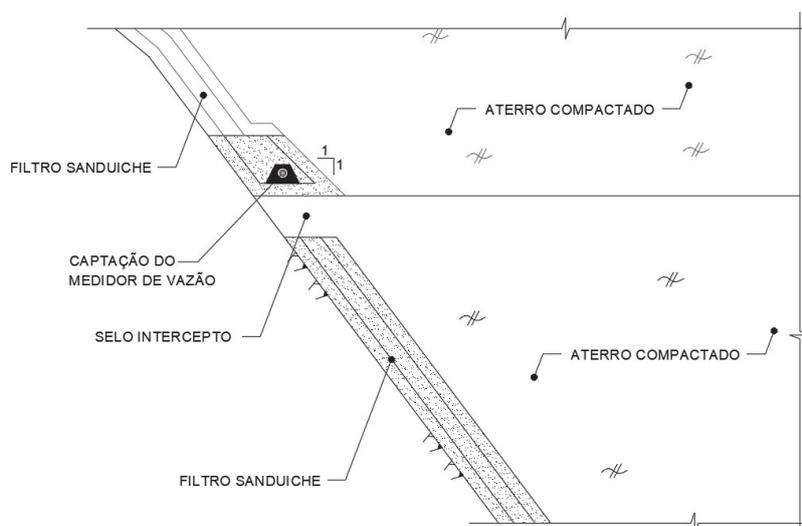
FIGURA 2-34 - MEDIDORES LIMITADOS A ÁREA ALAGADA A JUSANTE



FONTE: adaptado de Silveira (2006).

Segundo a representação da seção da FIGURA 2-35, a depender da inclinação das ombreiras, é possível executar o dispositivo interceptor com o alinhamento da própria camada de aterro compactado junto a ombreira cortando o tapete na elevação definida para captação das águas para o medidor de vazão. Na elevação escolhida para o selo, a camada de compactação do aterro é interrompida deixando-se de executar o tapete numa janela de aproximadamente 1 m de espessura (INTERTECHNE, 2022).

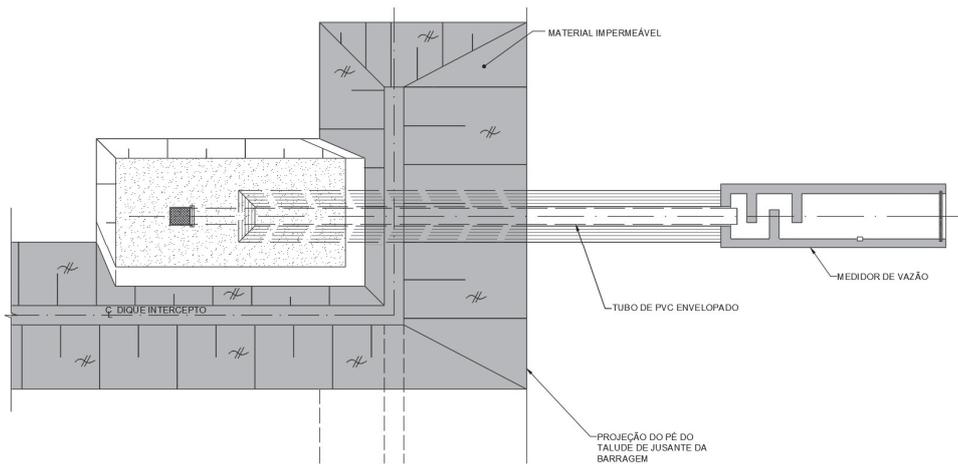
FIGURA 2-35 - SELO INTERCEPTO EM OMBREIRA (DETALHE)



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

De modo a garantir que não haja fuga de água pela lateral do tramo de fechamento, conforme mostra a FIGURA 2-36, o dique intercepto em seu alinhamento no sentido da projeção do pé do talude de jusante da barragem, deverá encontrar na topografia a curva de nível imediatamente à ombreira na mesma elevação da crista do dique intercepto (INTERTECHNE, 2022).

FIGURA 2-36 - MEDIDOR LIMITADO A ÁREA ALAGADA A JUSANTE



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

Para que a tubulação de PVC rígido ou aço não sejam danificados, pode ser executado um envelopamento em concreto semelhante ao exemplo da FIGURA 2-37, o comprimento deste envelopamento ficará entre a bacia de captação até entrada da caixa tranquilizadora do medidor de vazão (INTERTECHNE, 2022).

FIGURA 2-37 - TUBULAÇÃO NA REGIÃO DE CAPTAÇÃO



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

2.1.14 Surgências de água

Descreve-se com uma surgência de água como uma anomalia, considerando que no momento em que as águas que infiltram no maciço do aterro da barragem e fundações percolam e com aparições na superfície em locais não previstos. O fenômeno de *sand boil*, acontece no momento em que a água que percola pela fundação da barragem surge à superfície com gradiente bem superior ao gradiente crítico do material (aproximadamente sempre próximo de 1,0). Esse fenômeno é perigoso em locais com fundação totalmente composta por solo, pois, pode resultar em erosão regressiva (*piping*) (FEMA, 2015).

A seguir na FIGURA 2-38 observa-se carreamento de material com coloração da água indicando partículas em suspensão.

FIGURA 2-38 - CARREAMENTO DE MATERIAL EM SUSPENSÃO



FONTE: Intertechne (2022).

Importante observar as condições de dimensionamento observando atentamente os critérios de filtragem que se baseiam fundamentalmente nos estudos feitos por Sherard e Dunningam (1989), que estabelece valor máximo para o D₁₅ do filtro de modo a proteger o material de base adjacente já apresentados no capítulo 2.1.8 de Sistemas de drenagem interna.

Para evitar ocorrências do *sand boil*, pode-se prever um filtro invertido composto por materiais filtrantes, sequencialmente em contato com o material da fundação ou contato executando na sequência camada de areia, camada de pedrisco, camada de brita e camada de pedra de mão, as espessuras serão aquelas que possibilitem um adequado processo executivo, mesmo que no dimensionamento do filtro

invertido as espessuras necessárias sejam inferiores. Uma das funcionalidades deste dispositivo de proteção é gerar tensões efetivas positivas no solo, com isso o gradiente de saída, passará se dar pelo material mais permeável (e não mais pelo material de base) e ficará abaixo do gradiente crítico nesse material do dreno invertido (MASSAD, 2010).

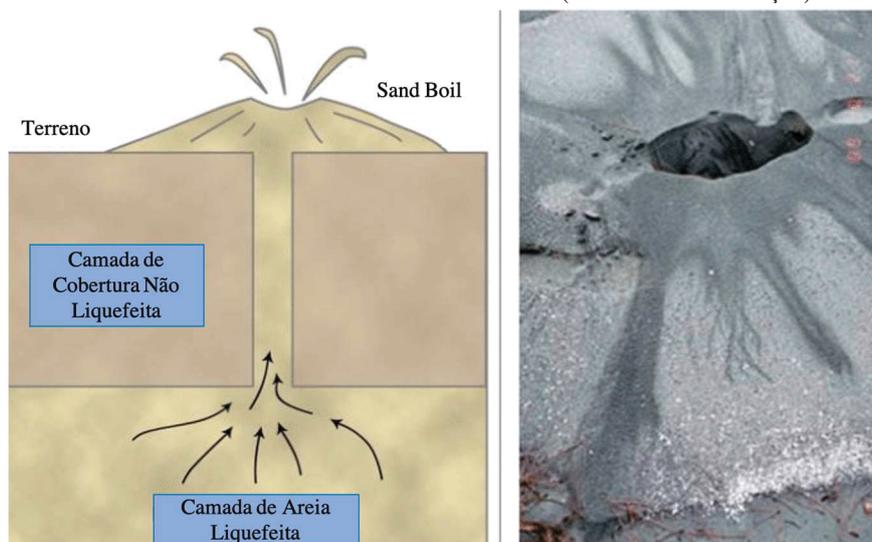
Na FIGURA 2-39 e FIGURA 2-40 são apresentados exemplos de ocorrência de *sand boil* com carreamento de material sólido, com efeito tipo areia movediça.

FIGURA 2-39 - CARREAMENTO DE MATERIAL SÓLIDO



FONTE: FEMA (2015).

FIGURA 2-40 - FENÔMENO SAND BOIL (AREIA MOVEDIÇA)



FONTE: Larisch (2019).

O fator de segurança com relação ao *sand boil* pode ser calculado pela expressão abaixo:

$$FS = \frac{i_{critico}}{i} = \frac{\gamma_{sub} h}{\gamma_w \Delta h} \quad (5)$$

Onde;

FS – Fator de segurança mínimo de aceitação;

γ_{sub} – Peso específico submerso, considerado como 8 kN/m³;

h – Espessura da camada de areia (*sand boil*);

γ_w – Peso específico da água, 10 kN/m³;

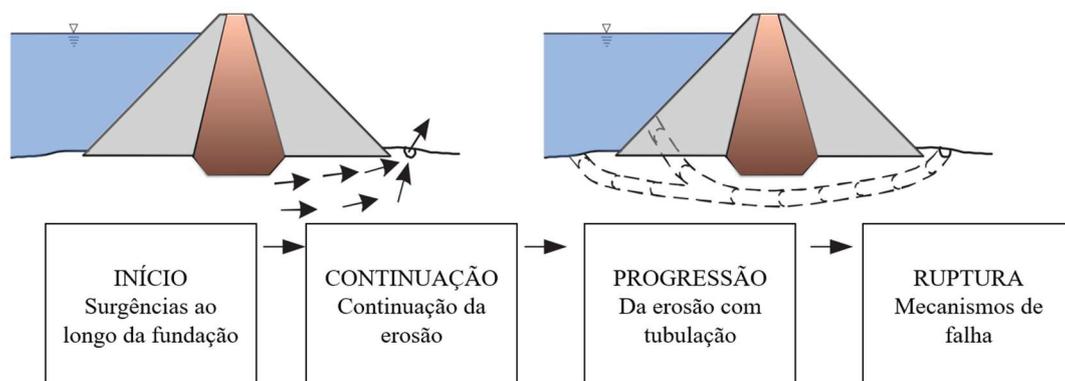
Δh – Perda de Carga no *sand boil*.

Optar pela adoção de um filtro invertido como solução definitiva nestes casos, é basicamente aceitar conviver com altos valores de subpressão, mas eliminando a ocorrência de novos pontos de *sand boil* ao gerar um incremento de tensão efetiva sobre a camada de solo arenoso e considerar uma transição granulométrica que evitará o carreamento de material de base. Grande parte das surgências podem estar ligadas a colmatação e entupimento do sistema de drenagem interno ou algumas falhas, construção e detalhamento de projeto. É possível identificar visualmente as surgências, pois, podem aparecer em forma de encharcamento nos taludes ou região de jusante (ANA, 2012).

Este fenômeno pode alterar as propriedades de resistência dos aterros, como, por exemplo, a perda de coesão entre partículas de solo, podendo influenciar na estabilidade do maciço em consequência de uma erosão interna (ANA, 2016).

Na FIGURA 2-41 observa-se a ordem da ocorrência da progressão de uma erosão pela fundação, tendo seu início com surgência ao longo da fundação, tendo continuação da erosão na sequência, logo após a progressão da erosão com forma de tubulação até por fim resultar em mecanismo de falha com ruptura da estrutura da barragem.

FIGURA 2-41 - PROGRESSÃO DA EROSÃO



FONTE: adaptado de FELL (2005).

Mesmo que a localização da aparição de uma surgência de água a jusante de uma barragem esteja mais afastada, esta deve ser imediatamente monitorada e acompanhada, para isso é importante a implementação de algumas ações que ajudaram a entender a sua origem. Estas ações se resumem em verificar por um levantamento topográfico planimétrico verificando a bacia de drenagem e os pontos de saída de drenagem, a seguir tentar mediante dispositivos de interceptação e de canalização concentrar todas as águas em um único ponto, implantando um dispositivo de medição de vazão no local. Planejar um controle e acompanhamento observando a pluviometria e variação do nível do reservatório ao longo do tempo, este histórico é importante para uma análise de tendência e evolução da vazão que percola pelo corpo da barragem e fundação (ANA,2012).

Na TABELA 2-10 são apresentados a altura máxima, comprimento total, ano de início de operação e geologia de fundação de algumas barragens brasileiras.

Na TABELA 2-11 observam-se vazões totais e vazões específicas após o enchimento total dos reservatórios, bem como as intervenções de modo a possibilitar melhor monitoramento das águas surgidas a jusante de cada uma das barragens apresentadas a seguir.

TABELA 2-10 - GEOLOGIA E GEOMETRIA DE BARRAGENS BRASILEIRAS

Legenda	Barragem	Altura Máxima da Barragem (m)	Geologia de Fundação	Ano	Comprimento (m)
A	Água Vermelha (OD)	54	Lava Aglomerática ($k = 10^{-1}$ cm/s)	1978	1875
B	Água Vermelha (OE)	63	Lava Aglomerática ($k = 10^{-1}$ cm/s)	1978	80
C	Atibainha	35	Solos saprolíticos e rochas alteradas (rochas cristalinas metamorfizadas, com predominância de biotita-gnaiss)	1976	430
D	Rio Verde	16	Solo residual (silte arenoso e areia siltosa) sobre rocha alterada	1978	540
E	Paranoá	-	Quartzito e Filito Fraturado	1981	630

FONTE: adaptado de Silveira (2006).

TABELA 2-11 - VAZÕES OBSERVADAS EM BARRAGENS BRASILEIRAS

Legenda	Barragem	Vazão total após enchimento do reservatório (l/min)	Vazão específica (l/min/m)	Local surgências	Intervenção
A	Água Vermelha (OD)	1500	0,8	Ombreira Direita	Execução de Valetas Superficiais Tubulação de Drenagem Medidor de Vazão
B	Água Vermelha (OE)	2320	29,0	Ombreira Esquerda	Execução de Valetas Superficiais Tubulação de Drenagem Medidor de Vazão
C	Atibainha	1050	2,4	Ombreira Esquerda	Trincheiras Drenantes
D	Rio Verde	-	-	Berma de Jusante	Drenos Verticais de Areia
E	Paranoá	-	-	Ombreira Direita - Talude de Jusante e Pé de Jusante	Furos de Drenagem e Drenagem Superficial Espinha de Peixe

FONTE: adaptado de Silveira (2006).

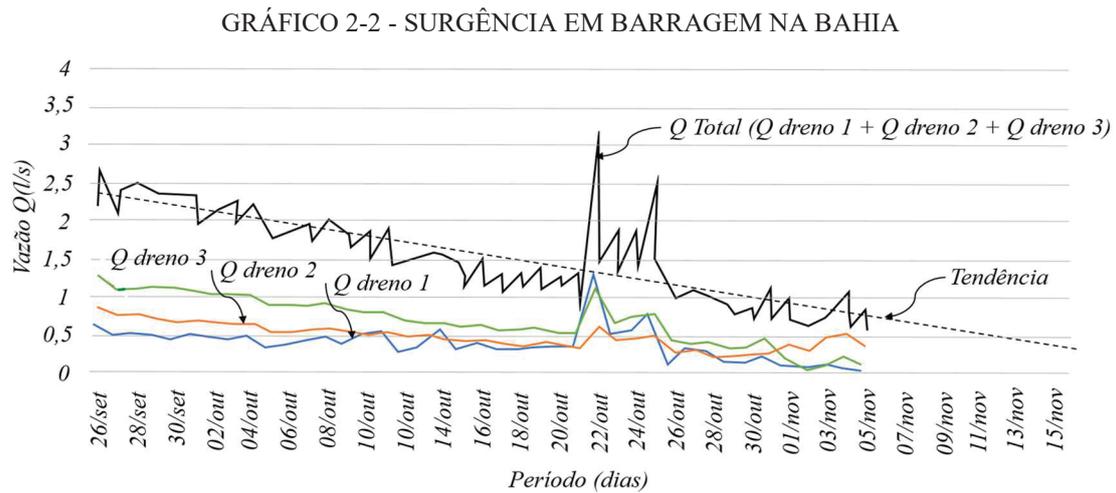
Apresentado no (29º) *congresso nacional de saneamento e meio ambiente*, uma surgência de água na barragem morada dos lagos do sistema aldeia da serra representada na FIGURA 2-42, esta surgência foi localizada ao longo do pé de jusante da barragem, após uma avaliação técnica concluiu-se que a causa provável foi a alta permeabilidade do aterro argiloso compactado da barragem. Como solução inicial, foi primeiramente recomendado a execução e implantação de um projeto para instrumentação de monitoramento a fim de acompanhar a evolução da anomalia (AESABESP, 2018).

FIGURA 2-42 - SURGÊNCIA NA BARRAGEM MORADA DOS LAGOS



FONTE: AESABESP (2018).

Uma barragem de terra com 19 m de altura máxima e comprimento de 354,00 m, localizada no estado da Bahia, apresentou uma surgência de água significativa que levou como ação emergência o monitoramento com instalação de tubos com intuito de canalizar e concentrar as águas para uma melhor medição. As leituras eram feitas quase que diariamente, pela equipe de manutenção de monitoramento do empreendimento. A seguir é apresentado GRÁFICO 2-2 a evolução da vazão captada das águas desta surgência (SILVEIRA, 2020).



Na FIGURA 2-43 observa-se um registro fotográfico da surgência de água da barragem na Bahia, e durante o acompanhamento da surgência observou-se que os pontos com picos de retorno estavam relacionados com dias de chuva no local (SILVEIRA, 2020). Este detalhe é muito importante durante a análise de uma anomalia como essa, pois, para traçar uma tendência de comportamento deve-se descontar o carregamento de águas por conta das chuvas, uma das maneiras e desconsiderar estas leituras influenciadas pela pluviometria (INTERTECHNE, 2022).

FIGURA 2-43 - SURGÊNCIA EM BARRAGEM NA BAHIA



FONTE: Silveira (2020).

Na evolução de detecção de novas surgências, importante adotar imediatamente medidas de correção para cessar a anomalia. Primeiramente é importante localizar os pontos úmidos e fluxo de água, a seguir tentar fazer as medições: nível do reservatório e controle pluviométrico ao decorrer do monitoramento para correlacionar com as leituras de vazão destas surgências. Na hipótese de dúvidas de onde possa estar vindo a água de infiltração, recomenda-se correlacionar as vazões medidas com os dados mencionados anteriormente (vazão do reservatório e pluviometria). Casos de erosão interna (*piping*) sempre traz consigo carreamento de materiais, em formato de olho d'água na região de saída da água, composta muitas vezes de solos mais finos (areias ou siltes). Recomenda-se que estes eventos sejam registrados com registros fotográficos bem com levantamento geométrico da área da anomalia. Como intervenção emergencial e temporária representado na FIGURA 2-44, recomenda-se: execução de um dique intercepto com sacos de areia para direcionar a água para um único ponto, em seguida represar água neste recinto, formando uma maior lâmina de água em cima da surgência de água reduzindo a hipótese de erosão (*piping*) evitando o aumento do gradiente hidráulico (FEMA, 2015).

Alternativamente é possível a execução sobre a região de saída da água um filtro invertido sanduíche, composto de areia com camadas sobrepostas de outros materiais granulares que atendam os critérios de filtro e permeabilidade, este processo permite uma diminuição do carreamento de materiais diminuindo a vazão e a força de percolação (ANA, 2012).

FIGURA 2-44 - DIQUE INTERCEPTO COM SACOS DE AREIA



FONTE: FEMA (2015).

2.1.15 Poços de observação

Os poços de observação são tipicamente tubos verticais com uma secção ranhurada no fundo, ou um tubo com uma ponta de filtro poroso no fundo, também conhecidos como *indicadores de nível de água* ou *medidores de nível de água*. São normalmente instalados em furos com um selo na superfície do solo para evitar que a água superficial entre no furo. A profundidade até ao nível da água é medida baixando uma sonda (*pio elétrico*) dentro do tubo, também é possível que estes poços sejam instrumentados com automatização colocando um transdutor de pressão no furo (SILVEIRA, 2006).

Os poços de observação também podem ser utilizados para amostragem de águas subterrâneas para testes de qualidade da água. Ao contrário do poço de observação, que mostra uma altura total de água de várias camadas, um piezômetro pode indicar a pressão da água na camada específica em que se encontra a célula piezométrica. Os componentes dos poços de observação de tubos verticais abertos são, em princípio, idênticos aos componentes dos piezômetros de tubos verticais abertos tipo Casagrande (FEMA, 2015).

2.1.16 Poços de alívio

Os poços de alívio também funcionam como poços de observação, mas o seu objetivo principal é reduzir a vazão hidráulica em locais posicionados ao longo da trajetória de escoamento. Ainda as águas que saem na descarga do poço de alívio, estas podem ser recolhidas e direcionadas por dispositivos de drenagem, concentrando as águas de todos os poços em um único ponto de medição para proporcionar o monitoramento, de forma expedita também é possível medir a vazão de cada poço. (FEMA, 2015).

Recomendável que periodicamente se programe um programa de teste de vida com lavagem de poços de drenagem, pois, em aplicações em barragens, é comum o surgimento de problemas específicos associados ao entupimento do sistema filtrantes ou à acumulação de água em seu interior (SILVEIRA, 2017).

Os poços de alívio requerem tipicamente manutenção regular para um funcionamento adequado a longo prazo, incluindo na maioria das vezes, tratamentos químicos, e desinfecção. Embora os poços de alívio não sejam normalmente instalados para o objetivo principal de monitorização da água de infiltração, o seu escoamento pode ser recolhido, medido e avaliado de forma semelhante aos piezômetros abertos ou poços de observação (FEMA, 2015).

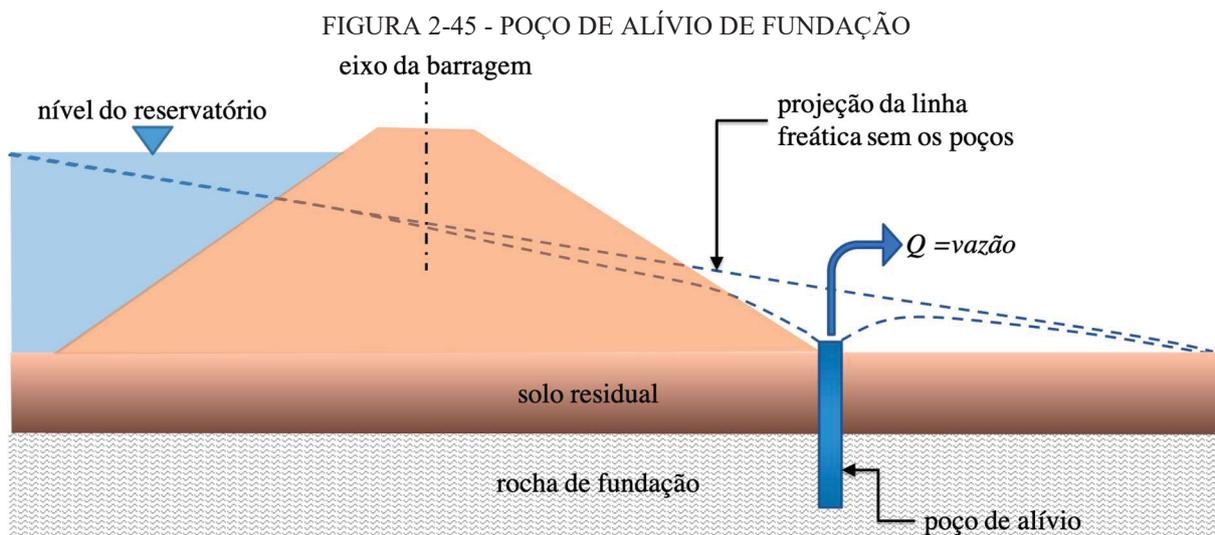
Os poços de alívio são eficazes para reduzir as pressões das fundações, aumentando o fluxo de infiltração e aumentando assim a perda de carga na fundação entre o reservatório e a localização

dos poços. Para fundações uniformes, os poços de alívio são tipicamente instalados numa linha ao longo do dreno de pé da barragem (GAIOTO, 2003).

Em relação às *vantagens* de se utilizar poços de alívio para o controlo de infiltrações destacam-se que a instalação é rápida e não requer mão de obra tão especializada, requer pouco espaço, implantação e monitoramento e mediante o processo de perfuração, os poços podem ser instalados mesmo sem necessidade de rebaixar as águas a jusante (FEMA, 2015).

Referente às *desvantagens* destacam-se que a ocorrência de potencial de entupimento dos materiais de filtros e transição dentro do poço entre a parede do furo e a parede externa do tubo, susceptibilidade a aparição de ferro bactéria em algumas regiões onde este fenómeno é recorrente mediante ao tipo de geologia local e área de influência relativamente pequena por poço (FEMA, 2015).

A FIGURA 2-45 mostra uma instalação típica de poço na fundação a jusante de uma barragem para um aquífero confinado.



FONTE: adaptado de FEMA (2015).

A FIGURA 2-46 mostra um poço de alívio em operação em Minnesota nos Estados Unidos, neste empreendimento foram instalados vários poços em uma extensão para controlar as pressões de infiltração sob uma camada de confinamento de baixa permeabilidade. Os poços foram instalados em locais críticos com uma linha mais próxima do de pé da barragem, no entanto, ao longo dos anos, o desempenho dos poços começou a diminuir devido ao entupimento dos filtros com partículas finas e lodo provenientes da formação do aquífero (FEMA, 2015).

FIGURA 2-46 - POÇO DE ALÍVIO EM OPERAÇÃO



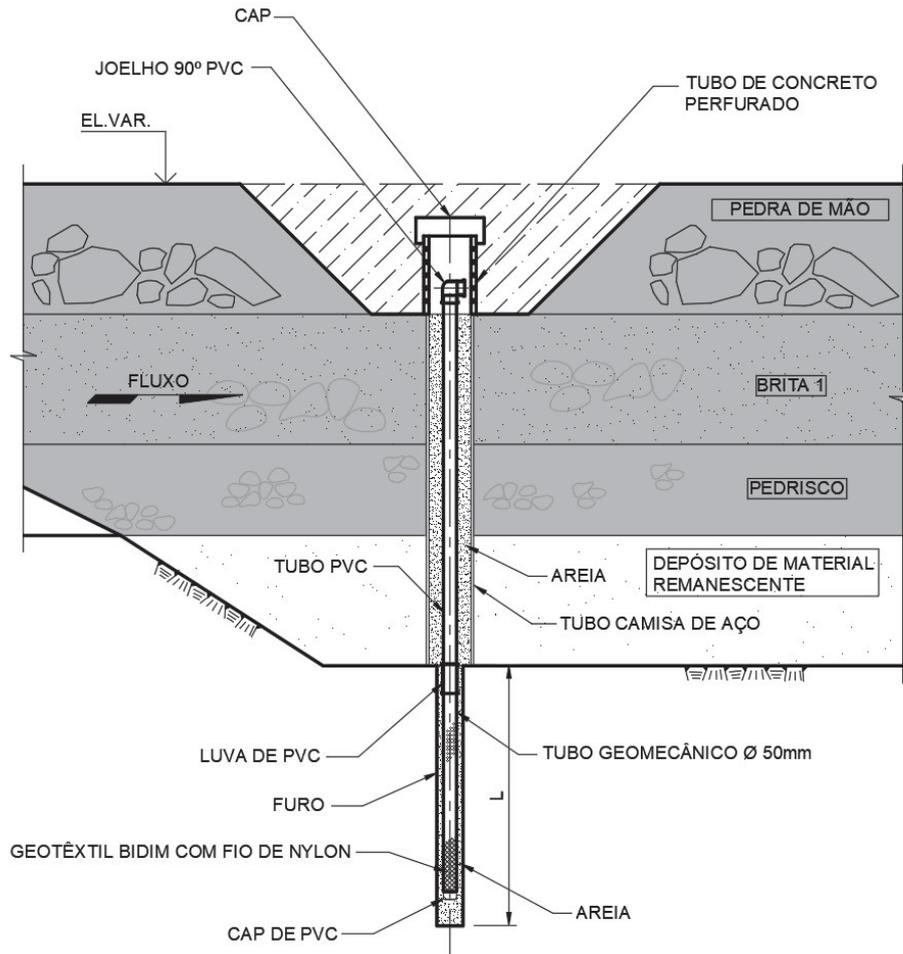
FONTE: adaptado de FEMA (2015).

Existem formas de prever o valor de vazão para dimensionar um projeto de poços de alívio, uma delas pode ser feita por meio de análise por meio do *método dos elementos finitos* que podem resultar em vazões inferiores à vazão obtida por fórmulas de uso corrente. Importante, por questões de segurança, avaliar os resultados e verificar qual adotar para elaboração do projeto considerando que o conjunto de poços que serão instalados, considerando que estes devem ser suficientes para aliviar as pressões hidrostáticas sub-superficiais. Cabe ressaltar que o modelo numérico é teórico, e considera um meio homogêneo com permeabilidade constante em todas as direções. Algumas feições geológicas, que podem ser responsáveis por concentrar vazões elevadas, não podem ser visualizados com modelos matemáticos. (USACE, 1992).

Portanto, a quantidade, os locais, a disposição e a profundidade das perfurações que serão necessárias poderão sofrer alterações ao longo da instalação dos poços, pelas condições reveladas durante a evolução dos trabalhos. É possível que ainda mesmo depois dos poços entrarem em operação, pode ser necessário a ampliação do sistema para suprir a necessidade das vazões reais observadas ao longo do tempo (MASSAD, 2010).

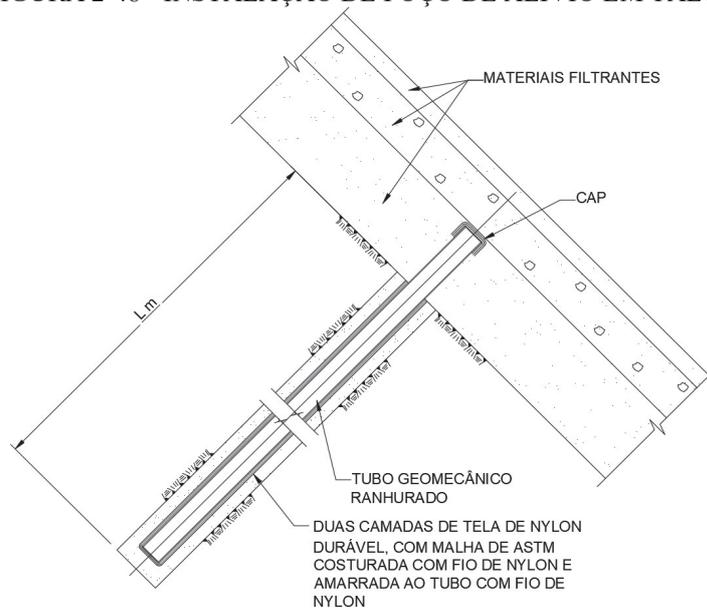
A FIGURA 2-47, FIGURA 2-48, FIGURA 2-49 e FIGURA 2-50 indicam alguns detalhes típicos com perfil de instalação de poços de alívio que podem ser adotados em ações emergenciais ou implantação de novos projetos.

FIGURA 2-47 - INSTALAÇÃO DE POÇO DE ALÍVIO



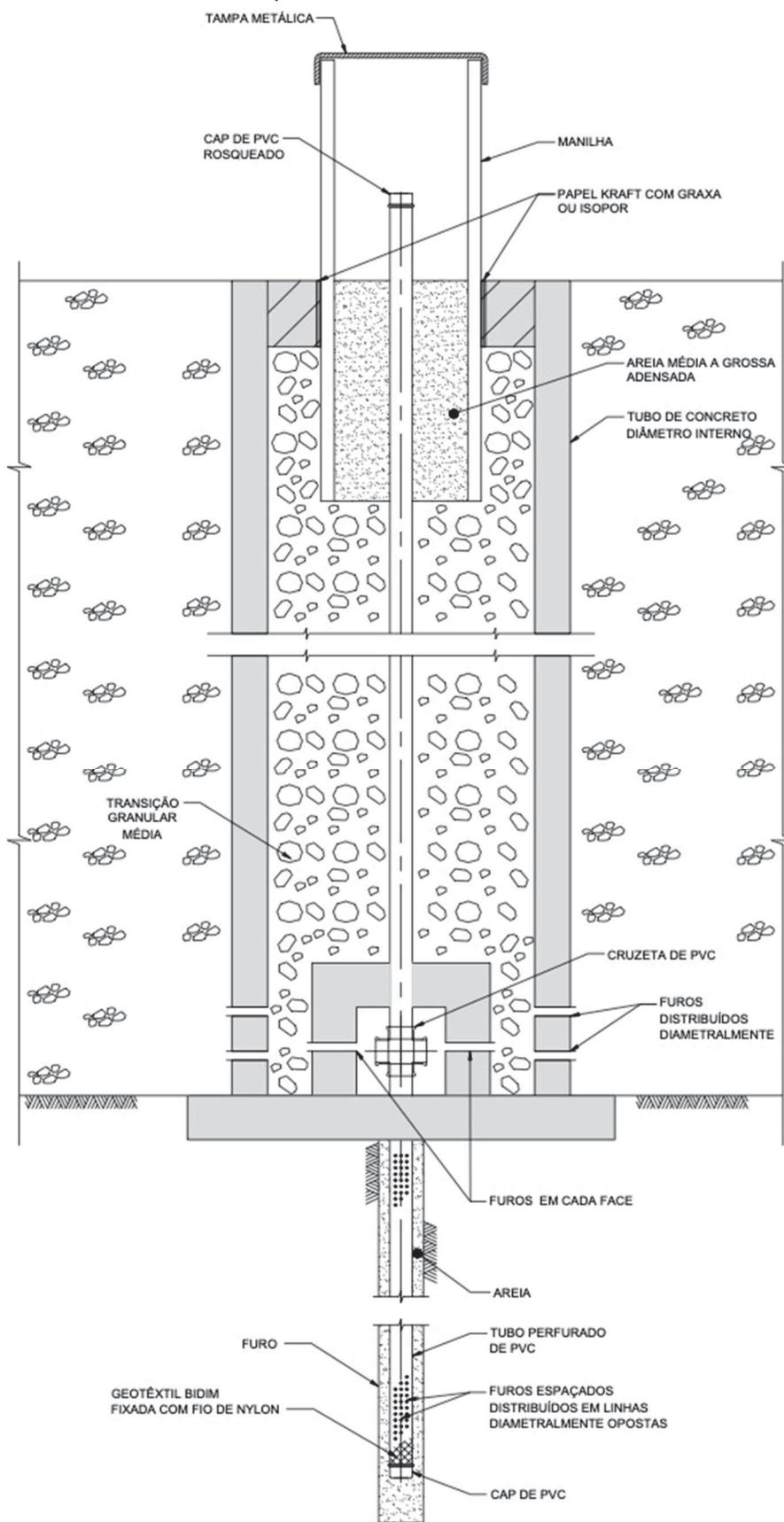
FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

FIGURA 2-48 - INSTALAÇÃO DE POÇO DE ALÍVIO EM TALUDE



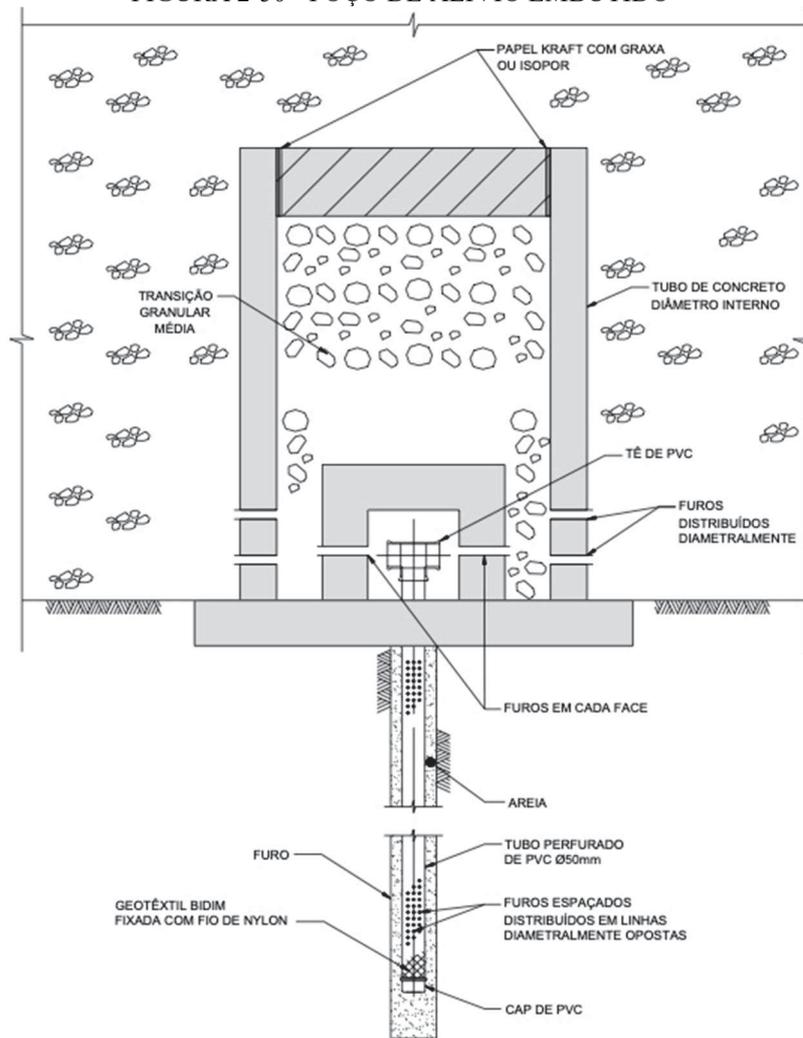
FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

FIGURA 2-49 - POÇO DE ALÍVIO COM MEDIDOR DE NÍVEL



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

FIGURA 2-50 - POÇO DE ALÍVIO EMBUTIDO



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

Para dimensionamento do sistema de poços de alívio pode-se admitir um único poço equivalente para estabelecer todo sistema, para tanto deve considerar que estes poços estejam locados paralelamente com espaçamentos e diâmetros padronizados (MASSAD, 2010).

Define-se a vazão de contribuição total pela equação (6), proposta por Cedergren (1967) e citado em Massad (2006), para rebaixamento em aquífero gravitacional com fonte circular:

$$Q_f = \frac{\pi \times k \times D \times \Delta H}{\ln(R/r)} \quad (6)$$

$$\Delta H = h_1 - h_2 \quad (7)$$

$$D = h_2 \quad (8)$$

Em que:

Q_f : vazão de contribuição por poço (perda d' água pela fundação) (cm^3/s);

k : coeficiente de permeabilidade (cm/s);

R : metade da distância entre poços (cm);

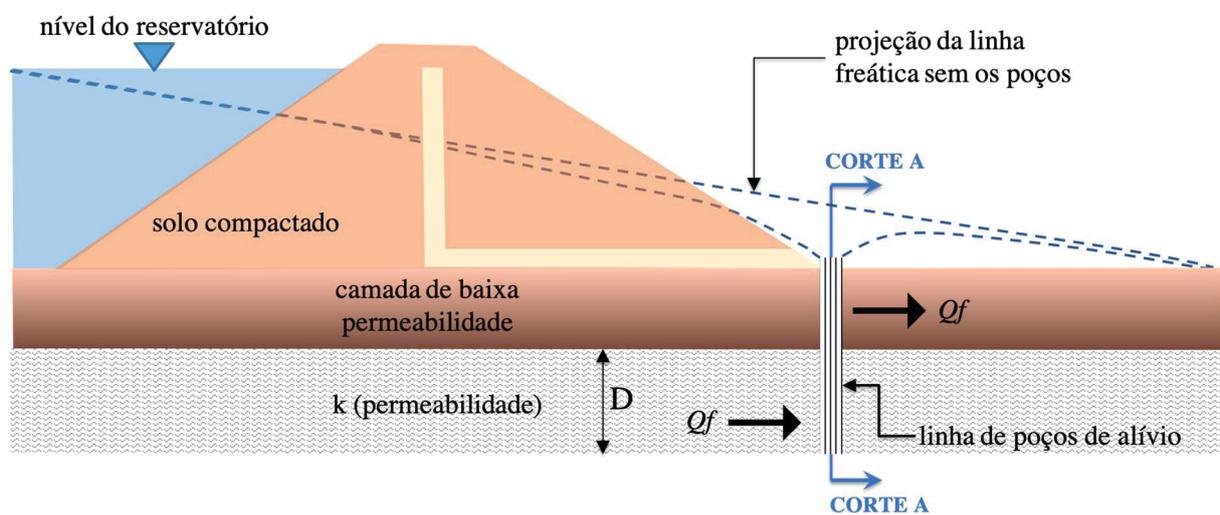
r : raio do poço (cm);

ΔH : carga hidráulica total (cm);

$2R$: distância entre poços (cm);

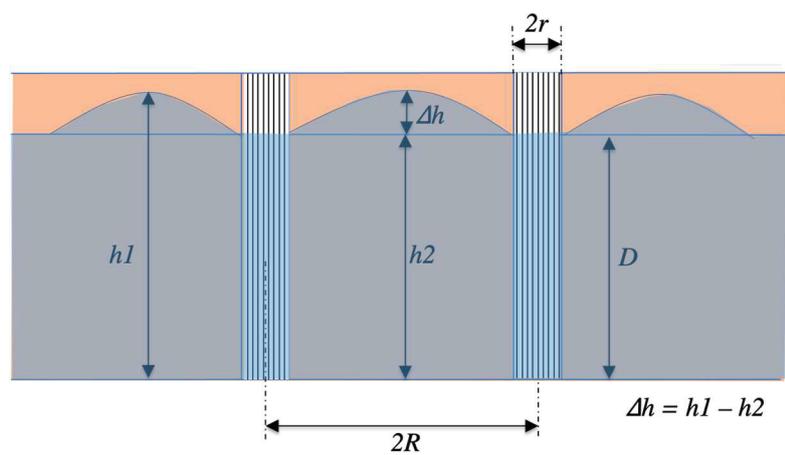
$2r$: diâmetro do furo (cm);

FIGURA 2-51 - POÇOS DE ALÍVIO PARA CONTROLE DA SAÍDA D'ÁGUA



FONTE: adaptado de Massad (2010).

FIGURA 2-52 - POÇOS DE ALÍVIO (CORTE A)



FONTE: adaptado de Massad (2010).

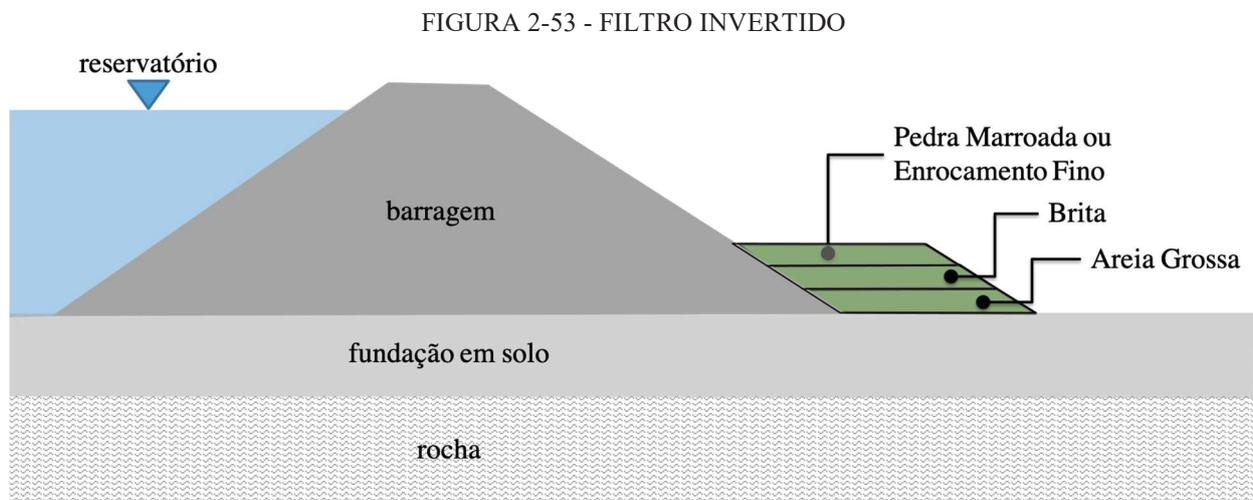
2.1.17 Filtro invertido

Massad (2010) descreve que o filtro invertido geralmente pode ser considerado uma bermã com um sanduiche de materiais granulares filtrantes entre si, este dispositivo sendo ou não de caráter emergencial pode ser colocado imediatamente ao pé do talude de espaldar de jusante, sua principal função é permitir que as águas passem por ele, no entanto, não permite que haja carreamento dos materiais de fundação ou do maciço do aterro.

O efeito da combinação do peso do material sendo ao mesmo tempo, permeável auxilia no combate aos fenômenos (*areia movediça e levantamento do solo*), conhecidos na área da geotecnia como (*sand boil e blow out*) respectivamente (MASSAD, 2010).

É comum utilizar esta solução logo após o enchimento do reservatório e pode ser usada combinadas com outras soluções aplicadas a barragens de terra com enrocamento, uma delas são os poços de alívio já abordado no parágrafo 2.1.16 (SILVA, 2016).

A FIGURA 2-53 a seguir indica de forma esquemática a aplicação do filtro invertido em uma barragem.

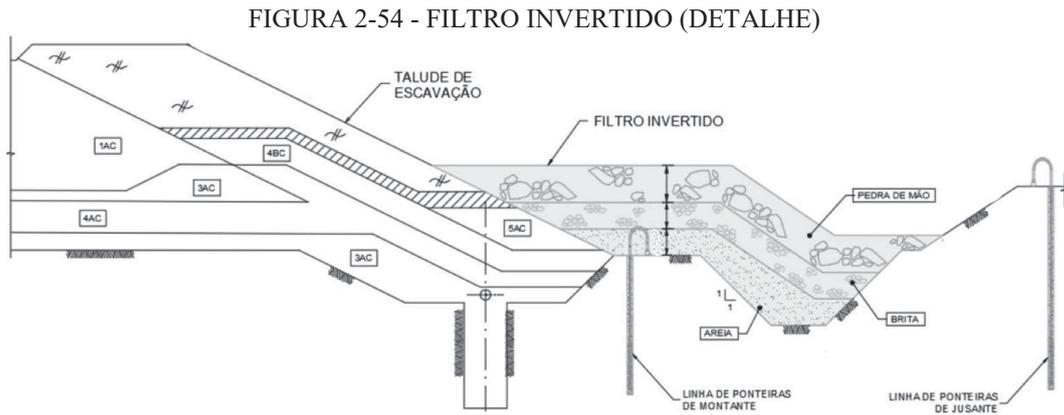


FONTE: adaptado de Massad (2010).

Em situações onde a estrutura da barragem já apresenta problemas com maior probabilidade de desestabilização por conta do fenômeno de erosão interna, deve-se prever, a título de plano de contingencia, prever um estoque próximo do pé do talude de jusante da barragem para acelerar a execução do filtro invertido caso necessário. Em alguns casos algumas barragens que estão passando por reparos de recuperação de geometria ou sistema de drenagem, necessitam ter um planejamento de execução por trechos para não descalçar o pé da barragem de uma só vez. Importante detalhar as faixas granulométricas para materiais granulares para aplicação de filtro invertido, toda via todos os materiais

devem atender os critérios de filtragem, permeabilidade e uniformidade quando aplicável, é importante está validação para haver um funcionamento adequado do sistema evitando carreamento de materiais ou colmatção dos materiais adjacentes entre si (INTERTECHNE, 2022).

A FIGURA 2-54 demonstra a implantação de filtro invertido junto ao dreno de pé de uma barragem.



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

2.1.18 Carreamento de materiais

Na hipótese de aparição de materiais sólidos a jusante da barragem após o enchimento do reservatório, recomenda-se um profissional especializado para coleta do material, registro da temperatura e realização de ensaios de laboratório o mais brevemente possível, pois, pode tratar-se de arraste de partículas advindas da barragem. A coleta do material deve evitar durante o transporte, evaporação ou qualquer tipo de alteração do material. Importante verificar se este material não seja resto de material depositado durante a construção, resto de ensecadeiras que não foram totalmente removidas, ou material erodido superficialmente de encostas, ou trazidas por sistema de drenagem superficial instalada (SILVEIRA, 2006).

Para determinação do teor de sólidos (em suspensão e em dissolução) utiliza-se a norma ASTM, métodos de teste para partículas e matéria dissolvida na água, n.º ASTM-D 1888 – 67, edição 1978. A medição do teor de sólidos em termos de unidade é utilizada (ppm) – parte por milhão = mg/l (miligrama por litro), ou seja:

$$1l = 1000cm^3$$

$$1cm^3 = 1000mg$$

$$1000mg = 1,0 g$$

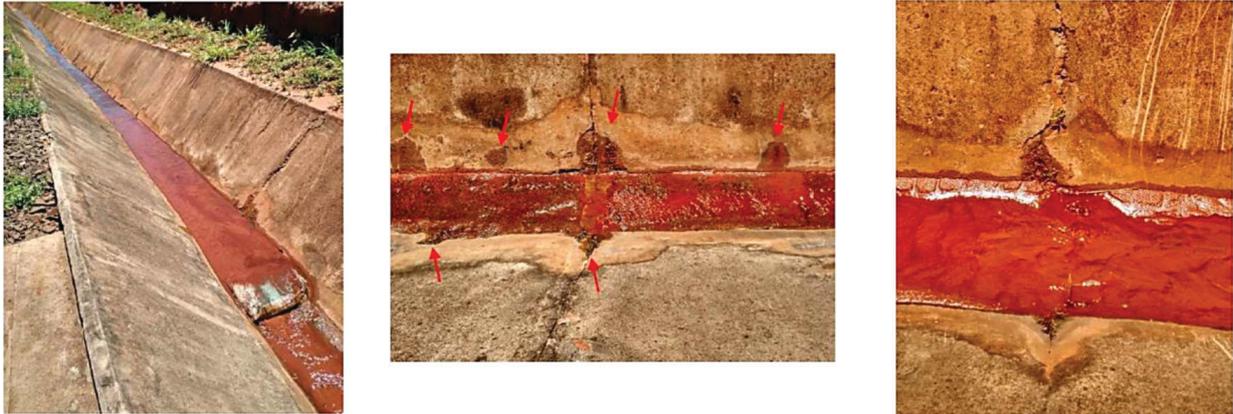
Para monitoramento de carreamento de partículas sólidas, é possível utilizar um dispositivo chamado turbidímetro que se trata de uma sonda para medição de turbidez, este pode ser acoplado junto ao medidor de vazão. Este dispositivo é recomendável quando a barragem apresenta alguma anomalia de aparecimento de sólidos nas águas de drenagem e também em barragens, com grande probabilidade de ocorrência de erosão interna (piping) (SILVEIRA, 2006).

Importante que a vazão percolada através da fundação e do sistema de drenagem interno da barragem seja aferida por um medidor de vazão em um ponto de medição que, seja possível acessar para obtenção das leituras. A região do dreno de pé necessita sempre que possível estar limpa e conservada, com fácil acesso (INTERTECHNE, 2022).

Ocorre em algumas barragens a existência de acúmulo de um material com aspecto de ferro-bactéria, com comportamento coloidal, geralmente o odor deste tipo de material é típico de material ferroso, de qualquer maneira diante desta situação é recomendável ser feito algum tipo de ensaio com análise química e granulometria que possa confirmar esta informação, descartando que possa ser algum carreamento de partícula de solo da barragem. Há histórico de barragens como, por exemplo, a barragem de Rio Grande, localizada em São Paulo, que tiveram o sistema de drenagem e instrumentação, principalmente os piezômetros, comprometidos pelo acúmulo e colmatação pela presença de material “ferro-bactérias”. Como referência foi publicado pela companhia energia Cemig o artigo “Piau Dam — biological clogging of drainage of the downstream toe” e apresentado no evento organizado pelo ICOLD em Seul na Coreia do Sul no ano de 2004, onde foi relatado o caso de um aumento significativo de subpressão em alguns piezômetros por conta da presença do fenômeno ferro-bactéria. Destaca-se que o fenômeno ferro-bactérias pode ser contínuo, o que pode ser uma preocupação futura em barragens com este tipo de problema, no caso comece a apresentar grandes volumes, de modo que é importante que este item passe a ser monitorado de modo visual rotineiramente. Além disso, a deposição deste material a montante do medidor de vazão pode afetar a leitura, dando indicação de uma vazão maior que a real, de modo que como recomendação sugere-se também a limpeza rotineira deste material dentro das caixas dos medidores antes das leituras (CARIM, 2004).

A FIGURA 2-55 apresenta fotografia de acúmulo de material sólido carreado com coloração avermelhada, bem como algumas surgências advindas das paredes laterais da canaleta trapezoidal localizada a jusante de uma barragem.

FIGURA 2-55 - CARREAMENTO DE MATERIAL SÓLIDO



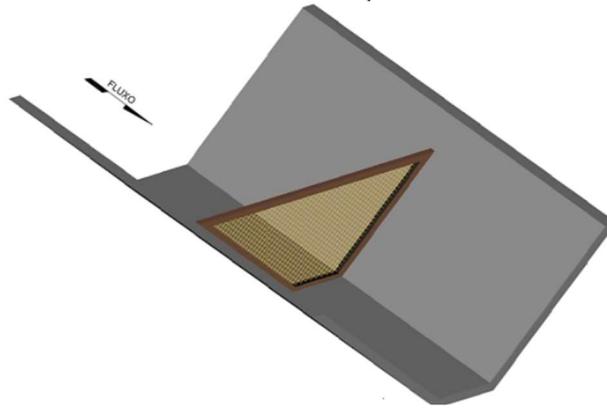
FONTE: Intertechne (2022).

Para delimitar a região que pode estar sob efeito de processo de carreamento de finos, poderá ser feito um monitoramento numa canaleta de drenagem feita em concreto, meia cana de concreto ou algum revestimento que evite misturar os sólidos carreados com as partículas de solo da superfície local. A seguir uma sequência de trabalhos e intervenções que podem ser adotadas para controle de materiais sólidos carreados, que são: A limpeza da canaleta de drenagem, removendo-se todo o material fino que se encontra depositado na base da mesma, seguida da instalação de dispositivo para contenção de finos que permita a passagem de água e a retenção de material que esteja sendo transportada por arraste. Este sistema pode ser realizado por uma espécie de peneira com formato de um quadro a ser instalado dentro da canaleta de drenagem. Essa peneira poderá ser dotada de tela de nylon dupla # 60, com folga de maneira a criar uma espécie de bolsa que permita a passagem de água e retenção de finos. Tendo em vista uma melhor observação por trecho, propõe-se a instalação de mais de uma peneira ao longo da canaleta de drenagem a depender da extensão do trecho que está sendo investigado, vi-sando confirmar a área que está ocorrendo o carreamento de finos (INTERTECHNE, 2022).

As leituras poderão ser realizadas em períodos espaçados iguais, com leituras diárias, podendo este intervalo ser maior numa avaliação onde ocorra a estabilização do carreamento de materiais, registrando a quantidade de finos retidos na bolsa da peneira e a ocorrência de eventuais chuvas, além da leitura dos instrumentos de monitoramento de vazão. Ao final de cada ciclo de coletas do período pré-estabelecido, recomenda-se a execução de ensaios de granulometria integral (com sedimentação) nos materiais coletados, importante que a coleta seja feita em locais diferentes para confirmar que se trata do mesmo material e da mesma origem (INTERTECHNE, 2022).

Na FIGURA 2-56 é apresentado um esboço desse dispositivo para coleta de materiais carreados.

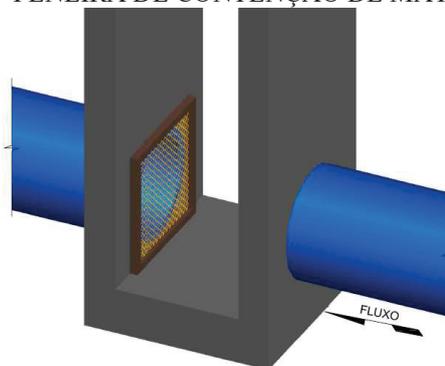
FIGURA 2-56 - SISTEMA DE ACUMULAÇÃO DE MATERIAIS SÓLIDOS



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

Na hipótese de o sistema de drenagem a jusante da barragem ser subterrâneo com tubulação de concreto ou polietileno drenante perfurada, o monitoramento de materiais sólidos pode ser feito nos poços de visitas instalados ao longo do sistema de drenagem. Importante a realizar inspeção em cada um dos poços de visitas visando identificar a existência de finos depositados e em processo de arraste. Pode ocorrer que em alguns trechos o fluxo de água tenha velocidades que dificultem a confirmação de carregamento de finos, neste caso propõe-se a instalação na boca de entrada do tubo, situada a jusante da parede de cada um dos poços de visita, uma espécie de peneira com bolsa que permite o acúmulo de material carregado, de modo a ter-se uma medida física. Previamente à instalação dessa peneira, deverá ser realizada a limpeza do tubo com remoção de material depositado na maior distância possível a partir do poço de visita. O planejamento da periodicidade das inspeções pode ser adequado a necessidade e evidência de uma continuidade do acúmulo de materiais sólidos. Nos trechos onde houver material coletado pela bolsa de nylon, recomenda-se a realização de ensaios de granulometria completa (com sedimentação) (INTERTECHNE, 2022). Na FIGURA 2-57 é apresentado um esboço desse dispositivo para coleta de materiais carregados.

FIGURA 2-57 - PENEIRA DE CONTENÇÃO DE MATERIAIS SÓLIDOS



FONTE: adaptado de Intertechne (2022).

Com a identificação dos possíveis trechos que apresentam carreamento, a pesquisa para identificação do local de aporte de materiais carreados poderá ser continuada com a realização de inspeções robotizadas em cada um dos trechos onde foi identificado arraste de material, visando definir em cada eventual trecho afetado o local da anomalia. Para que tal atividade seja efetiva e traga informações confiáveis, recomenda-se a contratação de empresa especializada em inspeções robotizadas em dutos; algumas empresas no ramo de saneamento fazem esse trabalho com frequência. Essas inspeções poderão permitir localizar com razoável precisão o eventual dano ocorrido no sistema de drenagem, de modo a direcionar as atividades de recuperação do sistema (INTERTECHNE, 2022).

Uma das possibilidades é a de que esses locais de afluência de materiais carreados possam ser resultado de danos pela ocorrência de deformação entre tubos adjacentes, por quebra ou deformação diferencial, ou mesmo por uma ruptura localizada de algum trecho de tubo. Com a consolidação de todos os dados de investigação, poderá ser realizada intervenção direcionada ao local danificado, com possível substituição localizada de tubo de drenagem e/ou adoção de eventual proteção adicional contra carreamento de material. A condição do eventual local danificado deverá ser analisada à luz das informações obtidas nas investigações, visando confirmar a possibilidade de uso do projeto existente, que resultou na construção da barragem, ou na eventual necessidade de considerar algum ajuste, ou a inclusão de solução complementar (INTERTECHNE, 2022).

2.1.19 Análise de comportamento

Medições quanto ao volume de infiltração que passa através de uma barragem produzem o fluxo superficial e o sub superficial a jusante do barramento. Consolidar uma previsão efetiva do comportamento de uma barragem a longo prazo, geralmente envolve um estudo analítico de uma quantidade mensurável e considerável de dados reunidos ao longo do tempo, basicamente é compilação de registros de leituras efetuadas dentro da periodicidade do plano de instrumentação do empreendimento, a interpretação destes dados pode realizada por métodos estatísticos e/ou probabilísticos (MAXWELL, 2022).

O volume de água total emergida do solo, descarregada em algum dispositivo de drenagem podem ser medidas de forma direta. Já as águas que aparecem na superfície do solo a jusante da barragem podem ser medidas por meio de medidores de vazão (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2004).

Tem se tornado comum para análise e acompanhamento de vazões, seja por inspeção de rotina e inspeções regulares, a elaboração de gráficos que relacionam a *vazão versus o tempo*, com levantamento do histórico de medições durante o enchimento do reservatório, início de operação e as leituras feitas na periodicidade de medições estabelecidas em projeto. A variação do reservatório tem uma influência importante que podem representar em reflexos nas vazões obtidas nos medidores de vazão quando instalados (SILVEIRA, 2006).

Os medidores de vazão ainda em períodos de chuvas são diretamente impactados pela pluviometria, paralelamente esta é uma informação que poder incorporada nos gráficos (*vazão x tempo*) para correlacionar com as informações medidas periodicamente (SILVEIRA, 2006).

Barragem Atibainha

(Oliveira et al., 1976) apresentou a variação das vazões de drenagem e do nível do reservatório da barragem de Atibainha em função do tempo, ao fim do processo do enchimento do reservatório, as vazões totais chegaram a 1050 l/min, considerando o comprimento da barragem como área de contribuição resultou em uma vazão específica de 2,4 l/min/m.

Barragem Esquerda Água Vermelha

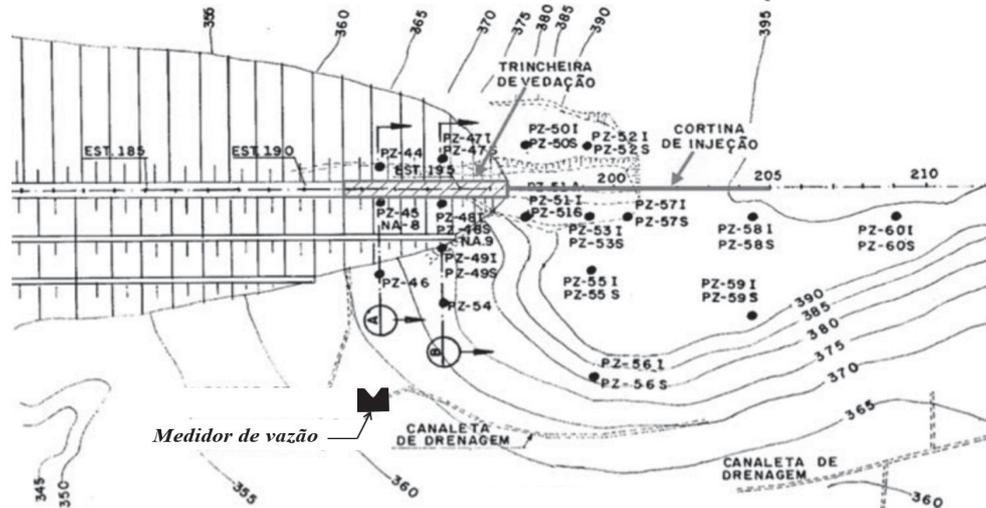
Dois meses após o enchimento do reservatório da barragem de terra da margem esquerda de Água Vermelha, a vazão total ultrapassou do valor de controle estimado na fase de projeto que era de 2300 l/min, considerada a maior vazão medida neste período.

Na ombreira esquerda constatou-se que a permeabilidade da camada de lava aglomerática era de 10^{-1} cm/s (SILVEIRA, 2006).

Em uma saída de drenagem implantada por volta da estaca 191 + 00 tem um dispositivo “medidor de vazão”, neste dispositivo além das leituras das vazões advindas do dreno de saída foi também coletada a amostragem da água no reservatório e do dreno, está coleta foi realizada acompanhando o enchimento do reservatório, o objetivo destas coletas ocorreu para determinar a medição do teor de sólidos em suspensão e em dissolução (SILVEIRA, 2014).

A FIGURA 2-58 apresenta a planta de locação dos instrumentos na ombreira esquerda da barragem da UHE Água Vermelha.

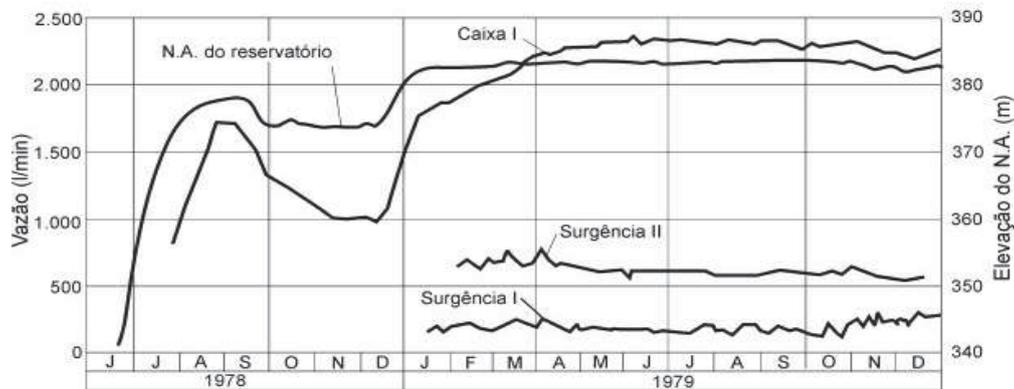
FIGURA 2-58 - INSTRUMENTOS NA OMBREIRA ESQUERDA



FONTE: adaptado de Silveira (2014)

A seguir na FIGURA 2-59 são apresentadas as vazões das duas surgências observadas na barragem de UHE Água Vermelha correlacionadas com o comportamento do nível de água do reservatório.

FIGURA 2-59 - VAZÕES BARRAGEM ÁGUA VERMELHA



FONTE: Silveira (2006)

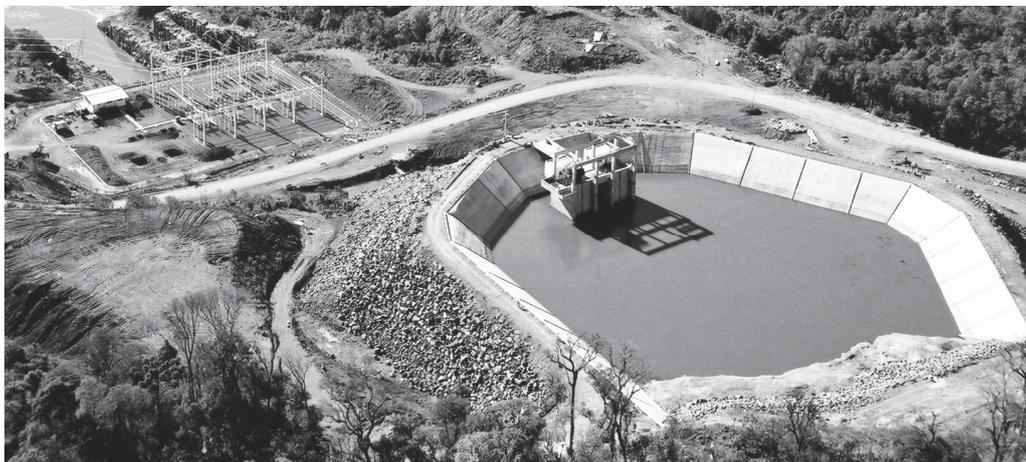
Dique UHE Santa Clara

O dique da câmara de carga da UHE Santa Clara, apesar de ser uma barragem do tipo enrocamento com face de concreto, demonstra a seguir o acompanhamento das vazões durante o enchimento do reservatório da própria câmara. O efluente de uma valeta drenante instalada foi monitorada por medidores de vazão do tipo triangular (INTERTECHNE, 2006).

A preocupação se deu, pois, o pátio da subestação fica elevação inferior ao dique, ainda na possibilidade da incidência que percolação através do talude que fica entre às duas estruturas. Num período de 8 meses foi feito o monitoramento após o enchimento, onde o histórico de vazão demonstrou um comportamento do dique favorável satisfatório, as maiores vazões chegaram a 11 l/s na EL 805,50,

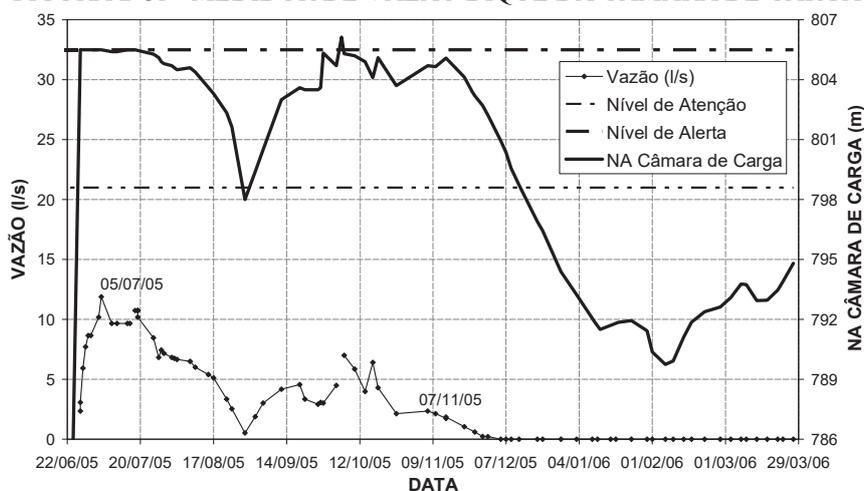
já no primeiro rebaixamento do nível do reservatório da câmara na EL. 798,00 a vazão registrada foi nula (INTERTECHNE, 2006). Na FIGURA 2-60 observa-se uma fotografia do dique da câmara de carga e na FIGURA 2-61 o comportamento do medidor de vazão instalado para o monitoramento.

FIGURA 2-60 - DIQUE DA CÂMARA DE CARGA DA UHE SANTA CLARA



FONTE: Intertechne (2006)

FIGURA 2-61 - MEDIDOR DE VAZÃO DIQUE DA CÂMARA DE CARGA



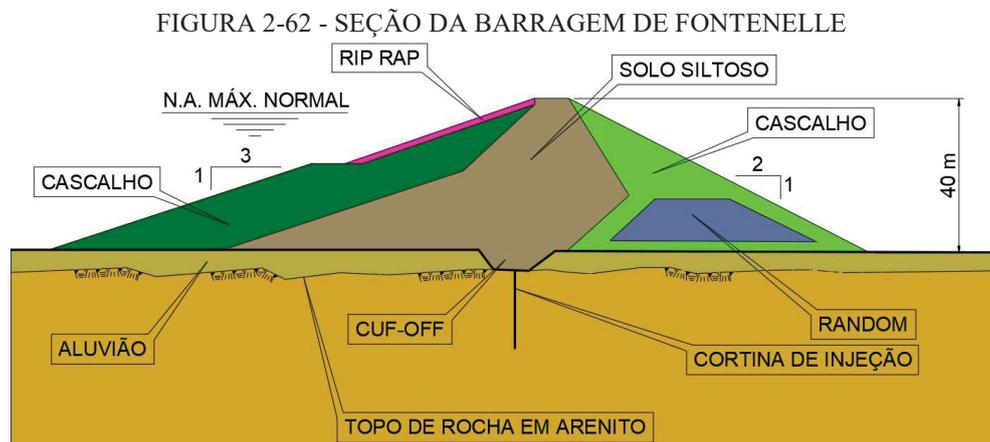
FONTE: Intertechne (2006)

2.1.20 Aumento súbitos de vazão

Referente aos aumentos súbitos de vazão, algo que é importante para que se possa identificar este fenômeno é definir a frequência de leitura do programa de monitoramento de uma barragem. A recomendação atual é que durante o enchimento do reservatório as medições sejam diárias, passando para semanal no momento que barragem entrar em operação. Em algumas barragens a periodicidade de leituras migrou para quinzenal, mediante há algumas dificuldades contratuais de mão de obra, de

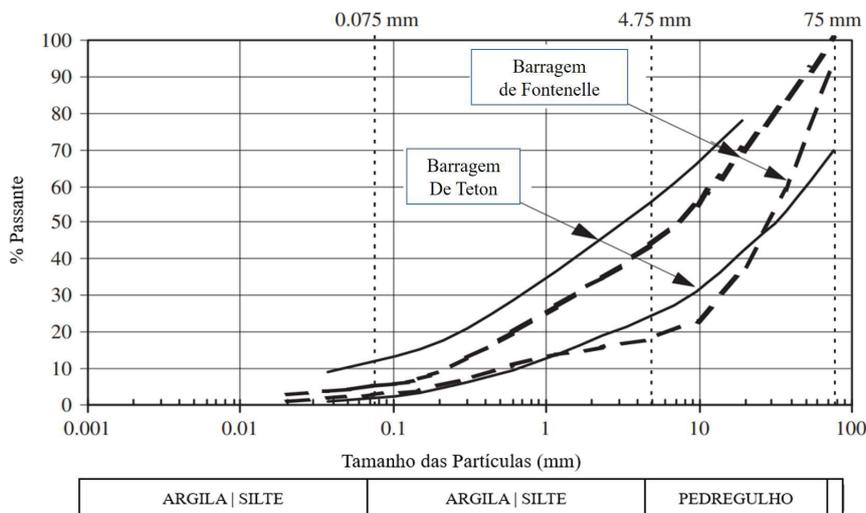
qualquer maneira se entende pelo histórico de anomalias em barragens que este espaçamento quinzenal não seria adequado, temos o caso no Brasil a barragem de Pampulha e nos Estados Unidos a barragem de Teton, onde os eventos de rompimento foram causados por erosão interna. Resumindo, se as vazões estivessem sendo lidas com um espaçamento menor de dias, o aumento súbito de água poderia ter sido identificado (SILVEIRA, 2006).

Comparando em contraste, os acidentes causados por erosão interna da barragem de Teton e sendo maior ainda na Barragem de Fontenelle onde sua seção é apresentada na FIGURA 2-62, as vazões iniciais de 300 a 400 l/s conseguiram erodir as zonas a jusante de cascalho arenoso. Conforme pode-se observar a seguir na FIGURA 2-63, que demonstra graficamente as distribuições das partículas dos materiais com uma classificação fina, e a baixa permeabilidade, que são parâmetros críticos para o comportamento destas barragens (FELL, 2005).



FONTE: adaptado de Fell (2005)

FIGURA 2-63 - MATERIAIS DE JUSANTE DE TETON E FONTENELLE



FONTE: adaptado de Fell (2005)

TABELA 2-12- REGISTRO DE VAZÕES ANTES DOS INCIDENTES

Barragens / País	Qt (l/s)	Lb (*) (m)	Qe (l/s/m)	Observações	Referência
Alto Anchicaya (Colômbia)	1.800	284	6,5	Surgência através da face de concreto a montante	Regalado et al. (1982)
Bullileo (Chile)	8.000	360	22	Erosão interna, fluxo emergindo no apoio de contato da barragem	Appendix A, Foster (1999)
Suorva (Suecia)	100	640	0,15	Erosão interna pelo núcleo central	Foster and Fell (1999)
Songa (Noruega)	100	990	0,10	Erosão interna pelo núcleo central	Foster and Fell (1999)
Courtright (EUA)	1300	490	3	Surgência através da face de concreto a montante	USCOLD (1975)
Dix River (EUA)	85.000	330	255	Galgamento pelo Enrocamento Lançado, a inundação passou através de uma barragem parcialmente concluída	Leps (1973)
Guadalupe (EUA)	4.000	200	20	Surgência através da face de concreto a montante	Marsal (1982)
Hell hole (EUA)	540.000	525	1.030	Enrocamento Lançado, D50 de 0,2-0,3 m.	Leps (1973)
Hrinova (Eslováquia)	180	240	0,75	Erosão interna pelo núcleo central	Verfel (1979)
Martin Gonzalo (Espanha)	1.000	230	4,5	Erosão interna do tapete a montante e camada de cama na zona de enrocamento	Justo (1988)
Omai Tailings (Guiana)	50.000	3.730	13,5	Incidente de erosão interna, perda de águas residuais através da zona de enrocamento a jusante	Vick (1996)
Salt springs (EUA)	850	376	2,5	Surgência através da face de concreto a montante	USCOLD (1988)
Scofield (EUA)	5.600	180	32	Incidente de erosão interna	Sherard (1953)

FONTE: adaptado de Fell (2005)

Qt = Vazão total estimada (l/s), Qe = Vazão específica (l/s/m) e Lb = Comprimento da Barragem (m)

(*) - Os valores Lb foram estimados pelo Google Earth para aquelas barragens que se encontravam com a ortophoto nítida que possibilitasse a utilização da ferramenta de medida do aplicativo.

Um modelo de gerenciamento que permite que a periodicidade de leituras seja feita em menor espaçamento de tempo, é a automação do sistema de auscultação no empreendimento, que podem detectar anomalias que não seriam vistas nas medições feitas semanais ou quinzenalmente. A barragem de Songa, na Noruega, entre os anos de 1976 a 1991, ocorreram 3 aumentos súbitos de vazão. Os recalques do maciço mantiveram-se dentro do normal, cerca de 0,6% da altura da barragem. Entre os

anos de 1964 a 1991, houve variação das vazões apresentadas na TABELA 2-13, que chamou atenção foi exatamente a variação de vazão com aumento significativo, pois, avaliando somente em condições de vazão específica, chegaram-se a vazões máximas de 0,3 l/min/m, onde pode-se considerar um valor aceitável (SILVEIRA, 2006).

TABELA 2-13 - AUMENTO SÚBITO DE VAZÃO NA BARRAGEM DE SONGA

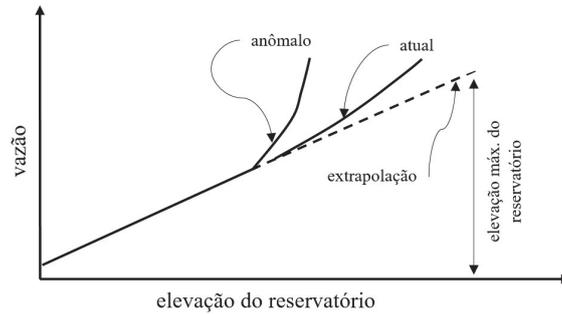
Barragem	Período de observação	Região de contribuição	Vazão Medida inicial (l/min)	Vazão Medida final (l/min)
Barragem de Songa Noruega	1964 a 1991	Ombreira Direita	30	60
	1964 a 1991	Parte Central	180	240
	1964 a 1991	Ombreira Esquerda	42	60
	6,3 horas somente	Aumento súbito em 11/08/1994	75	6420

FONTE: adaptado de Silveira (2006)

O que permitiu analiticamente observar e registrar este aumento súbito de vazão num baixo intervalo de 6,3 horas somente, foi em função do sistema de automação da instrumentação implantada no empreendimento (SILVEIRA, 2006).

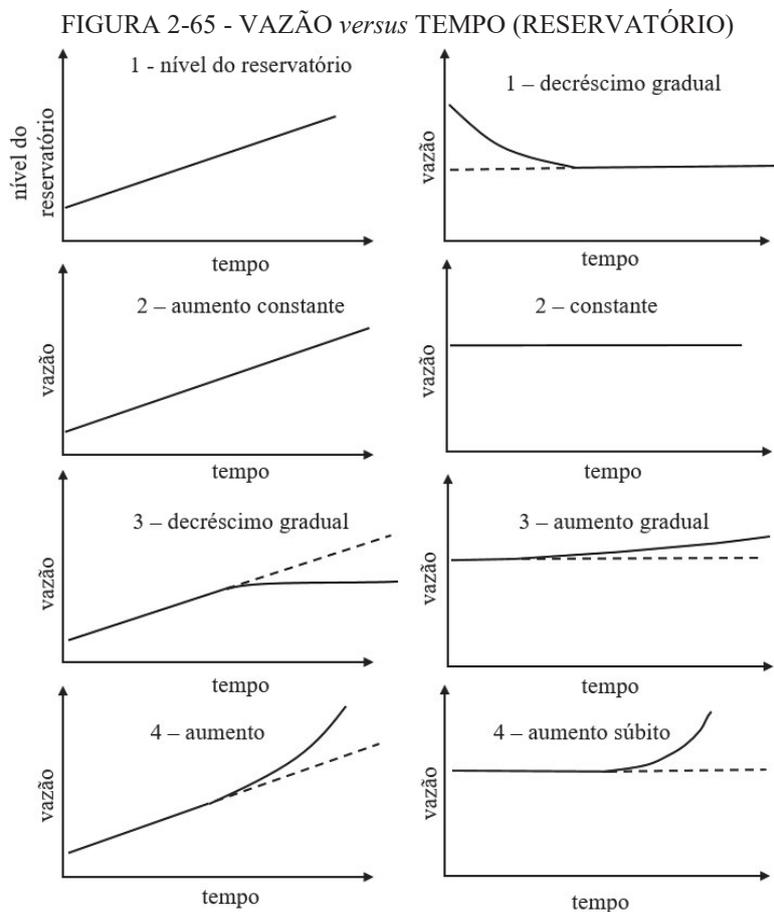
2.1.21 Variação do reservatório

Também é possível analisar dados de vazões comparando com a oscilação do nível do reservatório, pois, se trata de outra forma de se acompanhar as vazões de drenagem por uma barragem utilizando-se gráficos de vazão versus nível d'água no reservatório, a vantagem nesta categoria de análise gráfica é poder auxiliar na identificação de algum evento anômalo da percolação de água através do maciço da barragem, pois, as variações bruscas refletem diretamente nas leituras. Após um acúmulo de medições, será possível observar algumas tendências de comportamento que podem ser vistas mais claramente ao correlacionar as vazões a jusante da barragem com a variação do nível do reservatório. As causas necessitam ser identificadas e investigadas no caso da vazão aumenta gradualmente, e medidas corretivas devem ser tomadas urgentemente se continuar um aumento súbito de vazão abruptamente (SILVEIRA, 2006). Geralmente nível de variação do reservatório é curto, pois, são projetados para manter uma constância no nível de água máximo normal, é necessária uma investigação cuidadosa da tendência de comportamento desta variação (DRIP, 2018). Na FIGURA 2-64 a seguir é possível observar a projeção do comportamento que pode ser considerada com anômalo com efeito de crescimento abrupto de elevação fora de uma tendência de normalidade.

FIGURA 2-64 - VAZÃO *versus* NÍVEL DO RESERVATÓRIO

FONTE: adaptado de DRIP (2018)

A FIGURA 2-65 do lado esquerdo demonstra uma análise de comportamento considerando a correlação entre a vazão versus tempo considerando o aumento do nível de água do reservatório. A FIGURA 2-65 do lado direito demonstra uma análise de comportamento considerando a correlação entre vazão versus tempo quando o nível de água do reservatório permanece constante, sendo mais comum durante a operação do empreendimento. Estas são formas mais adequadas que demonstram a tendência adequada na correlação entre vazão e o reservatório, sendo úteis para interpretação (DRIP, 2018).



FONTE: adaptado de DRIP (2018)

2.1.22 Vazões teórica

Se tratando de *vazões medidas versus teóricas*, é possível através do coeficiente de permeabilidade dos materiais empregados no maciço do aterro de uma barragem e fundação realizar a estimativa de valores de vazões podem ser estimados ou determinados por ensaios in situ com uma aproximação de 10 vezes, esta diferença de grandezas se dá pela grande variabilidade de dispersão de resultados bem como dificuldades na realização de ensaios de campo (SILVEIRA, 2006).

É comum as vazões de drenagem reais serem superiores aos valores obtidos por estimativas em modelos numéricos, isso se dá pela complexidade de interpretação das condições geológicas locais, linhas geométricas de projeto, bem como a falta de homogeneidade dos materiais do maciço da barragem bem como da fundação. Nos contatos dos materiais, ainda na fundação, quando se apresenta zonas alteradas, apresentam permeabilidades mais altas, e mais comum ainda nas ombreiras da barragem. A importância de catalogação de dados de vazões observadas reais pode ainda contribuir em novas vazões empregadas estimadas para novos projetos de barragens, tendo-se a vazão específica multiplicando pelo comprimento de influência de drenagem da estrutura. Estes valores seriam mais confiáveis do que vazões calculadas a partir de modelos computacionais bidimensionais de drenagem interna (SILVEIRA, 2006).

TABELA 2-14 - VAZÕES DE PROJETO *versus* VAZÕES MEDIDAS

Barragem (Proprietário)	Características			Qt (l/min)		Qe (l/min/m)		Relação B/A
	Construção	Hb (m)	Lb (m)	Projeto (A)	Medidas (B)	Projeto (A)	Medidas (B)	
Juqueri (Sabesp)	1968 - 1972	22	210	25	510	0,12	2,43	21,3
Águas Claras (Sabesp)	1969 - 1971	24	120	-	480	-	4,00	-
Capivari-Cachoeira (Copel)	1968 - 1970	60	320	220	624	0,70	1,95	2,9
Atibainha (Sabesp)	1969 - 1973	39	430	600	1050	1,40	2,45	1,8
Cachoeira (Sabesp)	1969 - 1972	33	310	230	450	0,75	1,95	1,9
Rio Verde (Petrobrás)	1974 - 1976	16	540	-	-	-	-	-

FONTE: adaptado de Silveira (2006)

Qt = Vazão total estimada (l/s), Qe = Vazão específica (l/s/m), Hb = Altura máxima da Barragem (m) e Lb = Comprimento da Barragem (m)

2.1.23 Frequência de leituras

Uma frequência apropriada de coleta de dados auxilia numa análise mais eficaz e assertiva, sendo ainda importante avaliar que as frequências de medição necessitam ser definidas conforme o projeto, no caso de barragens deve-se considerar alguns aspectos necessários para que a análise futura possa ser conclusiva que são: obter informações acerca do funcionamento do reservatório, das necessidades de mão de obra, das capacidades de leitura dos instrumentos, do nível de controle estabelecido em projeto para monitoramento de grandezas (FEMA, 2015).

Leituras mais frequentes são geralmente feitas durante o primeiro enchimento do reservatório, e após inundações e terremotos com sismos significativos. Observações visuais devem ser feitas durante cada visita de inspeção à barragem, estas inspeções devem ser rotineiras, visando sempre observar se não há alguma anomalia. A inspeção visual é muitas vezes o tipo de informação mais valioso e deve ser realizada com uma frequência. As leituras dos instrumentos são limitadas ao local onde são instalados. As inspeções visuais são mais capazes de avaliar o desempenho global da barragem e também podem determinar a necessidade de instalação de mais instrumentos (SILVEIRA, 2006).

As frequências de leitura dos instrumentos de auscultação da barragem são apresentadas na TABELA 2-15, para os períodos de construção, enchimento do reservatório, primeiro ano de operação e operação (ELETROBRÁS, 2003).

TABELA 2-15 - FREQUÊNCIA MÍNIMAS DE LEITURAS

grandezas medidas	PERÍODO DE OBSERVAÇÃO			
	construtivo	primeiro enchimento	Início de operação (*)	operação normal
deslocamentos superficiais	mensal	semanal	mensal	semestral
deslocamentos internos	semanal	semanal	quinzenal	mensal
deformação	semanal	semanal	quinzenal	mensal
pressão total / efetiva	semanal	2 semanais	semanal	mensal
poro-pressão	semanal	2 semanais	semanal	quinzenal
subpressão	semanal	3 semanais	2 semanais	quinzenal
nível de água	semanal	3 semanais	2 semanais	quinzenal
<i>vazão de infiltração</i>	-	<i>diárias</i>	<i>3 semanais</i>	<i>semanal</i>

FONTE: adaptado de Eletrobrás (2003)

(*) entre 1 e 5 anos após o enchimento.

As frequências de leitura apresentadas são entendidas como mínimas e necessitam serem intensificadas sempre que forem observadas leituras que superem o valor de atenção, ou outras ocorrências excepcionais, que resultem em variações acentuadas de leituras, tais como o rebaixamento

rápido do reservatório; cheia excepcional; sismo sensível na área da barragem; comportamento anômalo ou suspeito da estrutura, ou de algum instrumento; outros eventos que impliquem em carregamento ou descarregamento anormal das estruturas do barramento (ELETROBRÁS, 2003).

Durante o período construtivo o monitoramento das estruturas fornece importantes informações sobre os materiais, suas fundações e métodos construtivos, permitindo a verificação do projeto em andamento. A fase de enchimento do reservatório é o período em que a barragem passa a entrar em carga total pela primeira vez, sendo considerado este um dos períodos mais críticos na sua vida útil (FEMA, 2015).

A auscultação nessa fase assume um papel importante, pois, permite um diagnóstico preciso do comportamento da obra, possibilitando, com antecedência, a detecção de eventuais anomalias não previstas no projeto, que podem comprometer sua integridade, tais como deformações, subpressões, vazões de percolação excessiva e fissuramentos. Particularmente para a fase de enchimento do reservatório, poderá ser necessária a intensificação das leituras dos instrumentos de auscultação da barragem, em função do ritmo de enchimento do reservatório. No período operacional a instrumentação, aliada às inspeções visuais, fornece parâmetros para que se avalie o desempenho das estruturas ao longo do período de operação do reservatório, tendo-se uma maior frequência de leitura no primeiro ano de operação (FEMA, 2015).

Caso algum instrumento esteja apresentando leituras anômalas (incremento/redução de leituras em curto período, picos de leituras, comportamento inesperado em relação aos demais instrumentos, leituras acima dos valores de referência), a frequência de leitura deste instrumento deve ser intensificada, bem como as devidas inspeções, até que se descubra o motivo que gerou as leituras discrepantes, voltando à frequência normal após solucionado o problema (ELETROBRÁS, 2003).

2.1.24 Valores de referência

Atualmente tem se procurado bastante a implementação da automatização de auscultação para regular e alterar quando necessário de forma rápida a aquisição de leituras. Apesar de ser um sistema benéfico para visualizar com mais precisão o comportamento de uma estrutura, é importante entender que estes dados após coletados devem ser analisados e validados por especialistas da área e não só se baseando em avisos de alerta e alarme definidos como valores de controle no manual de monitoramento (ELETROBRÁS, 2003).

Os limites de controle também devem ser estabelecidos por estudos detalhados anteriores, determinísticos ou estatísticos como base para o modelo de comportamento da barragem (ICOLD, 2003).

Um nível de alarme associado a uma medição de monitorização de infiltrações é a leitura que, quando igualada ou excedida, gera uma ação subsequente. Esta ação subsequente poderia incluir a verificação da leitura inicial, a realização de uma inspeção imediata do local ou a confirmação para o início do esvaziamento do reservatório definido no PAE — Plano de Ação de Emergência de Barragens (FEMA, 2015).

O objetivo de um manual de monitoramento é estabelecer os procedimentos básicos para supervisão, controle e acompanhamento do comportamento de uma estrutura, neste caso estamos abordando a barragem de terra-enrocamento, que com base nos dados obtidos dos instrumentos de auscultação das obras civis. Tais instrumentos permitiram monitorar e detectar a ocorrência de eventuais anomalias durante a fase de enchimento do reservatório e período operacional da barragem. Neste manual devem ser apresentados os tipos de instrumentos instalados e sua localização na estrutura, seus objetivos, as frequências de leitura, os valores de controle das leituras obtidas, a compilação, processamento, armazenamento e análise dos dados (ELETROBRÁS, 2003).

Os valores de controle das leituras dos instrumentos da barragem são divididos, sempre que aplicável, em três categorias de nível de perigo: valores de atenção, valores de alerta e valores de emergência (ANA, 2016).

Recomenda-se que os dados sejam obtidos por análises teóricas, baseadas em parâmetros e hipóteses de projeto e, também, em dados de controle levantados em bibliografia para obras similares. Desta forma, esses valores deverão ser confrontados criticamente com aqueles medidos pela instrumentação, servindo como um referencial para a tomada de decisão quanto à implementação de ações corretivas. Qualquer valor anômalo que seja detectado deve ser avaliado em conjunto com os instrumentos adjacentes a ele, no sentido de analisar que se trata de uma tendência isolada do instrumento ou de uma tendência de comportamento regional. Caso seja identificado valor elevado num único instrumento, o mesmo deverá receber atenção especial para verificação das condições de funcionalidade. Eventuais ajustes dos valores de controle poderão ser necessários, em função de uma análise global das estruturas e de seu comportamento ao longo do tempo. Especial atenção é requerida no período de acompanhamento do enchimento do reservatório e no primeiro ano após o enchimento, quando as leituras da instrumentação deverão mostrar tendência de estabilização. Nos anos subsequentes, ao longo de toda a vida útil do empreendimento, a supervisão do desempenho das obras civis deve ser mantida, porém, com frequência de leituras reduzidas (ANA, 2016).

Tratando-se dos medidores de vazão, os mesmos têm a função de monitorar a percolação através da fundação e do sistema de drenagem interno da barragem. As águas efluentes do sistema de drenagem interno são de interesse para a segurança da barragem, principalmente em dois aspectos: fluxo incidente e transporte de partículas sólidas. Observações de vazões crescentes ao longo do tempo e presença de material fino em suspensão podem refletir alguns dos problemas que podem ocorrer com este tipo de estrutura. No entanto, os valores medidos devem ser tomados apenas como referência para auxiliar na interpretação do comportamento da estrutura, juntamente com a avaliação das leituras de outros instrumentos. Devem ser analisados em conjunto com dados piezométricos para verificar a eficiência do sistema de drenagem interna. Valores de vazão superiores à referência não implicam necessariamente quaisquer riscos para a estrutura, desde que os valores dos piezômetros estejam dentro do intervalo normal e não sejam observadas partículas em suspensão na água de percolação que poderia ser um sinal de erosão regressiva (INTERTECHNE, 2022).

Geralmente o valor de referência é correspondente à vazão obtida da modelagem numérica, sob um determinado regime de operação, o ideal que seja o nível máximo normal do reservatório estabelecido em projeto, alguma majoração necessita ser aplicada aos valores obtidos por modelagem numérica (ELETROBRÁS, 2003). A TABELA 2-16 indica um exemplo de quadro para apresentação dos valores de controle estabelecidos na fase de projeto ou em revisões periódicas programadas as barragens. Quando não é possível definir os níveis de controle (atenção, alerta e emergência), pode-se apresentar apenas um valor de controle intitulado “*valor de referência*” conforme apresentado na TABELA 2-17, principalmente em instrumentos que apresentem uma tendência histórica de vazão com valores muito baixos quase nulos. Convencionalmente é mais comum que as unidades de medidas das vazões totais sejam apresentadas em (l/min) ou (l/s) (INTERTECHNE, 2022).

TABELA 2-16 - EXEMPLO DE TABELA DE VALORES DE CONTROLE

Instrumento	Vazão (l/min) ou (l/s)	Vazão (l/min) ou (l/s)	Vazão (l/min) ou (l/s)
	Valor de atenção	Valor de alerta	Valor de emergência
Medidor de vazão			

FONTE: o autor (2022)

TABELA 2-17 - EXEMPLO DE TABELA DE VALOR DE REFERÊNCIA

Instrumento	Vazão (l/min) ou (l/s)
	Valor de referência
Medidor de vazão	

FONTE: o autor (2022)

Para estimar valores de controle, podendo estes serem expressos na forma de vazão específica, alguns valores são sugeridos conforme Ferreira (2022) para os níveis de atenção, alerta e emergência conforme apresentado a seguir na TABELA 2-18:

TABELA 2-18 - ESTIMATIVA DE VALORES DE CONTROLE

Valor de Controle	Q_e = vazão específica (l/min/m)
Atenção	2
Alerta	3,5
Emergência	5

FONTE: adaptado de Ferreira (2022)

O relatório de interpretação da instrumentação deve conter uma avaliação crítica dos dados coletados, com base em comparações com dados e critérios de projeto. Deve ser um documento conciso, claro e conclusivo, de modo a fornecer uma visão realista ao responsável pelo acompanhamento do desempenho e comportamento das obras civis, para a tomada de decisão, em tempo hábil, quanto a uma eventual necessidade de implementar medidas mitigadoras, mantendo problemas potenciais sob controle. O relatório denominado como o título de “*análise do comportamento das estruturas*” tem como conteúdo mínimo a avaliação da dispersão e comportamento das grandezas mensuradas em cada estrutura, o objetivo mais comum é a princípio comparar os valores reais medidos com os valores de controle previstos em projeto, explicando as oscilações e divergências diagnósticas durante as análises (ELETROBRÁS, 2003).

De posse das leituras de todos os instrumentos em operação, devem ser processados e para uma visualização histórica plotar os dados em tabelas e gráficos, atualmente já há softwares e plataformas on-line na nuvem que fazem este tipo de controle, gerando automaticamente informações em diversos formatos como o enfoque programados, estes dados deverão ser reunidos em um relatório contendo histórico, análise e conclusões, cuja frequência recomendada é a seguinte (INTERTECHNE, 2022).:

TABELA 2-19 - RELATÓRIOS DE ANÁLISE DA INSTRUMENTAÇÃO

Descrição	Frequência de emissão
Período construtivo (*)	mensal
Fase de enchimento	semanal
Primeiro ano de operação	trimestral
Operação	semestral

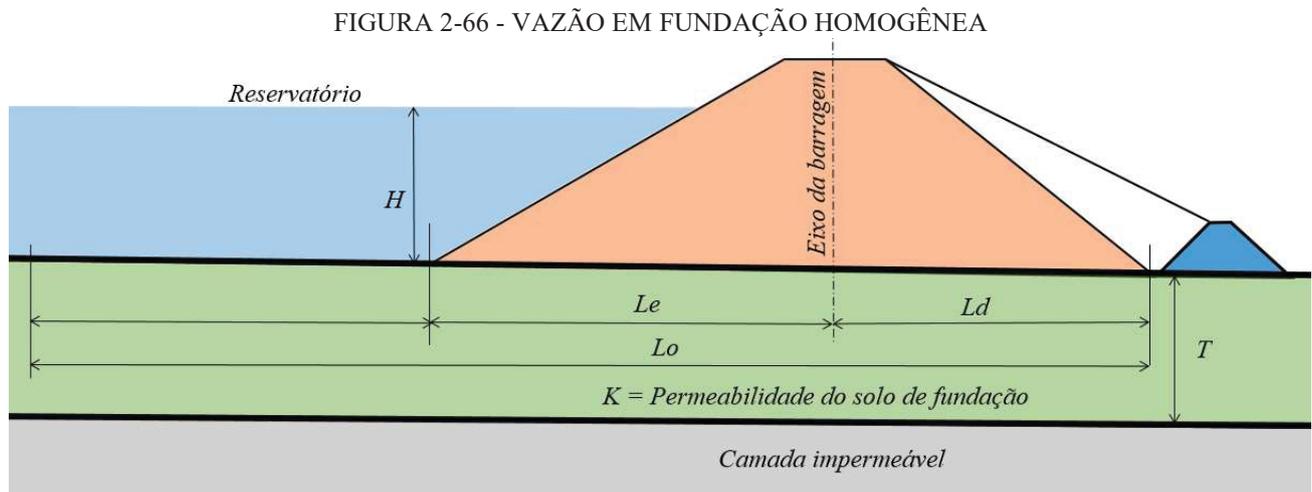
FONTE: adaptado de Eletrobrás (2003)

(*) não aplicável a grandeza de vazão de infiltração para o período de construção, onde ainda não há o carregamento do reservatório.

2.1.25 Cálculo teórico

Pode-se estimar valores de vazão a partir de estudos de escoamento que se baseiam diretamente nos valores de permeabilidade dos materiais. Quando se trata de uma fundação homogênea em contato com todo corpo da barragem, é possível estimar a *vazão específica* através da permeabilidade do trecho entre a camada impermeável e o contato do maciço da barragem com a fundação (SANDRONI, 2021).

A FIGURA 2-66 e formulas (9), (10) e (11) a seguir apresenta a formulação para esta estimativa de vazão:



FONTE: adaptado de Sandroni (2021)

$$Q = fu \cdot k \cdot H \quad (9)$$

$$fu = \frac{1}{\frac{L_o}{T + 0,86}} \quad (10)$$

$$L_o = L_d + 2 L_e \quad (11)$$

Onde:

L_o é o comprimento efetivo de percolação ($L_d + 2 \cdot L_e$)

L_d é comprimento entre o eixo da barragem até o contato da saia do talude de jusante com o terreno.

L_e é comprimento entre o eixo da barragem até o contato da saia do talude de montante com o terreno.

K é a permeabilidade da camada superficial.

H é altura do N.A do reservatório até a fundação.

T é a espessura da camada superficial.

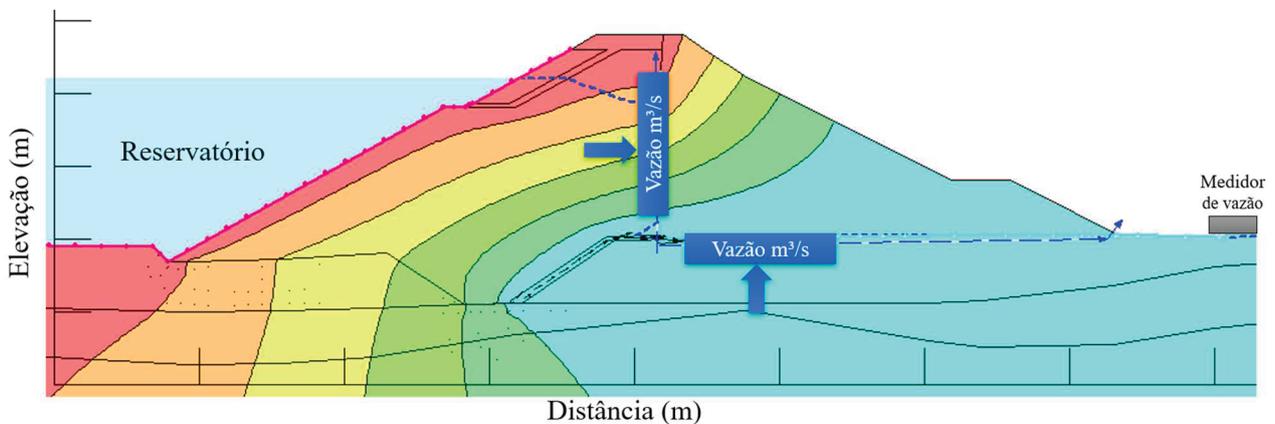
2.1.26 Modelagem numérica

A modelação numérica para prever infiltrações ao longo do maciço de uma barragem considera as cargas atuantes, uma das mais importantes é o carregamento do reservatório e acompanhamento do processo de enchimento do mesmo. Alguns softwares já consolidados no mercado permitem que o modelo possa ser calibrado com dados reais com objetivo em fazer uma retroanálise paramétrica em empreendimentos, já construídos. As condições de infiltração estimadas se baseiam particularmente em condições reais no local, que podem ser desde a geometria da seção da barragem, permeabilidade dos materiais empregados e anisotropia da fundação (FEMA, 2015).

A vantagem de modelos numéricos é conseguir tempo recorde avaliar com precisão algum potencial de anomalia em uma estrutura, auxilia também tem parâmetros de comparação correlacionando com dados de leituras reais de instrumentação. Importante tentar simular o mais próximo da realidade a sequência de construção, exatidão nas propriedades dos materiais para poder auxiliar até mesmo em tomadas de decisão. A seleção correta das características dos materiais é a chave para o sucesso do método (DRIP, 2018).

A FIGURA 2-67 apresenta o resultado de uma análise de percolação em forma de linhas equipotenciais, podendo-se extrair em cada nó o valor de vazão resultante naquele determinado ponto, usualmente para estimar um valor de vazão mais realista levando em conta o comportamento de uma barragem de terra homogênea, se extrai as vazões no sentido horizontal imediatamente a montante do filtro vertical e também na fundação no sentido vertical no contato da fundação com o maciço da barragem (O AUTOR, 2022).

FIGURA 2-67 - RESULTADO DE ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO



FONTE: o autor (2022)

2.1.27 Vazão específica

Cruz, et al. (2015), menciona que a origem consolidada da proposta clássica de Casagrande em dividir uma barragem em 2 zonas tendo como referência de divisão o eixo do barramento: os dois trechos divididos são denominados área a montante e área a jusante, este conceito tem base sólida em experiência de aplicação em grandes empresas de projeto. O conceito resumidamente se detém na condição que na região a montante de manter a água e na zona a jusante deixar sair a água totalmente de forma controlada.

O conceito de vazão específica entende-se a vazão total dividida pelo comprimento do trecho de contribuição de uma barragem, a tendência é de quanto mais comprida é barragem espera-se uma maior vazão, entretanto, quando tratamos de vazão específica é possível comparar várias barragens com geometrias distintas entre si. Trabalhando com análises em termo de vazão específica se torna possível comparar vazões resultantes entre diferentes barragens. Ainda para comparar barragens com alturas diferentes é possível calcular a vazão específica dividindo a vazão total pela altura e comprimento, possibilitando a comparação em tipos diferentes de barragens. Entretanto, o mais recomendável é dividir a vazão total pelo comprimento. Importante sempre avaliar em conjunto as medições de vazão se é visível mudança na coloração da água, materiais finos em suspensão ou concentração de material a jusante da barragem, este fenômeno pode indicar que possa estar ocorrendo carreamento de finos do interior da barragem (SILVEIRA, 2006).

Em comparar vazão efetivamente medidas com vazão teórica obtida em análises numéricas, umas diferenças entre estas vazões em até 10 vezes são aceitáveis, considerando alguns fatores de dispersão de resultados obtidos por ensaios de campo inerente ainda as limitações de um número maior de amostragem. Geralmente as análises de fluxo computacionais tendem a indicar valores de vazões menores as efetivamente medidas em campo, esta diferença também pode estar ligada a aspectos importantes como desconhecer ou ter uma grande variabilidade a geologia local, a barragem ter uma geometria mais complexa, falta de homogeneidade dos materiais empregados no aterro ou até mesmo falta de caracterização da fundação (SILVEIRA, 2006).

A seguir na TABELA 2-20 são apresentadas vazões de 35 barragens de terra e enrocamento Brasileiras e na sequência a TABELA 2-21 apresenta o tipo de seção da cada barragem bem como o material constituintes em suas fundações.

TABELA 2-20 - VAZÕES OBSERVADAS EM BARRAGENS BRASILEIRAS

Legenda	Barragem	Hb (m)	Lb (m)	Qt prevista (l/min)	Qt medida (l/min)	Qe medida (l/min/m)
01	Marimbondo	40	600	50	120	0,20
02	Água Vermelha (OD)	54	1875	5000	1500	0,80
03	Água Vermelha (OE) (***)	63	150	4500	2320	12,80
04	Jacareí	60	1200	-	480	0,40
05	Juqueri (Paiva Castro)	17	212	25	508,8	2,40
06	Águas Claras	30	120	-	480	4,00
07	Capivari Cachoeira	56	315	220	630	2,00
08	Atibainha	35	437	600	1048,8	2,40
09	Cachoeira	28	300	230	450	1,50
10	Jaguari	74	400	180	360	0,90
11	Dique Jaguari	90	192	270	268,8	1,40
12	Paraibuna	90	600	660	18	0,03
13	Dique Paraibuna	40	600	300	90	0,15
14	Saracuruna (*)	34	140	-	462	3,30
15	Ensecadeira Itaipu 1	35	570	-	399	0,70
16	Ensecadeira Itaipu 2	40	500	-	400	0,80
17	Três Irmãos (OD)	82	1130	-	2147	1,90
18	Três Irmãos (OE) (**)	60	1460	-	15038	10,30
19	Canoas I	18	160	-	544	3,40
20	Itaipu (OD)	25	870	-	1557,3	1,79
21	Itaipu (OE)	30	2050	-	2890,5	1,41
22	Dique 1 de Itá	35	560	-	728	1,30
23	Boa Esperança (OD)	55	1160	-	232	0,20
24	Boa Esperança (OE)	55	1360	-	1088	0,80
25	Mosquito	30	760	-	228	0,30
26	Dique 1 de Xingó	30	250	-	35	0,14
27	Dique 2 de Xingó	30	550	-	55	0,10
28	Dique 3 de Xingó	35	200	-	42	0,21
29	Dique 4 de Xingó	35	50	-	37,5	0,75
30	Cana Brava (OD)	41	400	-	168	0,42
31	Cana Brava (OE)	65	303	-	342,39	1,13
32	Dique 1 de Cana Brava	22	290	-	147,9	0,51
33	Dique 2 de Cana Brava	25	820	-	434,6	0,53
34	Bananal	24	350	-	420	1,20
35	Samambaia	26,5	300	-	60	0,20

FONTE: Adaptada de CRUZ Paulo. T., et al. (2015) e Silveira (2006)

Qt = Vazão total estimada (l/s); Qe = Vazão específica (l/s/m); Hb = Altura máxima da Barragem (m) e Lb = Comprimento da Barragem (m); OD - Ombreira Direita | OE - Ombreira Esquerda; (03) - Fundação em Lava Aglomerática (k=10cm/s); (14) - Após tratamento da fundação para reduzir as infiltrações; (18) - Altas vazões através da Barragem de Terra da Margem Esquerda de Três Irmão ocorrem por meio de sistema de poços de alívio junto pé de jusante, que atingem camada de brecha basáltica muito permeável.

TABELA 2-21 - GEOLOGIA DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS DE TERRA

Legenda	Barragem	Tipo de Seção	Fundação
01	Marimbondo	homogênea	solo coluvionar e residual de basalto
02	Água Vermelha (OD)	homogênea	solo coluvionar e residual de basalto
03	Água Vermelha (OE) (***)	homogênea	lava aglomerática (k=10cm/s)
04	Jacareí	homogênea	solo residual de gnaiss
05	Juqueri (Paiva Castro)	homogênea	argilas, aluvião e solo residual
06	Águas Claras	homogênea	solo residual de granito e xistos
07	Capivari Cachoeira	homogênea	solo residual de granito e gnaiss
08	Atibainha	homogênea	solo residual de biotita-gnaiss
09	Cachoeira	homogênea	solo residual de biotita-gnaiss
10	Jaguari	homogênea	solo residual de gnaiss
11	Dique Jaguari	homogênea	solo residual de gnaiss
12	Paraibuna	terra e enrocamento	solo residual de biotita-gnaiss
13	Dique Paraibuna	homogênea	solo residual de biotita-gnaiss
14	Saracuruna (*)	homogênea	solo residual de migmatito
15	Enscadeira Itaipu 1	terra e enrocamento	solo coluvionar e residuais de basalto
16	Enscadeira Itaipu 2	terra e enrocamento	solo coluvionar e residuais de basalto
17	Três Irmãos (OD)	homogênea	solo coluvionar e residual de basalto
18	Três Irmãos (OE) (**)	homogênea	solo coluvionar e residual de basalto
19	Canoas I	homogênea	solo residual e basalto muito alterado
20	Itaipu (OD)	-	solo coluvionar e residual de basalto
21	Itaipu (OE)	-	solo coluvionar e residual de basalto
22	Dique 1 de Itá	-	solo coluvionar e residual de basalto
23	Boa Esperança (OD)	-	solo coluvionar e residual de diabásio
24	Boa Esperança (OE)	-	solo coluvionar e residual de diabásio
25	Mosquito	-	solo residual de gnaiss e anfíbolito
26	Dique 1 de Xingó	-	solo residual de granito-gnaiss
27	Dique 2 de Xingó	-	solo residual de granito-gnaiss
28	Dique 3 de Xingó	-	solo residual de granito-gnaiss
29	Dique 4 de Xingó	-	solo residual de granito-gnaiss
30	Cana Brava (OD)	-	quartzo-micaxistos e gnaisses facoidais
31	Cana Brava (OE)	-	quartzo-micaxistos e gnaisses facoidais
32	Dique 1 de Cana Brava	-	quartzo-micaxistos e gnaisses facoidais
33	Dique 2 de Cana Brava	-	quartzo-micaxistos e gnaisses facoidais
34	Bananal	-	solo residual de quartzo-micaxisto
35	Samambaia	-	solo residual de granito-gnaiss

FONTE: Adaptada de CRUZ Paulo. T., et al. (2015) e Silveira (2006)

OD - Ombreira Direita | OE - Ombreira Esquerda

Silveira (2006) indica que uma vazão específica de **5,00 l/min/m** seria uma condição normal, não indicando a necessidade de intervenção com tratamento geológico geotécnico. Alternativas para

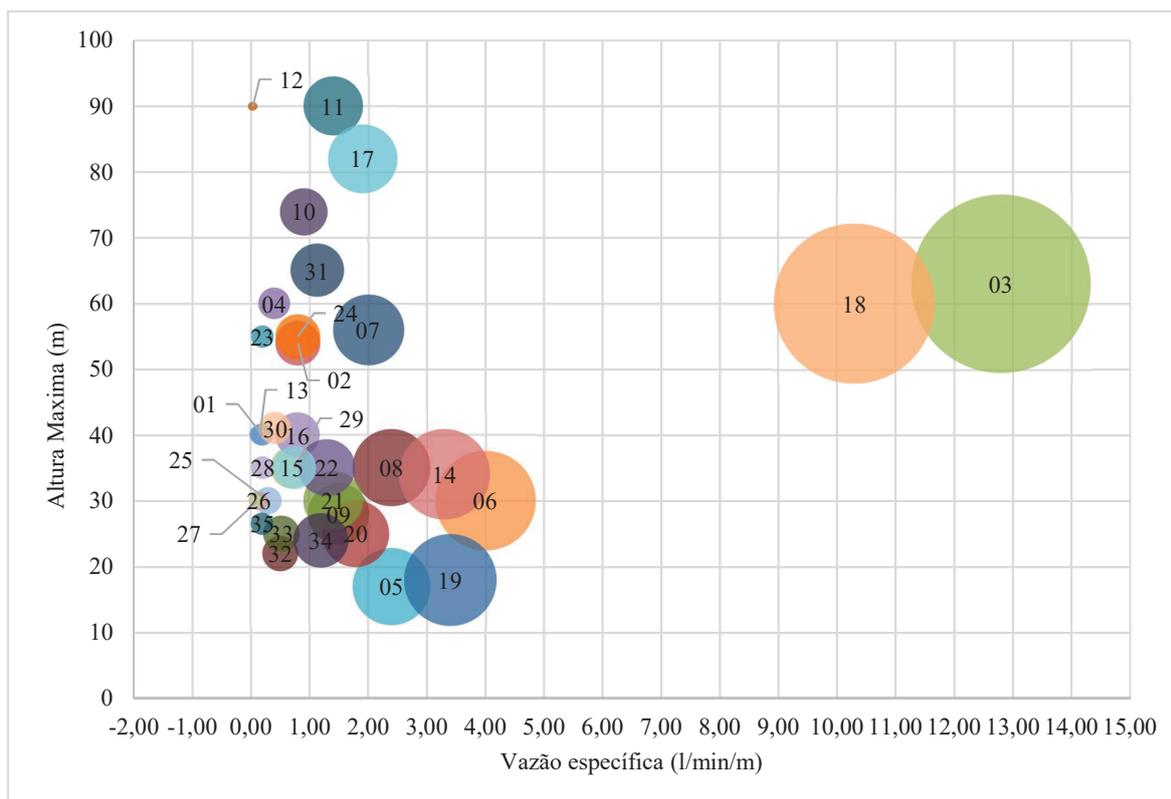
remediar anomalias quando observado aumento de vazão não esperada, pode-se dependendo do caso, a execução de um filtro invertido, drenos de alívio, injeções de contato entre outras soluções para diminuição de infiltrações.

Sandroni (2021) descreve que o valor, em termos de vazão específica menor igual a **5,00 l/min/m**, seria em casos específicos, um número aceitável, entretanto valores de vazão específica superiores a **15,00 l/min/m** seria tratada como um valor alto preocupante.

Recomenda-se que à utilização destes valores sejam analisados com um certo cuidados, verificando se drenagem decorre de um fluxo uniforme com uma dissipação da vazão localizada de um a poucos de saída (SANDRONI, 2021).

O GRÁFICO 2-3 e GRÁFICO 2-4 apresentam a plotagem da vazões específicas versus a altura máxima da 35 barragens já apresentadas anteriormente na TABELA 2-20.

GRÁFICO 2-3 - VAZÃO ESPECÍFICA *versus* ALTURA MÁXIMA



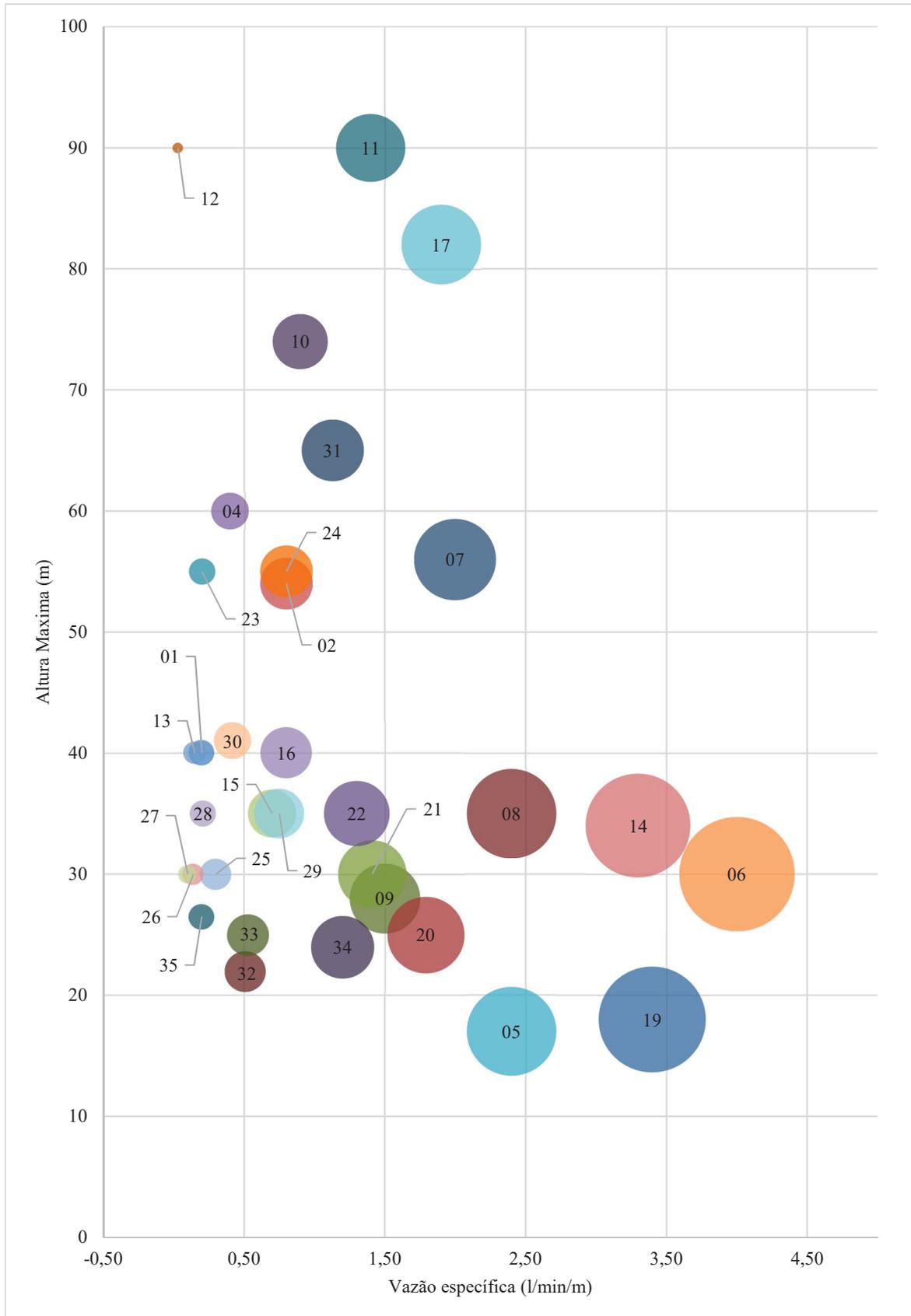
FONTE: Adaptada de Silveira (2006)

(03) – Água Vermelha (OE) - Fundação em lava aglomerática ($k=10\text{cm/s}$)

(14) – Saracuruna - Após tratamento da fundação para reduzir as infiltrações.

(18) – Três Irmãos (OE) - Altas vazões através da Barragem de Terra da Margem Esquerda de Três Irmãos ocorrem por meio de sistema de poços de alívio.

- Para demais legendas numéricas das barragens ver TABELA 2-21.

GRÁFICO 2-4 - VAZÃO ESPECÍFICA *versus* ALTURA MÁXIMA

FONTE: Adaptada de Silveira (2006)

2.2 ANALISES ESTATÍSTICAS

Analises por ferramentas estatísticas na engenharia, tem o objetivo que auxiliar na compreensão quando há uma gama de dados que não podem ser explicados por métodos diretos convencionais. A estatística na engenharia consegue auxiliar nas tomadas de decisão principalmente quando há variáveis que podem ser correlacionadas com a variável principal. Alguns métodos de coletas de dados podem ser utilizados em análises estatísticas dentro da engenharia, sendo o Estudo Retrospectivo, Estudo de Observação e Experimentos Planejados (MONTGOMERY, 2012).

2.2.1 Estatística Descritiva

Há inúmeras ferramentas de coleta e análise de dados que podem correlacionar informações reais ou experimentais na engenharia. A estatística descritiva, para ter como resultado uma conclusão, acaba se baseando na reunião de valores numéricos por meio de amostragem, os resultados podem ser apresentados de forma gráfica ou tabelas interativas. Em resumo, a estatística descritiva pode ser representada através das ferramentas que são: tabelas de frequência, média aritmética, mediana, moda, separatrizes (mediana, quartis e percentis), medidas de variabilidade, amplitude, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, análise gráfica e histograma (BITTENCOURT, 2014).

2.2.2 Correlação R (Pearson)

Com intuito de verificar de maneira linear se um par de variáveis tem relação, utiliza-se uma das ferramentas da estatística chamada “Coeficiente de Correlação de Pearson, esta técnica pode também ser representada pela letra “R”. De modo a entender qual a direção esta relação está representada, verifica-se nos extremos o valor positivo e negativo. O Coeficiente de Correlação de Pearson é uma técnica para medir se duas variáveis estão relacionadas de maneira linear. O valor ser negativo ou positivo indica a direção desta relação. Algumas correlações destacadas a seguir estão consolidadas como referências bibliográficas (DAMASIO, 2023).

Numa faixa de $R=0,10$ a $0,29$ é considerado uma correlação fraca, $R=0,30$ a $0,49$ uma correlação moderada e para o intervalo de $R=0,50$ a 1 uma correlação forte COHEN (1988). Outra referência que pode ser tomada como base considera uma faixa $R=0,10$ a $0,30$ como correlação fraca, o intervalo de $R=0,40$ a $0,60$ uma correlação moderada e $R=0,70$ a 1 como uma correlação forte DANCEY E REIDY (2005).

2.2.3 Esperança Matemática

Trata-se nada mais que a média de uma variável continuada aleatoriamente. Dentro da análise se diferencia da mediana do valor médio, pois, a esperança matemática é a média conhecida também como expectância (FILHO, 2019).

2.2.4 Regressão Linear Múltipla

A Regressão Linear Múltipla é uma ferramenta poderosa para a análise de dados. Ela nos permite entender como diferentes variáveis se relacionam com uma variável de desfecho e como elas podem ser usadas para prever o valor de uma variável de desfecho. É importante lembrar que a Regressão Linear Múltipla não é uma ferramenta milagrosa e que deve ser usada com cautela. É importante ter em mente que ela não pode prever o futuro e os resultados obtidos devem ser interpretados com cuidado (DAMASIO, 2023).

No entanto, se você estiver usando regressão para fins de tomada de decisão, então excluir variáveis fracas e insignificantes pode ser a melhor opção. Isso pode ajudar a simplificar o modelo e torná-lo mais fácil de entender. Além disso, excluir variáveis fracas e insignificantes pode ajudar a reduzir o *overfitting*, o que pode melhorar o desempenho do modelo (DAMASIO, 2023).

2.2.5 Distribuição Normal (Gaussiana)

A distribuição Normal é usada para modelar, variáveis que possuem uma distribuição contínua, como altura, peso, temperatura, etc. Ela é usada para descrever a probabilidade de ocorrência de um determinado evento. Por exemplo, ela pode ser usada para estimar a probabilidade de que um determinado indivíduo seja mais alto do que a média da população. A distribuição Normal é usada em diversas áreas, como estatística, finanças, ciência da computação, engenharia, medicina, etc. Ela é usada para estimar a probabilidade de ocorrência de um determinado evento, para prever o comportamento de variáveis aleatórias, para estimar parâmetros de modelos estatísticos, para testar hipóteses, etc. (BITTENCOURT, 2014).

2.2.6 Histograma

O histograma é uma ferramenta útil para visualizar e interpretar os dados de uma tabela de frequência, pois, permite que sejam identificados tendências, padrões e distribuições. É possível também

comparar as frequências relativas entre as classes, além de descobrir possíveis outliers. A função de densidade dos dados é uma representação gráfica da frequência relativa dos dados. Ela é usada para determinar a probabilidade de um evento ocorrer. A função de distribuição dos dados é usada para determinar a probabilidade de um evento ocorrer num intervalo específico. Ela é usada para calcular a probabilidade acumulada de um evento ocorrer. A linha de frequência é uma representação gráfica de dados estatísticos, que mostra a frequência de ocorrência de cada valor de uma variável. Ela é construída a partir de um histograma, que é uma representação gráfica dos dados estatísticos, que mostra a frequência de ocorrência de cada valor de uma variável. A linha de frequência é construída a partir do histograma, unindo os vértices. A ogiva também é usada para representar a distribuição de frequência de dados, em que a frequência é plotada em função do valor. Esta representação pode ser usada para comparar as distribuições de diferentes conjuntos de dados. Além disso, a ogiva pode ser usada para estimar a probabilidade de um determinado evento ocorrer. Por exemplo, a ogiva pode ser usada para estimar a probabilidade de um determinado número de pessoas (LIMA, 2016).

3 MÉTODOS E MATERIAIS

3.1 MÉTODOS

3.1.1 Análise de dados

Gerhardt et al. (2009) descrevem que, diferente de uma pesquisa qualitativa, os resultados obtidos no método de análise de dados quantitativo podem ser quantificados. Com base em uma amostra considerada representativa do estudo, os resultados obtidos refletem a realidade.

A pesquisa quantitativa se concentra na objetividade e se sustenta com a abordagem onde a realidade só pode ser entendida a partir da análise de dados brutos coletados com o auxílio de ferramentas padronizadas e neutras. O método denominado como quantitativo tem suas características expressas em resultados conclusivos, demonstra seus princípios e mecanismos enraizados no pensamento lógico positivista, e tendem ainda a enfatizar o raciocínio dedutivo e atributos totalmente mensuráveis, visando quantificar em números o problema e compreender a extensão de sua abrangência.

Em síntese, esta pesquisa científica fornecera informações numéricas sobre o comportamento de barragens de terra e enrocamento por compilação de dados reais de vazões observadas em barragens brasileiras. Segundo Bazzan (2019), a (norma) ISO 9001 (ABNT, 2015) descreve o sistema de qualidade é uma ferramenta que tem como um dos seus pilares a melhoria contínua, indispensável para um empreendimento que quer expandir e ajustar seu desempenho, destaca ainda que para se obter uma maior confiabilidade de um comportamento, é necessário um período histórico de observação.

De acordo com Ribeiro et al. (2001), a etapa quantitativa permite a análise numérica das informações coletadas na coleta de dados. Antes da pesquisa de aplicação final, as ferramentas de coleta de dados necessitam ser testadas e todos os problemas possíveis necessitam ser eliminados.

A pesquisa quantitativa utiliza a expressão de conteúdo matemático para descrever as evidências dos fenômenos e as correlações entre as variáveis desconhecidas. Ainda os métodos quantitativos usam o padrão temporal histórico dos dados para prever a tendência do seu comportamento futuro (MILESKI, 2007).

Segundo Tubino (2007), os métodos quantitativos podem ser ainda apontados em técnicas baseadas em correlações. Tratando-se de correlações matemáticas, o algoritmo numérico iterativo propõe uma série de etapas destinadas a convergir para a aproximação da solução exata, caracterizando a ferramenta como um estudo quantitativo. Desta forma, conclui-se ainda que esta pesquisa em epígrafe proporcionara a obtenção das respostas mediante compilação de dados reais numéricos para manuseio

matemático, com foco no uso de um método que possa expressar resultados mensuráveis, para tanto o método de análise de dados desta pesquisa será *quantitativo*.

Yin (2001) descreve que numa avaliação de confiabilidade é possível demonstrar que as operações de um determinado estudo podem ser repetidas, onde em termos de metodologia se apresenta os mesmos resultados por meio de utilização de protocolo de casos reais com o desenvolvimento de banco de dados. O objetivo da confiabilidade é permitir que outro pesquisador use os mesmos dados e siga as etapas descritas na pesquisa para obter os mesmos resultados (YIN, 2001).

3.1.2 Delimitação do trabalho

Considera-se que as grandezas que estão sendo monitoradas em uma barragem tendem a ter um tempo de estabilização decorridos alguns anos após o enchimento reservatório, mediante a este fato rever de tempos em tempos os valores de controle dos instrumentos especificados na fase de projeto é uma prática recomendada, pois, o volume de coleta de dados permite o ajuste dos valores de controle existentes mediante o comportamento real de uma estrutura em funcionamento (ELETROBRÁS, 2003).

Para uma maior contribuição em novos projetos e empreendimentos de barragens, observar o comportamento de obras em operação certamente pode auxiliar a entender com mais exatidão o comportamento de novas estruturas com posse de dados reais medidos em campo, sem contar que o histórico pode contribuir em novas análises e ajudar na catalogação de lições apreendidas, buscando o aperfeiçoamento e melhoria contínua nos processos e condições comerciais de obras de grande porte.

Destaca-se que além de comparar vazões medidas versus vazões de projeto, é importante comparar vazões medidas com outras barragens do mesmo gênero, tipo, porte e com geologia semelhante (SILVEIRA, 2003).

Como aplicação deste estudo, pretende-se utilizar base de dados de um acervo de barragens de terra e enrocamento brasileiras já em operação no país. Não foi escopo desta pesquisa a execução de ensaios de materiais in-situ ou em laboratório, o trabalho de desenvolvimento da pesquisa se limitou na avaliação de dados de projeto e construção de obras existentes.

O estudo foi limitado à reunião de dados reais de instrumentação considerando as vazões observadas em barragens de terra em enrocamento. Serão aproveitados já os resultados obtidos e consolidados em análises para o projeto executivo, o que excluiu a necessidade de novas interpretações dos dados brutos coletados durante as investigações e ensaios de campo. Por fim foram apresentadas em forma de tabelas e gráficos correlações entre vazões específicas observadas com outras informações

importantes que são: geometria da barragem (altura e comprimento), nível do reservatório, vazões teóricas de projeto, geologia de fundação, permeabilidade da fundação, permeabilidade do núcleo de vedação da barragem e por fim uma análise probabilística utilizando algumas ferramentas estatísticas.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Protocolo de dados

O objetivo da pesquisa é analisar o comportamento de *133 barragens de terra e enrocamento* por compilação de dados de vazões observadas através do plano de monitoramento e auscultação, plotando estas informações comparando com demais informações, grandezas e dados que podem influenciar no comportamento das vazões de uma barragem. As informações foram acessadas de um banco de dados de uma empresa projetista, sendo, em geral, relatórios de construção, dados relacionados ao desenvolvimento e acompanhamento do projeto executivo, relatórios de análise de comportamento de estruturas de terra e enrocamento, planilhas de leituras de instrumentação, relatórios da geologia de fundação, memórias de cálculo entre outros materiais de pesquisa.

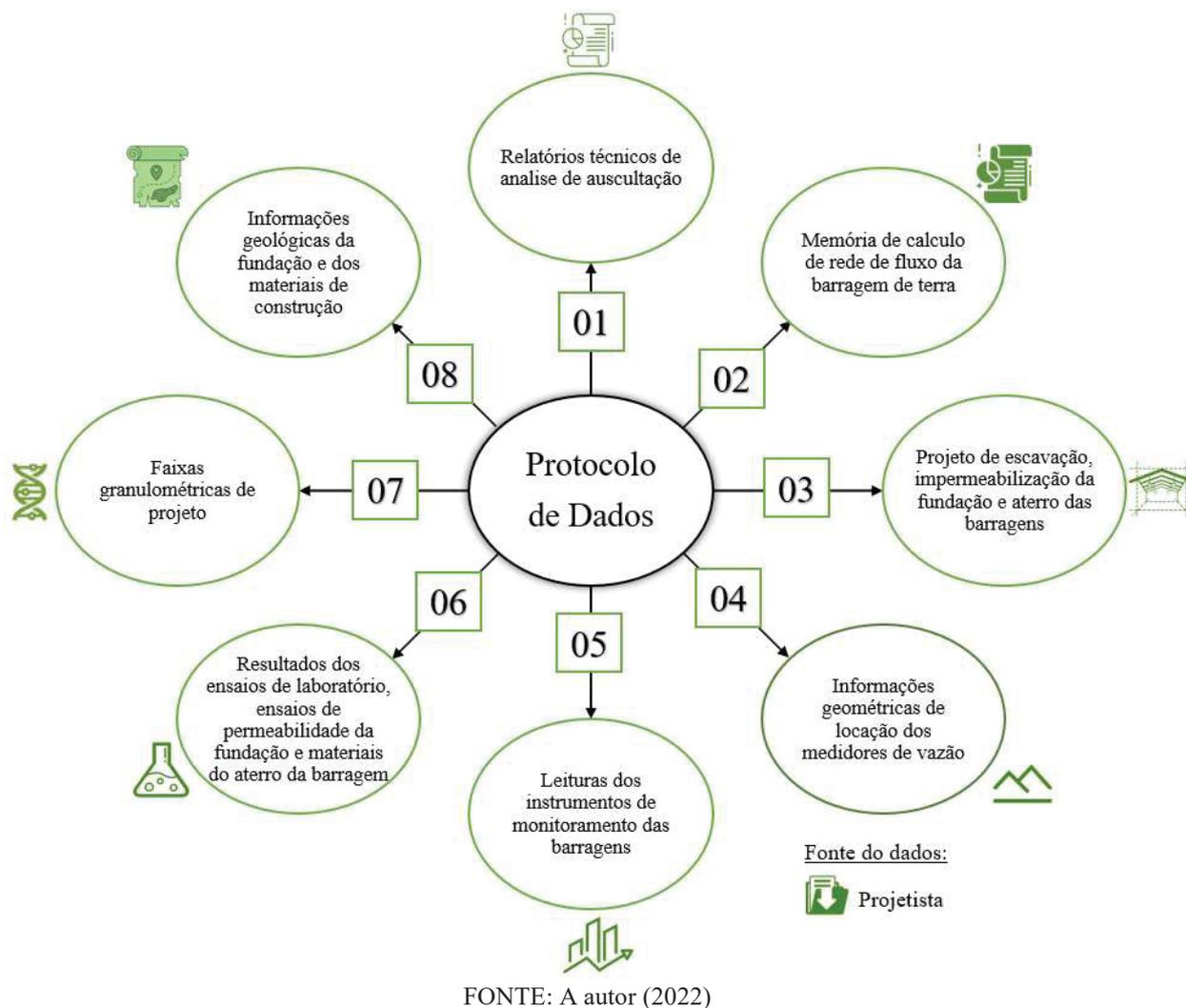
Para que a pesquisa fosse possível foi necessário realizar a coleta de dados que evidenciem as características geométricas da barragem de terra, bem como informações da distribuição dos materiais no corpo do maciço do aterro; descrição dos materiais do aterro, descrição da fundação e parâmetros de permeabilidade. Os dados indicados na FIGURA 3-1 e TABELA 3-1 a seguir foram considerados suficientes para o desenvolvimento do projeto de pesquisa e construção das tabelas e gráficos resumindo as vazões específicas reais medidas em *133 barragens de terra e enrocamento*.

TABELA 3-1 - FORMATOS DOS ARQUIVOS

Extensão / Formato	Software	Arquivo
DOC	WORD	01, 02 e 08
XLS	EXCEL	04, 05 e 06
DWG	AUTO CAD	03, 06 e 07
PDF	ADOBE ACROBAT	todos os arquivos

FONTE: A autor (2022)

FIGURA 3-1 - PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS E FONTES



3.2.2 Vazões observadas

Apresentaremos aqui algumas correlações de dados de modo que ao final se possa ter uma sensibilidade de comportamento de vazões específicas considerando, dados reais efetivamente lidos em barragens brasileiras.

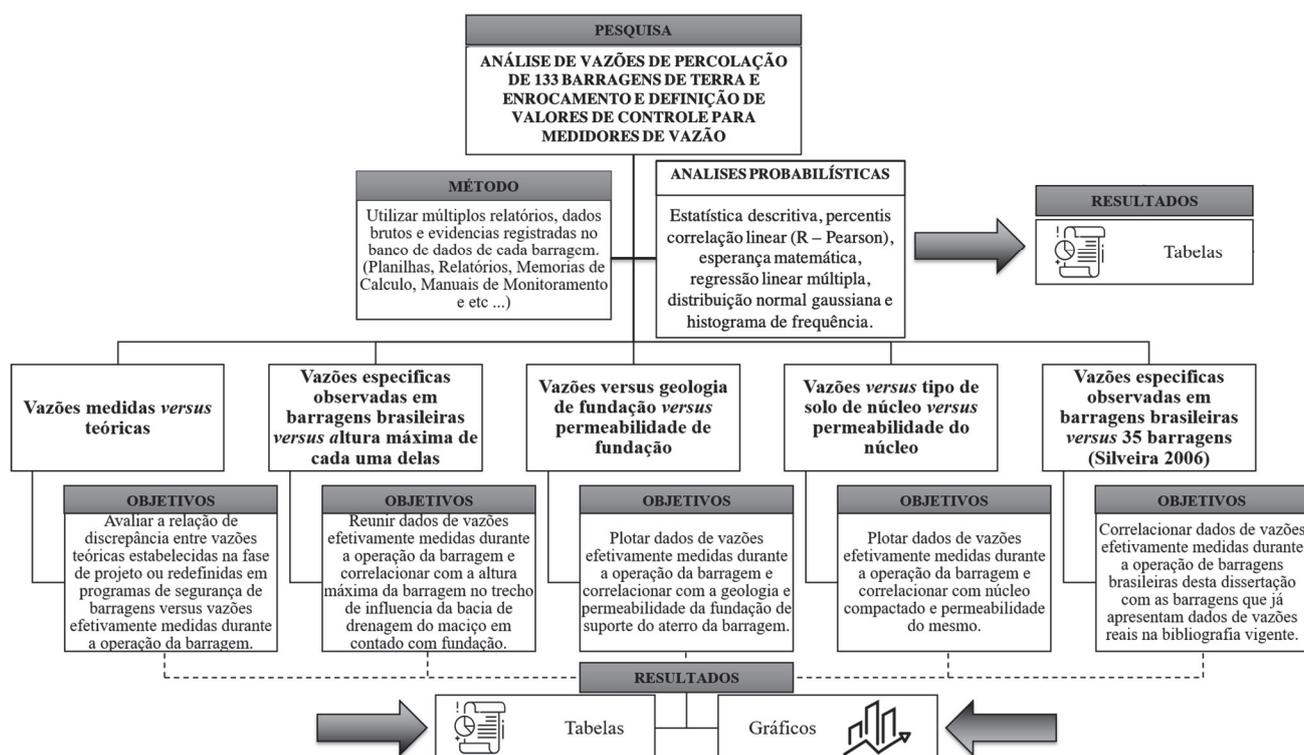
Um dos objetivos é que através destes estudos se possa ampliar e aumentar o acervo de dados reais consolidados de vazões específicas de barragens de terra e enrocamento já apresentadas bibliograficamente por (CRUZ, 2004; SILVEIRA, 2006).

O intuito foi consolidar esta pesquisa com fundamentos e objetivos de estudo analítico, ajudando a intensificar e comprovar a influência de outras grandezas de uma barragem de terra com as vazões observadas nestas estruturas.

Os cenários de apresentação de resultados serão indicados de forma gráfica de modo a facilitar o entendimento do comportamento destas barragens brasileiras por sensibilidade.

A seguir na FIGURA 3-2 são apresentadas as análises e correlações que foram efetuadas durante a pesquisa.

FIGURA 3-2 - METODOLOGIA PARA ANÁLISES

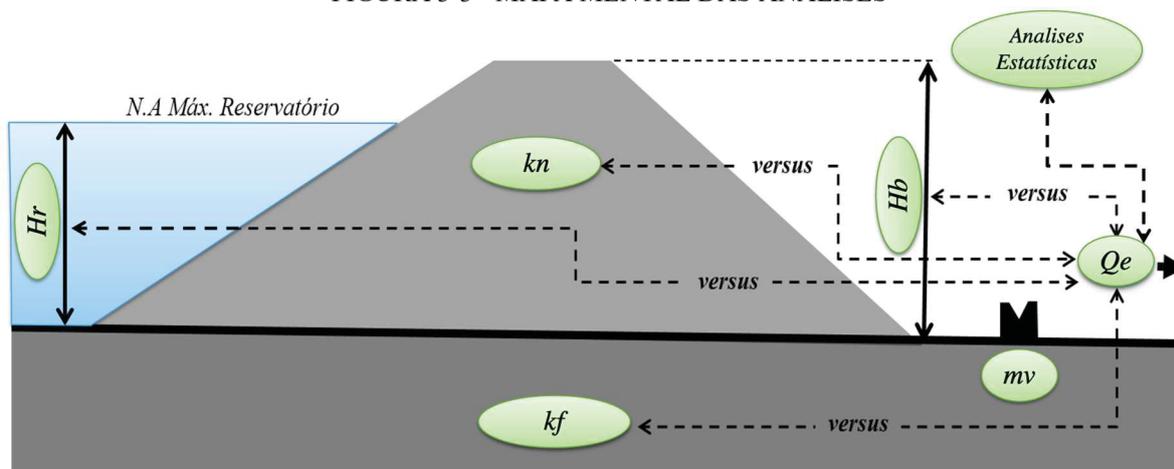


FONTE: o autor (2022)

O mapa mental é referente à pesquisa a respeito de “*Análise de vazões de percolação de 133 barragens de terra e enrocamento e definição de valores de controle para medidores de vazão*” onde serão apresentadas as principais correlações que podem influenciar diretamente o comportamento da vazão específica de uma estrutura.

O mapa mental é uma ferramenta de gerenciamento de informações e estes são utilizados para otimizar a memória a partir de representações visuais de conceitos e ideias de forma simplificada, organizando as informações e facilitando o aprendizado. Apresentado a seguir na FIGURA 3-3 o mapa mental referente a este trabalho.

FIGURA 3-3 - MAPA MENTAL DAS ANÁLISES



FONTE: o autor (2022)

H_b : altura máxima do aterro da barragem, H_r : altura máxima do reservatório, Q_e : vazão específica, k_f : permeabilidade da fundação, kn : permeabilidade do núcleo e mv : Medidor de vazão.

Os dados serão todos reunidos em um único banco de dados que poderão ser atualizados futuramente em novas pesquisas, artigos, referências bibliográficas e trabalhos com mais informações complementares de demais barragens de terra e enrocamento não catalogadas no levantamento da pesquisa em epígrafe.

4 VAZÕES REAIS OBSERVADAS EM BARRAGENS BRASILEIRAS

A seguir na TABELA 4-1 são apresentados valores de vazões de drenagem que percolam através do maciço e fundação de 98 barragens brasileiras, neste estudo foram observadas leituras históricas de 280 medidores de vazão implantados e distribuídos nestas 98 barragens.

Somando com as 35 barragens já apresentadas por Silveira em 2006, totaliza-se 133 barragens de terra e enrocamento com valores reais de vazões observadas em barragens brasileiras.

As barragens estudadas por Silveira (2006) neste estudo serão intituladas como Barragens **BTE01** a **BTE35** e as demais barragens estudadas nesta pesquisa são intituladas de Barragens **BTE36** a **BTE133**. Além das vazões observadas são apresentadas a altura máxima da seção, altura máxima do reservatório e comprimento total do barramento.

Também é apresentada uma relação entre a vazão teórica com a maior vazão medida, na coluna Relação (B/A), fazendo a média das barragens as quais foi possível obter também as vazões teóricas, em média conclui-se que ao comparar estas vazões, a vazão real de campo pode ser **6,81 vezes** maior que a vazão teórica de projeto.

4.1 VAZÕES TOTAIS E VAZÕES ESPECÍFICAS OBSERVADAS

TABELA 4-1 - VAZÕES TOTAIS E VAZÕES ESPECÍFICAS OBSERVADAS

Le-genda	Vazões					Hb altura máxima	Hr al- tura má- xima do reserva- tório	Lb compri- mento
	Qe (teórica) (A)	Qe (maior medida) (B)	Qt (teórica) (A)	Qt (maior medida) (B)	Relação			
	(l/min/m)	(l/min/m)	(l/min)	(l/min)	(B/A)			
BTE01	0,08	0,20	49,80	120,00	2,41	40,00	37,00	600,00
BTE02	2,66	0,80	4980,00	1500,00	0,30	54,00	51,00	1875,00
BTE03		13,80		2320,00	0,52	63,00	60,00	150,00
BTE04		0,40		480,00		60,00	57,00	1200,00
BTE05	0,11	2,40	24,00	508,80	21,20	17,00	14,00	212,00
BTE06		4,00		480,00		30,00	27,00	120,00
BTE07	0,69	2,00	216,00	630,00	2,92	56,00	57,00	315,00
BTE08	1,37	2,40	600,00	1048,80	1,75	35,00	32,00	437,00
BTE09	0,76	1,50	228,00	450,00	1,97	28,00	25,00	300,00
BTE10	0,45	0,90	180,00	360,00	2,00	74,00	71,00	400,00
BTE11	1,41	1,40	270,00	268,80	1,00	90,00	87,00	192,00
BTE12	1,10	0,03	660,00	18,00	0,03	90,00	87,00	600,00
BTE13	0,50	0,15	300,00	90,00	0,30	40,00	37,00	600,00
BTE14		3,30		462,00		34,00	31,00	140,00
BTE15		0,70		399,00		35,00	32,00	570,00
BTE16		0,80		400,00		40,00	37,00	500,00

Le-genda	Vazões					Hb altura máxima	Hr al- tura má- xima do reserva- tório	Lb compri- mento
	<i>Q_e</i> (teórica) (A)	<i>Q_e</i> (maior medida) (B)	<i>Q_t</i> (teórica) (A)	<i>Q_t</i> (maior medida) (B)	Relação			
	(l/min/m)	(l/min/m)	(l/min)	(l/min)	(B/A)			
BTE17		1,90		2147,00		82,00	79,00	1130,00
BTE18		10,30		15038,00		60,00	57,00	1460,00
BTE19		3,40		544,00		18,00	15,00	160,00
BTE20		1,79		1557,30		25,00	22,00	870,00
BTE21		1,41		2890,50		30,00	27,00	2050,00
BTE22		1,30		728,00		35,00	32,00	560,00
BTE23		0,20		232,00		55,00	52,00	1160,00
BTE24		0,80		1088,00		55,00	52,00	1360,00
BTE25		0,30		228,00		30,00	27,00	760,00
BTE26		0,14		35,00		30,00	27,00	250,00
BTE27		0,10		55,00		30,00	27,00	550,00
BTE28		0,21		42,00		35,00	32,00	200,00
BTE29		0,75		37,50		35,00	32,00	50,00
BTE30		0,42		168,00		41,00	38,00	400,00
BTE31		1,13		342,39		65,00	62,00	303,00
BTE32		0,51		147,90		22,00	19,00	290,00
BTE33		0,53		434,60		25,00	22,00	820,00
BTE34		1,20		420,00		24,00	21,00	350,00
BTE35		0,20		60,00		26,50	23,50	300,00
BTE36	3,45	5,70	3930,00	6495,60	1,65	100,00	87,50	1140,00
BTE37	1,65	1,30	1451,40	1141,80	0,79	50,00	47,00	880,00
BTE38	2,24	1,34	3010,80	1804,80	0,60	70,00	67,00	1343,32
BTE39	0,29	0,35	30,00	35,40	1,18	6,20	3,20	102,50
BTE40	5,31	1,53	1168,20	336,00	0,29	25,00	22,00	220,00
BTE41	0,01	0,04	1,20	4,80	4,00	5,00	2,00	124,22
BTE42	1,45	0,87	1118,40	669,00	0,60	31,00	28,00	772,63
BTE43	3,73	0,23	3261,00	199,20	0,06	63,00	60,00	874,28
BTE44	0,82	0,04	247,20	12,60	0,05	20,00	17,00	300,00
BTE45	8,82	1,81	10932,00	2248,80	0,21	63,00	60,00	1240,00
BTE46	3,27	4,17	4425,00	5638,20	1,27	50,00	47,00	1352,39
BTE47	9,02	2,04	10100,40	2280,00	0,23	65,00	62,00	1120,00
BTE48	3,62	4,26	2646,00	3107,40	1,17	50,00	47,00	730,00
BTE49	0,17	0,26	876,00	1320,00	1,51	20,00	17,00	5140,00
BTE50	0,21	0,08	79,20	31,80	0,40	20,00	17,00	380,00
BTE51	0,19	0,12	158,40	100,80	0,64	40,00	37,00	840,00
BTE52	3,00	3,90	1200,00	1560,00	1,30	25,00	22,00	400,00
BTE53	6,13	5,42	4290,00	3791,40	0,88	17,00	14,00	700,00
BTE54	0,15	0,06	15,48	6,00	0,39	7,00	4,00	100,00
BTE55	3,68	4,93	7518,00	10073,40	1,34	55,00	52,00	2045,00
BTE56	2,23	3,02	2010,00	2717,40	1,35	25,00	22,00	900,00
BTE57	0,58	0,22	162,00	62,40	0,39	10,00	7,00	280,00

Le-genda	Vazões					Hb altura máxima	Hr al- tura má- xima do reserva- tório	Lb compri- mento
	Qe (teórica) (A)	Qe (maior medida) (B)	Qt (teórica) (A)	Qt (maior medida) (B)	Relação			
	(l/min/m)	(l/min/m)	(l/min)	(l/min)	(B/A)			
BTE58	2,36	2,14	2121,00	1929,60	0,91	55,00	52,00	900,00
BTE59	0,84	0,48	570,00	324,00	0,57	40,00	37,00	680,00
BTE60	1,47	2,67	810,00	1471,20	1,82	17,00	14,00	550,00
BTE61	1,50	1,59	420,00	446,40	1,06	7,50	4,50	280,00
BTE62	3,00	3,10	600,00	619,80	1,03	22,00	19,00	200,00
BTE63	5,45	1,02	8280,00	1554,60	0,19	47,00	44,00	1520,00
BTE64	0,76	0,32	243,00	102,00	0,42	8,00	5,00	320,00
BTE65	1,34	0,98	390,00	283,80	0,73	15,00	12,00	290,00
BTE66	0,49	0,55	108,00	121,80	1,13	20,00	17,00	220,00
BTE67	1,83	1,85	660,00	665,40	1,01	15,00	12,00	360,00
BTE68	10,08	5,49	12090,00	6585,00	0,54	30,00	27,00	1200,00
BTE69	1,93	1,55	1080,00	869,40	0,81	20,00	17,00	560,00
BTE70	0,09	9,85	48,60	5620,20	115,64	13,00	10,00	570,53
BTE71	3,53	3,85	3300,00	3600,00	1,09	27,50	24,50	935,55
BTE72	2,52	8,18	1200,00	3900,00	3,25	27,50	24,50	476,55
BTE73	0,62	0,32	370,20	189,00	0,51	35,50	34,50	594,05
BTE74	1,00	1,95	60,00	117,00	1,95	18,00	17,00	60,00
BTE75	1,00	0,65	1300,20	840,00	0,65	12,70	11,70	1300,00
BTE76	0,97	0,24	420,00	105,00	0,25	56,50	55,00	433,40
BTE77		4,46	0,00	2410,60		90,00	85,50	540,00
BTE78		0,43	0,00	238,00		127,00	123,00	554,00
BTE79	0,07	1,52	160,53	3490,00	21,74	106,00	103,00	2300,00
BTE80	1,36	0,28	2050,00	419,40	0,20	150,00	146,00	1510,00
BTE81	0,04	0,83	10,00	215,00	21,50	34,00	30,00	260,00
BTE82	0,78	0,55	283,80	199,80	0,70	64,87	59,37	365,00
BTE83	4,27	4,31	6240,00	6291,00	1,01	26,50	23,50	1461,00
BTE84	0,31	0,47	90,00	135,00	1,50	28,00	25,00	290,00
BTE85		2,46		3942,00		158,00	155,00	1600,00
BTE86		0,14		52,80		18,00	15,00	370,00
BTE87	3,65	3,32	2152,00	1957,16	0,91	210,00	206,30	590,00
BTE88		0,63		225,60		47,00	43,00	360,00
BTE89		2,05		3420,00		142,00	139,70	1670,00
BTE90		3,00		8106,00		70,00	66,30	2700,00
BTE91	5,00	2,72	276,00	150,00	0,54	17,20	13,20	55,22
BTE92	5,00	6,55	366,20	480,00	1,31	15,00	11,00	73,23
BTE93		1,27		507,00		37,00	34,00	400,00
BTE94		6,36		29914,80		39,00	36,00	4700,00
BTE95		0,76		498,00		30,00	27,30	655,00
BTE96	1,48	0,00	274,80	0,00	0,00	21,50	17,50	185,40
BTE97	0,50	0,16	199,80	63,00	0,32	45,20	41,20	401,70
BTE98		0,27		162,00		94,00	89,00	595,00

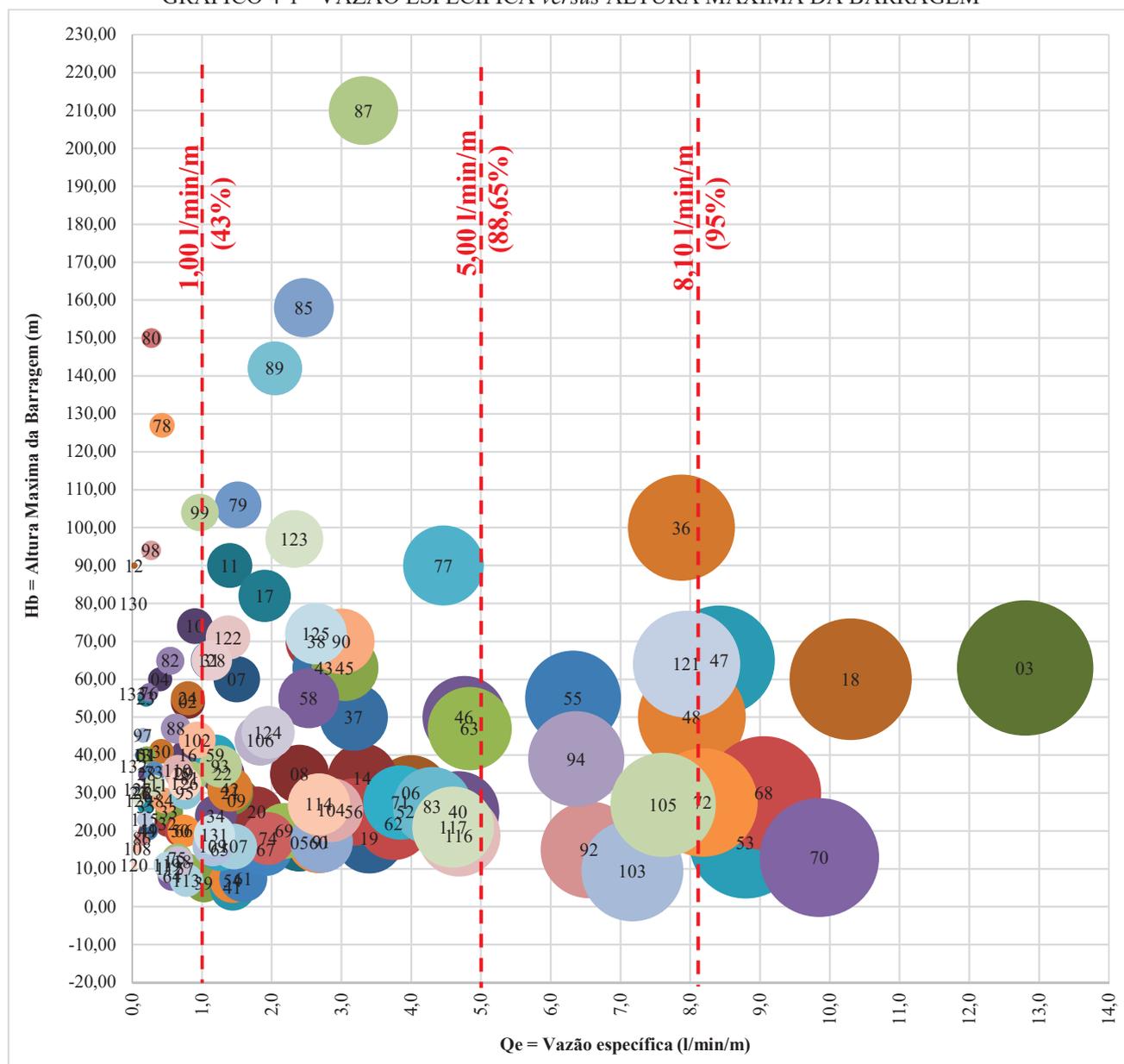
Le-genda	Vazões					Hb altura máxima	Hr al- tura má- xima do reserva- tório	Lb compri- mento
	<i>Q_e</i> (teórica) (A)	<i>Q_e</i> (maior medida) (B)	<i>Q_t</i> (teórica) (A)	<i>Q_t</i> (maior medida) (B)	Relação			
	(l/min/m)	(l/min/m)	(l/min)	(l/min)	(B/A)			
BTE99		0,97		570,00		104,00	99,00	586,00
BTE100		0,00		0,00		8,50	3,50	152,00
BTE101		0,00		0,00		12,50	7,50	393,00
BTE102		0,94		636,00		44,00	39,00	680,00
BTE103		7,17		918,00		9,50	4,50	128,00
BTE104		2,85		579,00		25,50	20,50	203,00
BTE105	2,06	7,61	720,00	2664,00	3,70	26,90	18,65	350,00
BTE106	5,00	1,84	1350,00	496,08	0,37	44,00	37,00	270,00
BTE107		1,46		606,25			12,90	415,00
BTE108		0,08		62,15			12,40	816,66
BTE109	6,12	1,16	649,98	123,03	0,19	16,00	11,20	106,28
BTE110	5,37	0,65	2200,20	268,14	0,12	36,00	31,00	410,00
BTE111	4,55	0,32	1999,80	139,73	0,07	32,00	27,00	440,00
BTE112	5,00	0,54	1900,20	204,50	0,11	10,00	5,00	380,00
BTE113	5,95	0,78	1249,80	163,57	0,13	7,00	2,00	210,00
BTE114	10,64	2,68	1350,00	340,00	0,25	27,00	21,80	126,90
BTE115		0,18		78,00		23,00	20,00	426,00
BTE116	5,00	4,69	150,00	140,62	0,94	18,80	14,30	30,00
BTE117		4,60		122,84		21,00	18,00	26,70
BTE118	2,18	0,66	174,00	52,47	0,30	12,00	7,00	80,00
BTE119	1,72	0,50	86,00	25,00	0,29	11,00	7,00	50,00
BTE120	2,00	0,03	64,00	0,88	0,01	11,00	7,00	32,00
BTE121	0,00	7,95	126,10	7566,00	60,00	64,00	61,00	952,00
BTE122	0,00	1,38	28,90	1734,00	60,00	71,00	68,00	1260,00
BTE123	1,01	2,33	15,50	930,00	60,00	97,00	94,00	400,00
BTE124	0,00	1,95	25,00	1500,00	60,00	46,00	42,18	770,00
BTE125	2,01	2,63	149,47	8967,90	60,00	72,00	69,00	3404,00
BTE126		0,75		305,00		32,50	29,50	405,00
BTE127		0,07		48,00		31,00	28,00	670,00
BTE128	1,00	1,1	600,00	684,18		65,00	60,80	600,00
BTE129	1,00	0,1	190,20	18,64	2,41	28,00	23,80	190,00
BTE130	0,01	0,0	12,42	30,88	0,30	80,00	75,80	1400,00
BTE131	0,24	1,2	54,00	267,60	0,52	19,00	17,00	226,60
BTE132	0,10	0,0	150,00	34,20		37,00	33,00	1525,00
BTE133		0,0		2,42	21,20	56,00	54,00	750,00

FONTE: o autor (2022)

O GRÁFICO 4-1 indica a altura máxima das 133 barragens estudadas correlacionando com a vazão específica de cada uma delas, se observa que 43% das barragens tem vazões máximas observadas na faixa de *0 a 1,00 l/min/m*, nota-se também que 88,65% destas 133 barragens possuem vazões

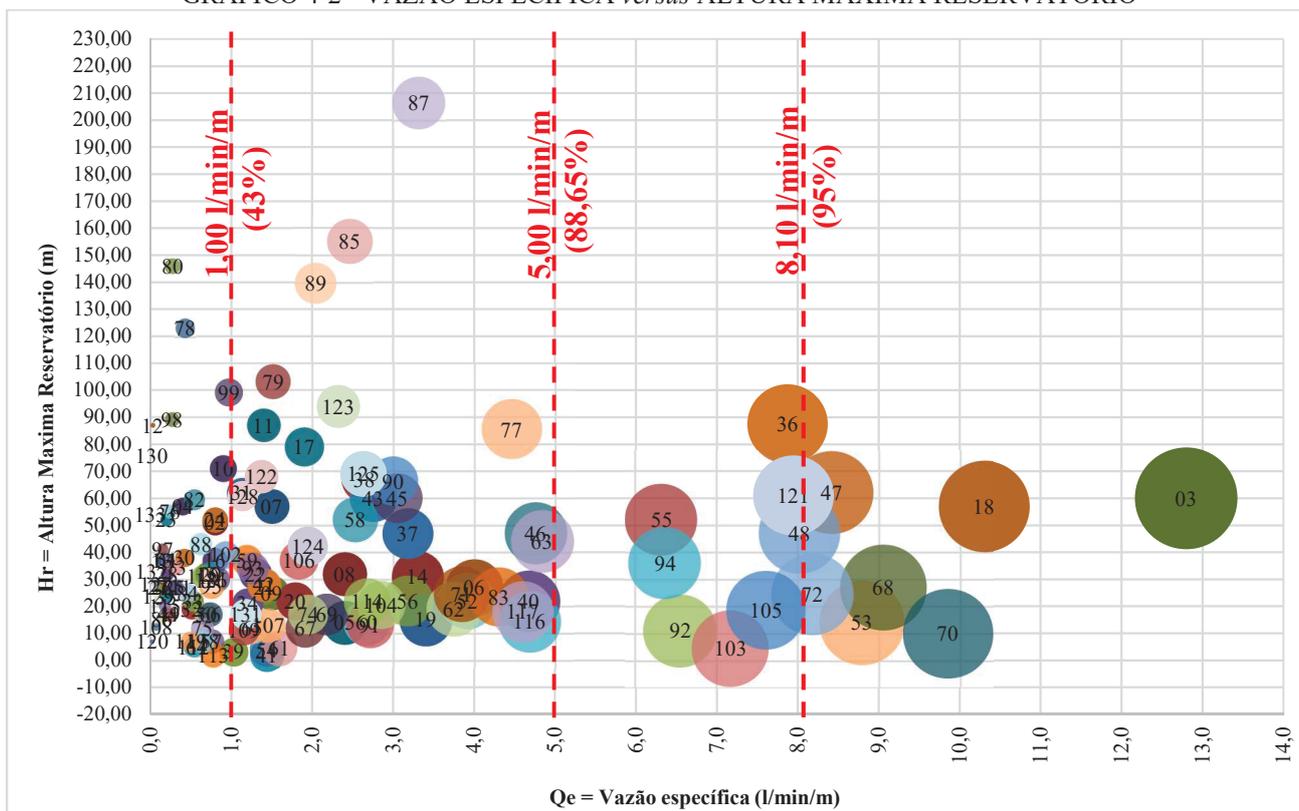
máximas observadas entre 0 a 5 l/min/m. De modo que o GRÁFICO 4-2 apresenta a **altura máxima do reservatório** de cada uma destas barragens correlacionando também a vazão específica de todas elas. O GRÁFICO 4-3 apresenta correlação da vazão específica com o **comprimento total** das barragens. O GRÁFICO 4-4 indica uma correlação da vazão específica com a **vazão total**, e apresenta por um comportamento de tendência linear, um R^2 de 0,38 é um valor de dispersão considerável, tirando a raiz quadrada do R^2 consequentemente resulta em um índice de correlação $R = 0,62$.

GRÁFICO 4-1 - VAZÃO ESPECÍFICA *versus* ALTURA MÁXIMA DA BARRAGEM



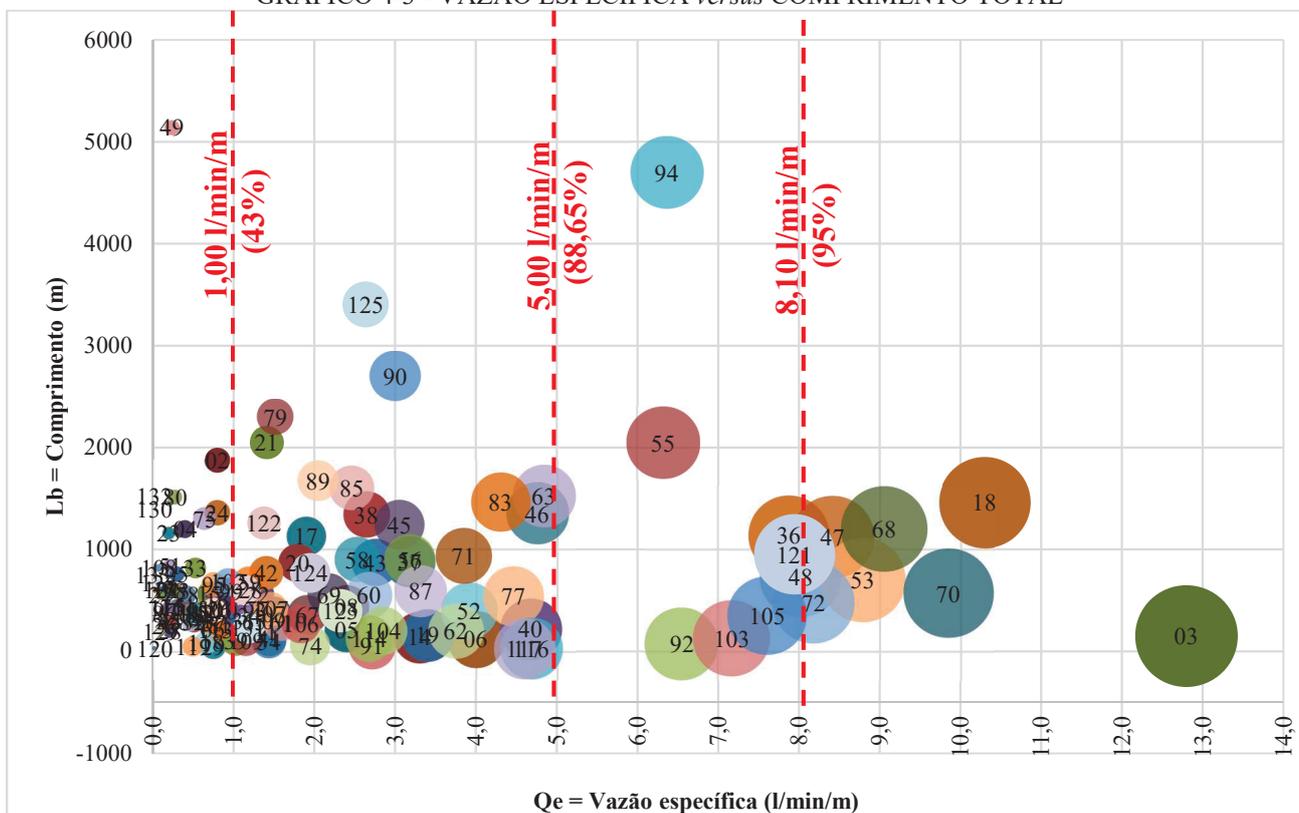
FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-2 - VAZÃO ESPECÍFICA versus ALTURA MÁXIMA RESERVATÓRIO

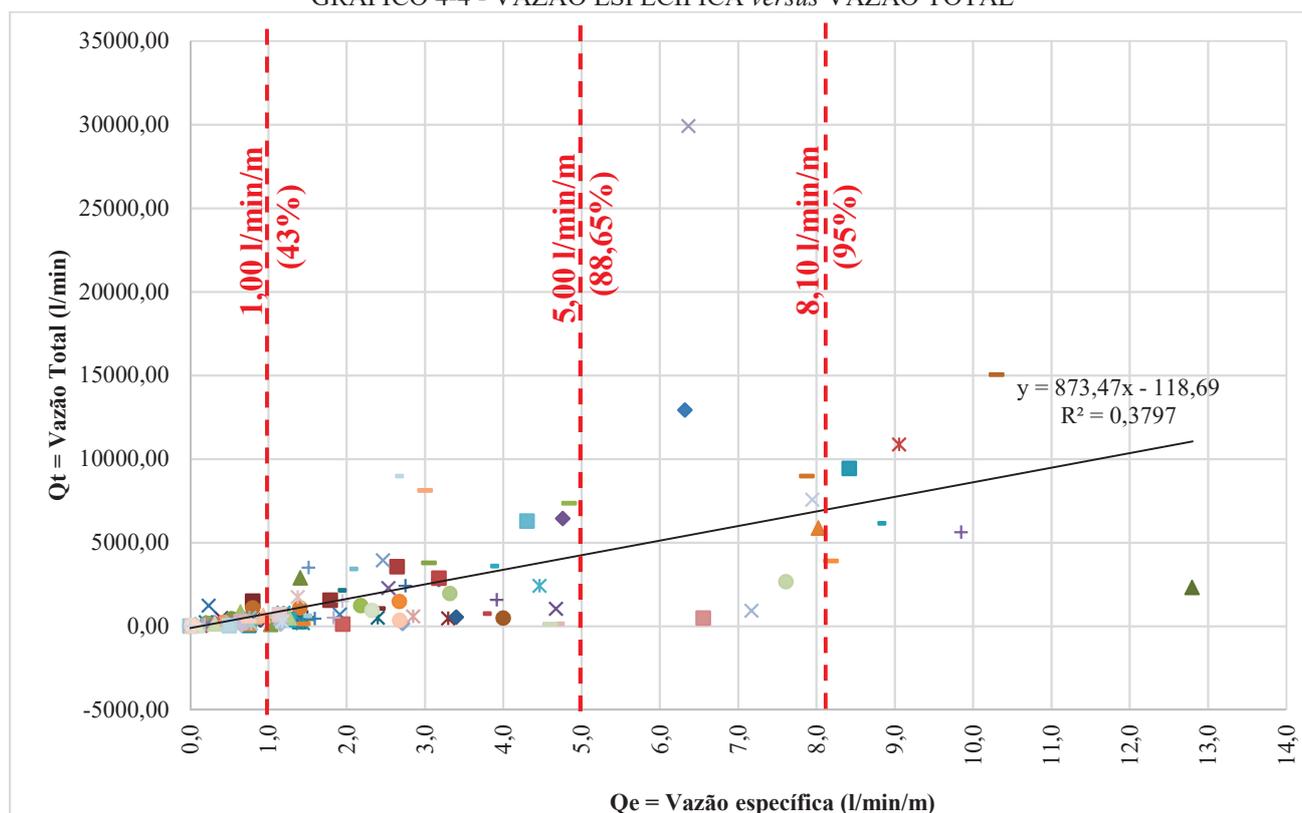


FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-3 - VAZÃO ESPECÍFICA versus COMPRIMENTO TOTAL



FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-4 - VAZÃO ESPECÍFICA *versus* VAZÃO TOTAL

FONTE: o autor (2022)

4.2 VAZÃO ESPECÍFICA *versus* PERMEABILIDADE DO NÚCLEO

A seguir na TABELA 4-2 é indicado o ano de início de operação, sendo apresentados valores de permeabilidade (*k núcleo compactado*) dos solos utilizados na construção dos maciços das 133 barragens de terra e enrocamento.

TABELA 4-2 - PERMEABILIDADES DO NÚCLEO COMPACTADO

Legenda	Barragem	Ano do início de operação	Tipo de Seção	kn (permeabilidade do núcleo)
				(cm/s)
BTE01	Marimbondo	1975	homogênea	1,00E-06
BTE02	Água Vermelha (OD)	1978	homogênea	1,00E-06
BTE03	Água Vermelha (OE)	1978	homogênea	1,00E-06
BTE04	Jacaré	1981	homogênea	1,00E-06
BTE05	Juqueri (Paiva Castro)	1972	homogênea	1,00E-06
BTE06	Águas Claras	1973	homogênea	1,00E-06
BTE07	Capivari Cachoeira	1971	homogênea	2,00E-05
BTE08	Atibainha	1975	homogênea	1,00E-06
BTE09	Cachoeira	1974	homogênea	1,00E-06

Legenda	Barragem	Ano do início de operação	Tipo de Seção	kn (permeabilidade do núcleo)
				(cm/s)
BTE10	Jaguari	1973	homogênea	1,00E-06
BTE11	Dique Jaguari	1973	homogênea	1,00E-06
BTE12	Paraibuna	1978	terra e enrocamento	3,35E-06
BTE13	Dique Paraibuna	1978	homogênea	3,35E-06
BTE14	Saracuruna	1962	homogênea	1,00E-06
BTE15	Ensecadeira Itaipu 1	1984	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE16	Ensecadeira Itaipu 2	1984	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE17	Três Irmãos (OD)	1993	homogênea	1,00E-06
BTE18	Três Irmãos (OE)	1993	homogênea	1,00E-06
BTE19	Canoas I	1999	homogênea	1,00E-06
BTE20	Itaipu (OD)	1984	-	1,00E-06
BTE21	Itaipu (OE)	1984	-	1,00E-06
BTE22	Dique 1 de Itá	2000	-	1,00E-06
BTE23	Boa Esperança (OD)	1970	-	1,00E-06
BTE24	Boa Esperança (OE)	1970	-	1,00E-06
BTE25	Mosquito	1991	-	1,00E-06
BTE26	Dique 1 de Xingó	1994	-	1,00E-06
BTE27	Dique 2 de Xingó	1994	-	1,00E-06
BTE28	Dique 3 de Xingó	1994	-	1,00E-06
BTE29	Dique 4 de Xingó	1994	-	1,00E-06
BTE30	Cana Brava (OD)	2002	-	1,00E-06
BTE31	Cana Brava (OE)	2002	-	1,00E-06
BTE32	Dique 1 de Cana Brava	2002	-	1,00E-06
BTE33	Dique 2 de Cana Brava	2002	-	1,00E-06
BTE34	Bananal	1991	-	1,00E-06
BTE35	Samambaia	1991	-	1,00E-06
BTE36	BTE36	2016	homogênea	1,00E-06
BTE37	BTE37	2016	homogênea	1,00E-06
BTE38	BTE38	2016	homogênea	1,00E-08
BTE39	BTE39	2016	homogênea	1,00E-08
BTE40	BTE40	2016	homogênea	1,00E-06
BTE41	BTE41	2016	homogênea	1,00E-08
BTE42	BTE42	2016	homogênea	1,00E-06
BTE43	BTE43	2016	homogênea	1,00E-06
BTE44	BTE44	2016	homogênea	1,00E-06
BTE45	BTE45	2016	homogênea	1,00E-06
BTE46	BTE46	2016	homogênea	1,00E-06
BTE47	BTE47	2016	homogênea	1,00E-08
BTE48	BTE48	2016	homogênea	1,00E-08
BTE49	BTE49	2016	homogênea	1,00E-08
BTE50	BTE50	2016	homogênea	1,00E-08
BTE51	BTE51	2016	homogênea	1,00E-08
BTE52	BTE52	2016	homogênea	1,00E-08

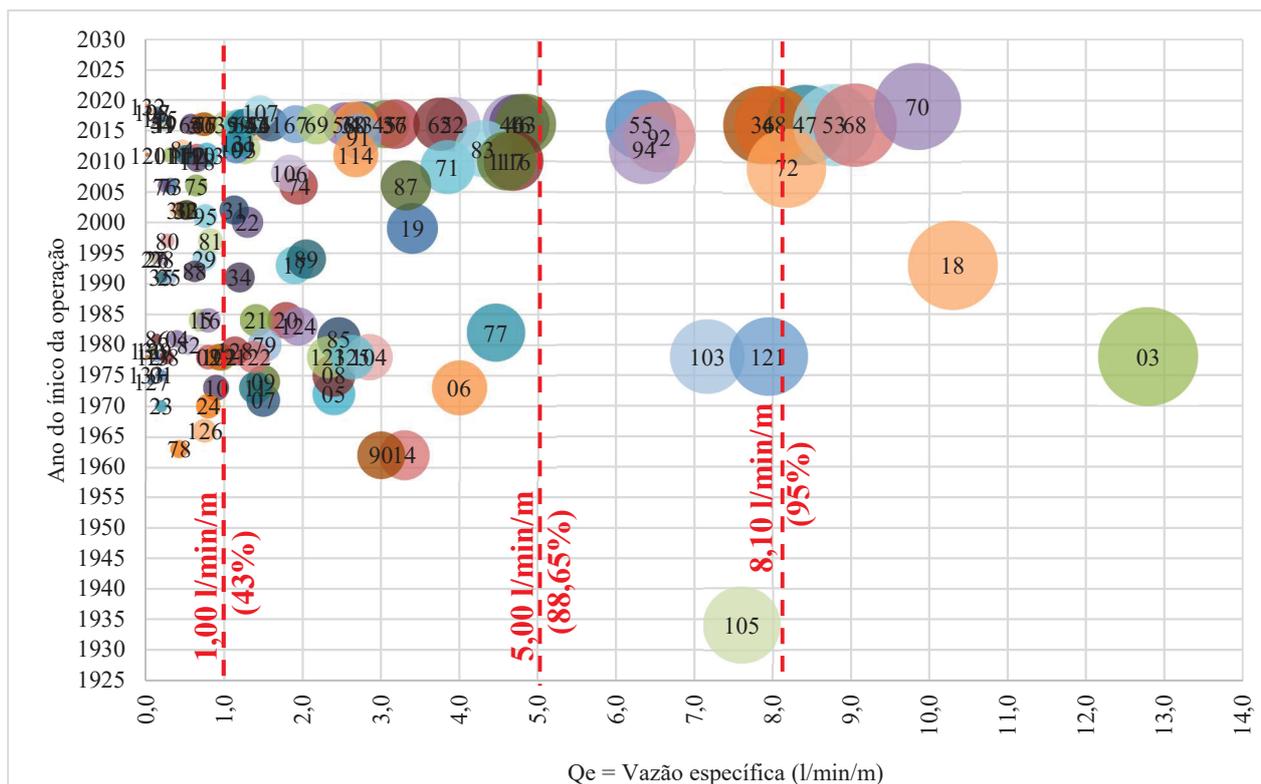
Legenda	Barragem	Ano do início de operação	Tipo de Seção	kn (permeabilidade do núcleo)
				(cm/s)
BTE53	BTE53	2016	homogênea	1,00E-08
BTE54	BTE54	2016	homogênea	1,00E-08
BTE55	BTE55	2016	homogênea	1,00E-08
BTE56	BTE56	2016	homogênea	1,00E-08
BTE57	BTE57	2016	homogênea	1,00E-08
BTE58	BTE58	2016	homogênea	1,00E-08
BTE59	BTE59	2016	homogênea	1,00E-08
BTE60	BTE60	2016	homogênea	1,00E-08
BTE61	BTE61	2016	homogênea	1,00E-08
BTE62	BTE62	2016	homogênea	1,00E-08
BTE63	BTE63	2016	homogênea	1,00E-08
BTE64	BTE64	2016	homogênea	1,00E-08
BTE65	BTE65	2016	homogênea	1,00E-08
BTE66	BTE66	2016	homogênea	1,00E-08
BTE67	BTE67	2016	homogênea	1,00E-08
BTE68	BTE68	2016	homogênea	1,00E-08
BTE69	BTE69	2016	homogênea	1,00E-08
BTE70	BTE70	2019	homogênea	2,00E-08
BTE71	BTE71	2009	homogênea	2,00E-06
BTE72	BTE72	2009	homogênea	2,00E-06
BTE73	BTE73	2006	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE74	BTE74	2006	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE75	BTE75	2006	homogênea	1,00E-06
BTE76	BTE76	2006	terra e enrocamento	1,00E-05
BTE77	BTE77	1982	terra e enrocamento	5,00E-05
BTE78	BTE78	1963	terra e enrocamento	4,00E-05
BTE79	BTE79	1980	homogênea	4,00E-07
BTE80	BTE80	1997	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE81	BTE81	1997	homogênea	1,00E-06
BTE82	BTE82	1980	homogênea	1,00E-06
BTE83	BTE83	2012	homogênea	3,00E-06
BTE84	BTE84	2012	homogênea	3,00E-06
BTE85	BTE85	1981	terra e enrocamento	1,00E-07
BTE86	BTE86	1981	homogênea	1,00E-07
BTE87	BTE87	2006	terra e enrocamento	1,00E-07
BTE88	BTE88	1992	homogênea	1,00E-06
BTE89	BTE89	1994	terra e enrocamento	4,50E-08
BTE90	BTE90	1962	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE91	BTE91	2014	homogênea	1,00E-05
BTE92	BTE92	2014	homogênea	1,00E-05
BTE93	BTE93	2012	homogênea	2,00E-06
BTE94	BTE94	2012	homogênea	2,00E-06
BTE95	BTE95	2001	homogênea	1,00E-06

Legenda	Barragem	Ano do início de operação	Tipo de Seção	kn (permeabilidade do núcleo)
				(cm/s)
BTE96	BTE96	2018	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE97	BTE97	2018	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE98	BTE98	1978	homogênea	3,35E-06
BTE99	BTE99	1978	homogênea	3,35E-06
BTE100	BTE100	1978	homogênea	3,35E-06
BTE101	BTE101	1978	homogênea	3,35E-06
BTE102	BTE102	1978	homogênea	3,35E-06
BTE103	BTE103	1978	homogênea	3,35E-06
BTE104	BTE104	1978	homogênea	3,35E-06
BTE105	BTE105	1934	homogênea	1,50E-04
BTE106	BTE106	2008	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE107	BTE107	2018	homogênea	1,00E-08
BTE108	BTE108	2018	homogênea	1,00E-08
BTE109	BTE109	2012	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE110	BTE110	2011	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE111	BTE111	2011	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE112	BTE112	2011	homogênea	1,00E-06
BTE113	BTE113	2011	homogênea	1,00E-06
BTE114	BTE114	2011	homogênea	1,00E-06
BTE115	BTE115	2017	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE116	BTE116	2010	homogênea	1,00E-06
BTE117	BTE117	2010	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE118	BTE118	2010	homogênea	1,50E-06
BTE119	BTE119	2011	homogênea	1,00E-06
BTE120	BTE120	2011	homogênea	1,00E-06
BTE121	São Simão (OE)	1978	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE122	São Simão (OD)	1978	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE123	Itaúba	1978	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE124	Jaburú I	1983	homogênea	1,00E-06
BTE125	BTE125	1978	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE126	Bariri	1966	homogênea	1,00E-06
BTE127	Porto Colômbia	1974	homogênea	4,00E-06
BTE128	BTE128	1979	homogênea	1,00E-07
BTE129	BTE129	1979	homogênea	1,00E-08
BTE130	BTE130	1979	terra e enrocamento	1,00E-06
BTE131	BTE131	2013	terra e enrocamento	5,20E-06
BTE132	BTE132	2019	homogênea	1,00E-05
BTE133	BTE133	1975	terra e enrocamento	1,00E-07

FONTE: o autor (2022)

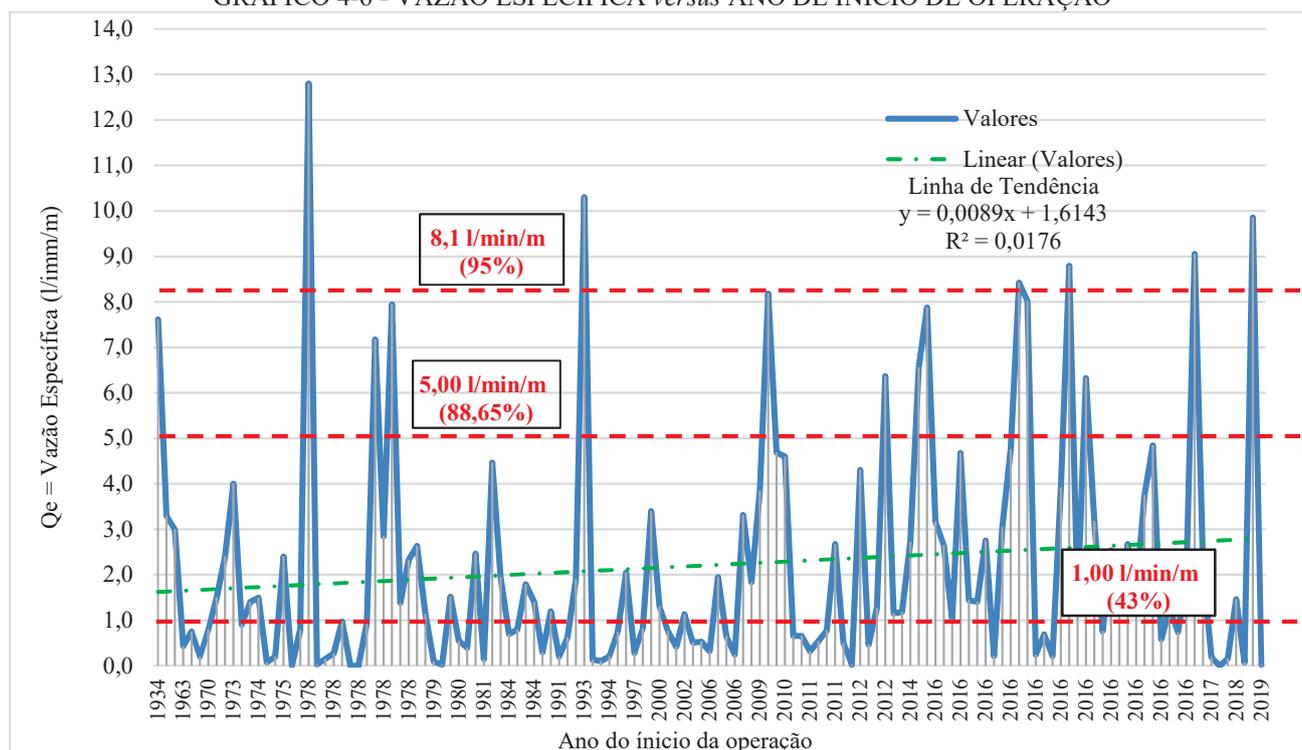
O GRÁFICO 4-5 apresenta a plotagem da vazão específica correlacionando com o ano de início de operação das 133 barragens, nota-se que não há uma tendência em que a vazão pudesse variar com o ano de construção. Certamente as barragens mais novas formas construídas com tecnologias de construção são aprimoradas, porém, isto não quer dizer que haja uma grande influência de tecnologia de construção neste caso.

GRÁFICO 4-5 - VAZÃO ESPECÍFICA *versus* ANO DE INÍCIO DE OPERAÇÃO



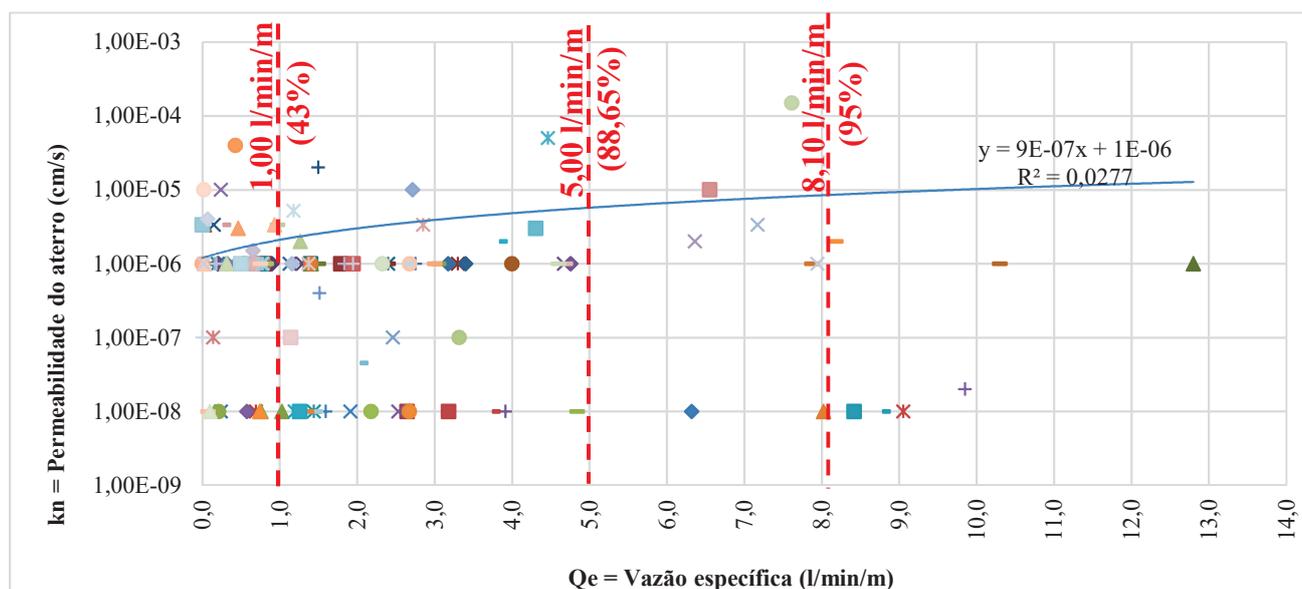
FONTE: o autor (2022)

O GRÁFICO 4-6 apresenta a plotagem da vazão específica indicando a observação de evolução ao longo dos anos, organizando o ano de início de operação de forma crescente te todas 133 barragens, é possível notar uma pequena tendência desta variável *ano de início de operação* que pode indicar um pequeno aumento no comportamento das vazões ao longo dos anos, todavia observa-se uma grande dispersão nos dados e apresenta por um comportamento de tendência linear, um R^2 de 0,0176, tirando a raiz quadrada do R^2 consequentemente resulta em um índice de correlação $R = 0,13$, de qualquer maneira este estudo poderia ser ainda mais aprimorado com uma amostragem maior de barragens.

GRÁFICO 4-6 - VAZÃO ESPECÍFICA *versus* ANO DE ÍNICIO DE OPERAÇÃO

FONTE: o autor (2022)

O GRÁFICO 4-7 indica uma correlação da vazão específica com a *permeabilidade do aterro* compactado do maciço de cada barragem, com um comportamento de tendência linear, um R^2 de 0,03 que é no caso um valor de dispersão considerável e consequentemente um índice de baixa correlação $R = 0,17$.

GRÁFICO 4-7 - VAZÃO ESPECÍFICA *versus* PERMEABILIDADE DO ATERRO

FONTE: o autor (2022)

4.3 VAZÕES MEDIDAS *versus* PERMEABILIDADE DA FUNDAÇÃO

A seguir na TABELA 4-3 são indicadas as informações da geologia que predominam a fundação das barragens, bem como respectivamente a rocha de origem e também a formação de origem da rocha. Também são apresentados valores de *permeabilidade de fundação* das 133 barragens de terra e enrocamento.

TABELA 4-3 - PERMEABILIDADES DA FUNDAÇÃO

Legenda	Geologia de Fundação	Rocha de Origem	Origem da Rocha	kf (permeabilidade de fundação)
				(cm/s)
BTE01	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE02	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE03	lava aglomerática (k=10cm/s)	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-01
BTE04	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE05	argilas, aluvião e solo residual	filito	metamórficas	1,00E-05
BTE06	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE07	solo residual de granito e gnaiss	gnaiss	metamórficas	2,00E-05
BTE08	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE09	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE10	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE11	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE12	solo residual de biotita-gnaiss	gnaiss	metamórficas	1,20E-04
BTE13	solo residual de biotita-gnaiss	gnaiss	metamórficas	1,60E-05
BTE14	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE15	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE16	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE17	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE18	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE19	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE20	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE21	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE22	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE23	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE24	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE25	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE26	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE27	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE28	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE29	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE30	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE31	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE32	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE33	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE34	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05

Legenda	Geologia de Fundação	Rocha de Origem	Origem da Rocha	kf (permeabilidade de fundação)
				(cm/s)
BTE35	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE36	solo residual jovem e maduro	migmatito	metamórficas	1,00E-04
BTE37	topo de rochoso de ritmito	ritmito	sedimentares clásticas	1,00E-04
BTE38	solo residual jovem e maduro	migmatito	metamórficas	1,00E-04
BTE39	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	3,00E-06
BTE40	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	3,00E-04
BTE41	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	5,00E-06
BTE42	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	5,00E-04
BTE43	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	3,00E-04
BTE44	solo residual jovem de ritmito	ritmito	sedimentares clásticas	3,00E-04
BTE45	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	5,00E-04
BTE46	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	3,00E-04
BTE47	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	5,00E-06
BTE48	solo residual jovem de arenito	arenito	sedimentares clásticas	1,00E-07
BTE49	topo rochoso de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-05
BTE50	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	5,00E-06
BTE51	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE52	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-08
BTE53	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE54	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE55	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-05
BTE56	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE57	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE58	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE59	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE60	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE61	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE62	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE63	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-05
BTE64	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-05
BTE65	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE66	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE67	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-06
BTE68	solo residual jovem de migmatito	migmatito	metamórficas	1,00E-05
BTE69	solo residual maduro de migmatito	migmatito	metamórficas	5,00E-06
BTE70	meta-arenito silicificado	arenito	sedimentares clásticas	5,00E-05
BTE71	solo residual de basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-04
BTE72	solo residual de basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-04
BTE73	saprolito de gnaïsse	гнаïsse	metamórficas	1,00E-05
BTE74	saprolito de gnaïsse	гнаïsse	metamórficas	1,00E-05
BTE75	saprolito de gnaïsse	гнаïsse	metamórficas	1,00E-05
BTE76	saprolito de quartzo-micaxisto	xisto	metamórficas	1,00E-05
BTE77	quartzitos e xistos	xisto	metamórficas	3,30E-05

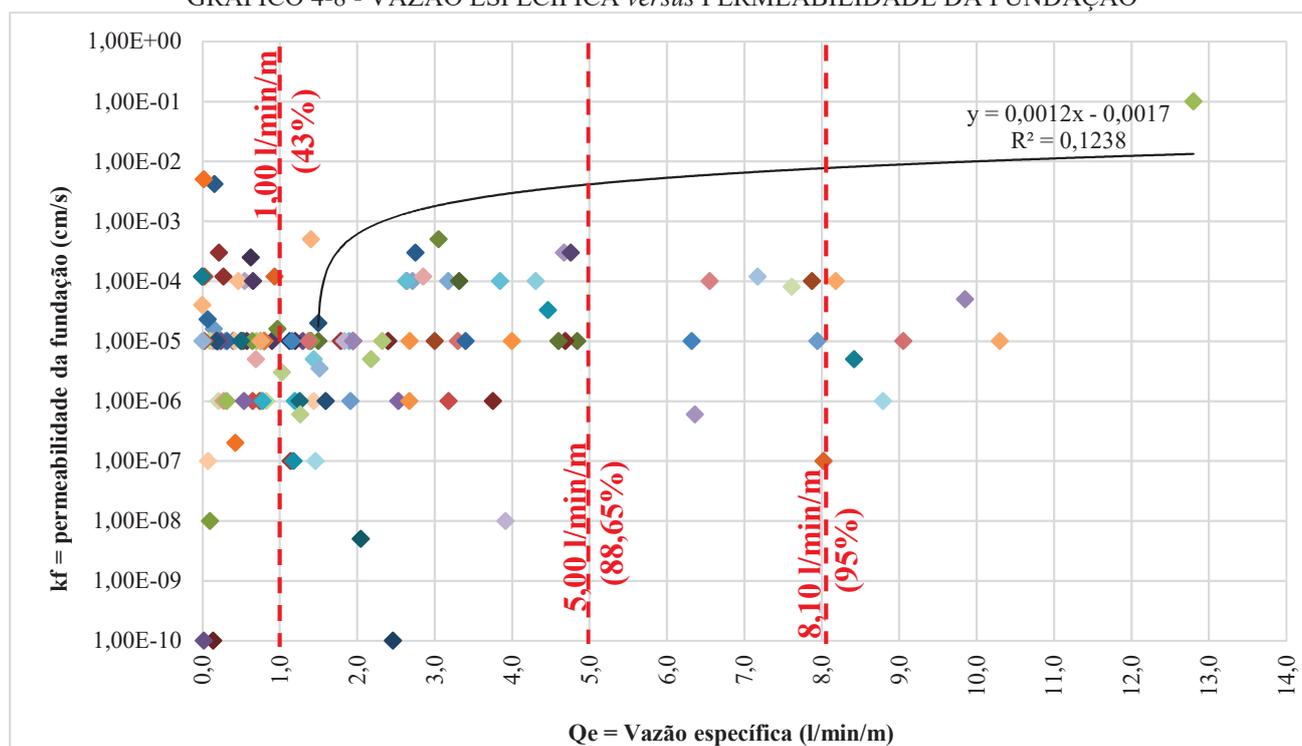
Legenda	Geologia de Fundação	Rocha de Origem	Origem da Rocha	kf (permeabilidade de fundação)
				(cm/s)
BTE78	quartzitos e xistos	xisto	metamórficas	2,00E-07
BTE79	solo de alteração de gnaiss	gnaisse	metamórficas	3,50E-06
BTE80	granito	granito	ígneas plutônicas	1,00E-06
BTE81	granito	granito	ígneas plutônicas	1,00E-06
BTE82	solo residual de xisto	xisto	metamórficas	1,00E-04
BTE83	solo de alteração de basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-04
BTE84	solo de alteração de basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-04
BTE85	granito gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,00E-10
BTE86	granito gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,00E-10
BTE87	quartzo-mica xisto	xisto	metamórficas	1,00E-04
BTE88	quartzo-mica xisto	xisto	metamórficas	2,50E-04
BTE89	quartzo-xisto, basalto e saprolito	basalto	ígneas vulcânicas	5,00E-09
BTE90	siltito são / solo residual / aluvião	siltito	sedimentares clásticas	1,00E-05
BTE91	solo residual de diabásio	diabásio	ígneas plutônicas	1,00E-04
BTE92	solo residual de diabásio	diabásio	ígneas plutônicas	1,00E-04
BTE93	coluvio / aluvião fino	gnaisse	metamórficas	6,00E-07
BTE94	coluvio / aluvião fino	gnaisse	metamórficas	6,00E-07
BTE95	solo de alteração de granito	granito	ígneas plutônicas	1,00E-05
BTE96	solo residual de riolito	riolito	ígneas vulcânicas	4,00E-05
BTE97	solo residual de riolito	riolito	ígneas vulcânicas	4,17E-03
BTE98	solo residual de biotita-gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,20E-04
BTE99	solo residual de biotita-gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,60E-05
BTE100	solo residual de biotita-gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,20E-04
BTE101	solo residual de biotita-gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,20E-04
BTE102	solo residual de biotita-gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,20E-04
BTE103	solo residual de biotita-gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,20E-04
BTE104	solo residual de biotita-gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,20E-04
BTE105	solo residual e saprolito	metarenito	sedimentares clásticas	8,09E-05
BTE106	basalto denso	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE107	basalto denso	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-07
BTE108	basalto denso	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-07
BTE109	basalto vesículo- amigdaloidal	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE110	riodacito alterado	riodacito	ígneas vulcânicas	1,00E-06
BTE111	riodacito alterado	riodacito	ígneas vulcânicas	1,00E-06
BTE112	riodacito alterado	riodacito	ígneas vulcânicas	1,00E-06
BTE113	riodacito alterado	riodacito	ígneas vulcânicas	1,00E-06
BTE114	solo aluvionar / coluvionar e talus	gnaisse	metamórficas	1,00E-05
BTE115	gnaisse	gnaisse	metamórficas	1,00E-05
BTE116	solo coluvionar	gnaisse	metamórficas	1,00E-05
BTE117	quartzo biotita xisto	xisto	metamórficas	1,00E-05
BTE118	granito e granito gnaiss	gnaisse	metamórficas	1,00E-04
BTE119	solo coluvionar	gnaisse	metamórficas	1,00E-05
BTE120	solo coluvionar	gnaisse	metamórficas	1,00E-05

Legenda	Geologia de Fundação	Rocha de Origem	Origem da Rocha	kf (permeabilidade de fundação)
				(cm/s)
BTE121	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE122	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE123	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE124	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE125	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-04
BTE126	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05
BTE127	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	2,30E-05
BTE128	basalto	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-07
BTE129	solo saprolítico	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-08
BTE130	solo saprolítico	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-10
BTE131	rocha sã	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-07
BTE132	solo coluvionar	arenito	sedimentares clásticas	5,00E-03
BTE133	rocha sã	basalto	ígneas vulcânicas	1,00E-05

FONTE: o autor (2022)

O GRÁFICO 4-8 indica uma correlação da vazão específica com a *permeabilidade da fundação* de cada barragem, e apresenta por um comportamento de tendência linear, um R^2 de 0,12 que é um valor de dispersão considerável e conseqüentemente um índice de correlação $R = 0,35$. Se observa ainda uma maior correlação com a água que passa pela fundação do que a que percola pelo maciço do aterro compactado.

GRÁFICO 4-8 - VAZÃO ESPECÍFICA *versus* PERMEABILIDADE DA FUNDAÇÃO



FONTE: o autor (2022)

A seguir na TABELA 4-4 são indicadas as vazões específicas médias observadas por tipo de rocha de origem existente nas fundações das 133 barragens de terra e enrocamento.

TABELA 4-4 - VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA POR TIPO DE ROCHA DE ORIGEM

Rocha de Origem da Fundação	Número de Barragens	Qe (maior medida)	Percentual de barragens (%)
		MÉDIA	
		(l/min/m)	
basalto	52	1,9	39%
gnaisse	24	1,6	18%
diabásio	2	4,6	2%
migmatito	31	3,1	23%
ritmito	2	1,7	2%
xisto	7	2,0	5%
granito	3	0,6	2%
riolito	2	0,1	2%
riodacito	4	0,6	3%
arenito	3	6,0	2%
siltito	1	3,0	1%
metarenito	1	7,6	1%
filito	1	2,4	1%
133			100%

FONTE: o autor (2022)

A seguir na TABELA 4-5 são indicadas vazões específicas médias observadas indicadas por faixas de vazão, com isso observa-se que 45% das 133 barragens de terra e enrocamento apresentaram vazões específicas máximas na ordem de até 1 l/min/m com média entre todas as barragens de $0,4 \text{ l/min/m}$.

TABELA 4-5 - FAIXAS DE VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA

Faixa Qe (maior medida)	Número de Barragens	Qe (maior medida)	Percentual de barragens (%)
		MÉDIA	
		(l/min/m)	
até 1	60	0,4	45%
maior que 1 até 2	26	1,5	20%
maior que 2 até 5	32	3,3	24%
maior que 5	15	8,4	11%
133			100%

FONTE: o autor (2022)

A seguir na TABELA 4-6 são indicadas vazões específicas médias observadas indicadas por origem das rochas de fundação, o qual são as ígneas vulcânicas, metamórficas, sedimentares clásticas e ígneas plutônicas, neste estudo observa-se um cenário em que a classificação de fundação das rochas de origem *sedimentares clásticas* apresentam uma tendência em ter vazões específicas maiores com média de *4,6 l/min/m* enquanto os outros tipos de fundações com origem de outras rochas estão com médias entre *1,7 a 2,4 l/min/m*.

TABELA 4-6 - VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA POR ORIGEM DA ROCHA

Origem da Rocha	Número de Barragens	Qe (maior medida)	Percentual de barragens (%)
		MÉDIA	
		(l/min/m)	
ígneas vulcânicas	58	1,7	44%
metamórficas	63	2,4	47%
sedimentares clásticas	7	4,6	5%
ígneas plutônicas	5	2,2	4%
	133		100%

FONTE: o autor (2022)

4.4 VAZÕES MEDIDAS *versus* VAZÕES DE CONTROLE

A seguir na TABELA 4-7 são indicadas na coluna (A) as vazões específicas de controle definidas para as barragens BTE36 a BTE69, na coluna (B) são apresentadas as vazões específicas com data base de outubro de 2022, na coluna (C) as vazões específicas médias medidas efetivamente observadas, a coluna (B/A) apresenta uma relação entre a vazão mais atual medida observada com a vazão específica de controle e a com a coluna (C/A) apresenta uma relação entre a maior vazão específica medida observada com a vazão específica de controle. A média (B/A) é igual a *0,3 vezes* e a média (C/A) é igual a *1,6 vezes*, o que resulta numa redução de vazão de aproximadamente 21%.

TABELA 4-7 - VAZÃO MEDIDAS *versus* VAZÕES DE CONTROLE

Legenda	A - Qe (controle)	B - Qe (atual out/22)	C - Qe (maior medida)	Relação	Relação
	(l/min/m)	(l/min/m)	(l/min/m)	(B/A)	(C/A)
BTE36	3,4	4,4	7,9	1,3	2,3
BTE37	1,6	0,2	3,2	0,1	1,9

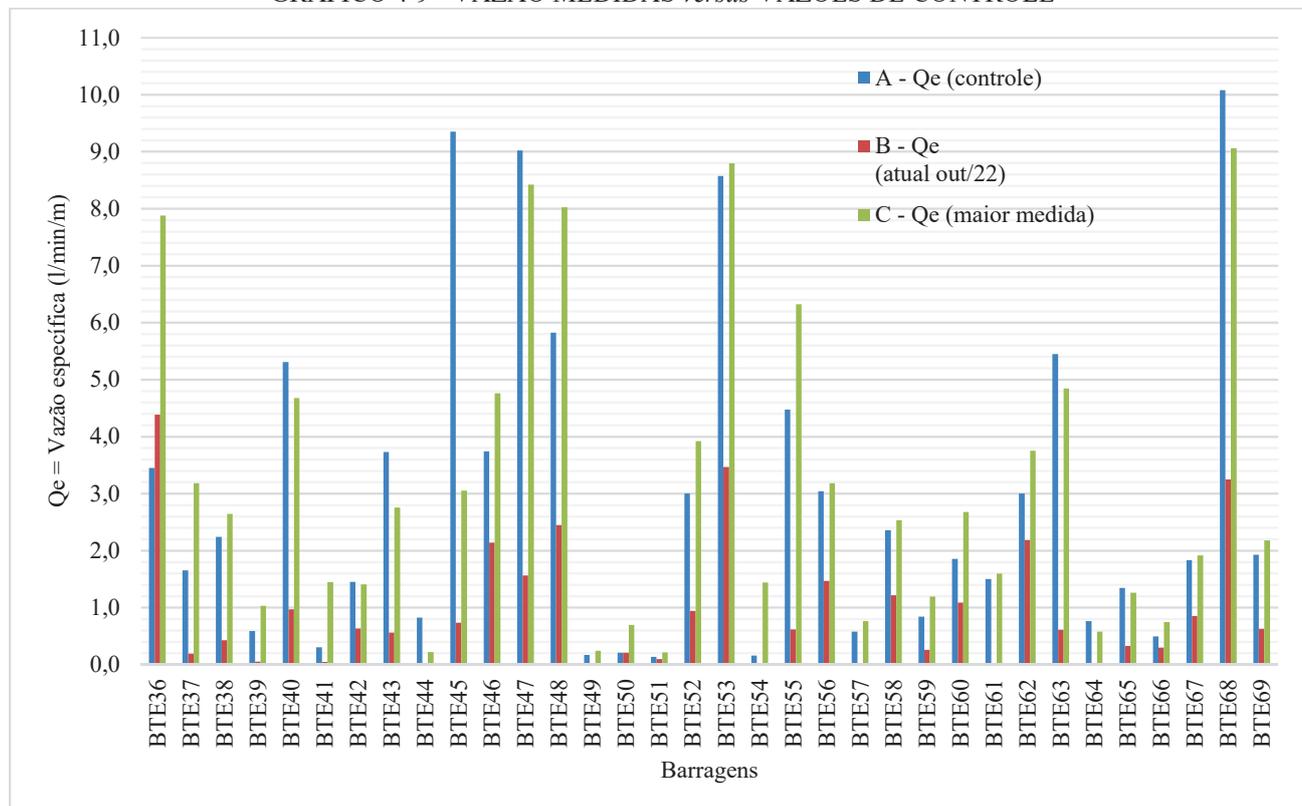
Legenda	A - Qe (controle)	B - Qe (atual out/22)	C - Qe (maior medida)	Relação	Relação
	(l/min/m)	(l/min/m)	(l/min/m)	(B/A)	(C/A)
BTE38	2,2	0,4	2,6	0,2	1,2
BTE39	0,6	0,0	1,0	0,0	1,8
BTE40	5,3	1,0	4,7	0,2	0,9
BTE41	0,3	0,0	1,4	0,0	4,8
BTE42	1,4	0,6	1,4	0,4	1,0
BTE43	3,7	0,6	2,8	0,2	0,7
BTE44	0,8	0,0	0,2	0,0	0,3
BTE45	9,3	0,7	3,1	0,1	0,3
BTE46	3,7	2,1	4,8	0,6	1,3
BTE47	9,0	1,6	8,4	0,2	0,9
BTE48	5,8	2,4	8,0	0,4	1,4
BTE49	0,2	0,0	0,2	0,0	1,4
BTE50	0,2	0,2	0,7	1,0	3,3
BTE51	0,1	0,1	0,2	1,0	1,6
BTE52	3,0	0,9	3,9	0,3	1,3
BTE53	8,6	3,5	8,8	0,4	1,0
BTE54	0,2	0,0	1,4	0,0	9,3
BTE55	4,5	0,6	6,3	0,1	1,4
BTE56	3,0	1,5	3,2	0,5	1,0
BTE57	0,6	0,0	0,8	0,0	1,3
BTE58	2,4	1,2	2,5	0,5	1,1
BTE59	0,8	0,3	1,2	0,4	1,4
BTE60	1,9	1,1	2,7	0,6	1,4
BTE61	1,5	0,0	1,6	0,0	1,1
BTE62	3,0	2,2	3,8	0,7	1,3
BTE63	5,4	0,6	4,8	0,1	0,9
BTE64	0,8	0,0	0,6	0,0	0,8
BTE65	1,3	0,3	1,3	0,2	0,9
BTE66	0,5	0,3	0,7	0,6	1,5
BTE67	1,8	0,8	1,9	0,4	1,0
BTE68	10,1	3,2	9,1	0,3	0,9
BTE69	1,9	0,6	2,2	0,3	1,1

FONTE: o autor (2022)

Reproduzindo graficamente o conteúdo da TABELA 4-7 a seguir no GRÁFICO 4-9 observa-se a comparação das vazões específicas medidas com as vazões de controle das barragens BTE36 a BTE69.

Observa-se que para quase todas as barragens as vazões apresentaram uma tendência de remissão quando comparadas com as vazões observadas em outubro de 2022, indicando uma tendência de comportamento de redução.

GRÁFICO 4-9 - VAZÃO MEDIDAS *versus* VAZÕES DE CONTROLE



FONTE: o autor (2022)

4.5 ANÁLISES PROBABILÍSTICAS

Serão apresentados nos itens a seguir os resultados dos dados das vazões específicas, tratados de forma estatística, respectivamente se observará a *estatística descritiva*, *correlação linear (R) - Pearson*, *esperança matemática*, *regressão linear múltipla*, *distribuição normal gaussiana* e por fim um *histograma de frequência*. Os softwares utilizados para tratamento estatístico dos dados foram o Excel e o Past4. Os dados de origem para a avaliação as avaliações estatísticas são as vazões apresentadas anteriormente na TABELA 4-1.

4.5.1 Estatística Descritiva

A avaliação da estatística descritiva da maior vazão específica observada em cada uma das 133 barragens é reproduzida na TABELA 4-8 indicando os resultados da média, erro padrão, mediana, moda, desvio-padrão, variância da amostra, curtose, assimetria, intervalo, mínimo, máximo, soma, contagem e nível de confiança (95%).

TABELA 4-8 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA (VAZÃO ESPECÍFICA)

Estatística Descritiva	
Média	2,21
Erro-padrão	0,22
Mediana	1,26
Moda	0,20
Desvio-padrão	2,58
Variância da amostra	6,68
Curtose	2,93
Assimetria	1,79
Intervalo	12,80
Mínimo	0,00
Máximo	12,80
Soma	294,02
Contagem	133
Nível de confiança (95,0%)	0,44

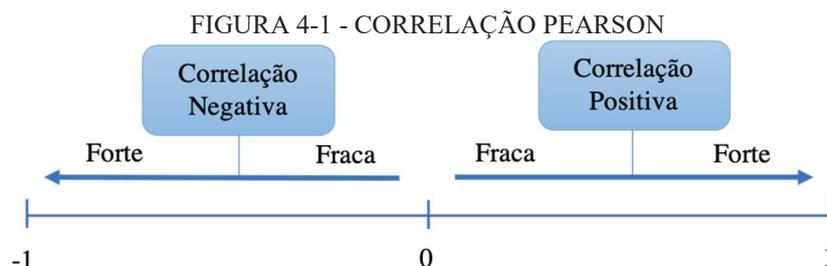
FONTE: o autor (2022)

4.5.2 Correlação R (Pearson)

Na TABELA 4-9 é demonstrado o resultado das correlações lineares entre a maior vazão específica observada das 133 barragens com a altura máxima da barragem, altura máxima do reservatório, comprimento total da barragem, permeabilidade do material de fundação respectivamente.

Em todos os cenários a correlação que se mostrou com maior combinação é (*Q_e versus k_f*) onde apresentou uma **correlação (R-Pearson)** de R=0,35.

Considerando a avaliação da correlação linear as faixas estatísticas sugeridas a seguir podem ser consideradas um parâmetro de observação e avaliação dos dados tratados. Numa faixa de $R=0,10$ a $0,29$ é considerado uma correlação fraca, $R=0,30$ a $0,49$ uma correlação moderada e para o intervalo de $R=0,50$ a 1 uma correlação forte COHEN (1988). Outra referência que pode ser tomada como base considera uma faixa $R=0,10$ a $0,30$ como correlação fraca, o intervalo de $R=0,40$ a $0,60$ uma correlação moderada e $R=0,70$ a 1 como uma correlação forte DANCEY E REIDY (2005).



FONTE: o autor (2022)

TABELA 4-9 - CORRELAÇÃO R (PEARSON) – VAZÃO ESPECÍFICA

Correlação 2 produtos	(R - Pearson)
<i>Qe versus Hb</i>	0,05
<i>Qe versus Hr</i>	0,05
<i>Qe versus Lb</i>	0,12
<i>Qe versus kf</i>	0,35

FONTE: o autor (2022)

Hb: altura máxima do aterro da barragem, *Hr*: altura máxima do reservatório, *Qe*: vazão específica, *kf*: permeabilidade da fundação e *Lb*: comprimento total da barragem.

4.5.3 Esperança Matemática

A seguir são apresentados valores de vazões obtidas através da metodologia de análise denominada esperança matemática, que tem com função calcular o resultado que se espera considerando uma amostragem de dados aleatórios, considerando a multiplicação pela (***p%***) ***probabilidade*** da ocorrência de um conjunto de variáveis. Aqui o objetivo foi indicar a “esperança matemática” através da amostragem das vazões das 133 barragens de terra enrocamento o resultado de probabilidade separando por origem de formação das rochas que compõem a fundação destas estruturas. Adicionalmente são separadamente apresentadas também a estatística descritiva para cada categoria de origem de formação destas rochas de fundação que são (ígneas plutônicas, ígneas vulcânicas, metamórficas e sedimentares clásticas).

4.5.3.1 Rochas Ígneas Plutônicas

A TABELA 4-10 apresenta os resultados de *esperança matemática* (x) = 2,2 l/min/m para a formação de origem de rochas *ígneas plutônica*, observe que para este resultado a amostragem total é de apenas 5 barragens das 133 catalogadas, indicando que 60% desta amostragem apresenta vazões até 1 l/min/m com média de 0,6 l/min/m.

TABELA 4-10 - ESPERANÇA MATEMÁTICA (ÍGNEAS PLUTÔNICAS)

Ígneas plutônicas			
<i>Faixa</i> <i>Qe (maior medida)</i>	<i>Qe (maior medida)</i>	<i>Amostragem</i> <i>Barragens</i>	<i>Probabilidade</i> <i>(p%)</i>
	<i>MÉDIA</i>		
	<i>(l/min/m)</i>		
até 1	0,6	3	60%
maior que 1 até 2		0	0%
maior que 2 até 3	2,7	1	20%
maior que 3 até 4		0	0%
maior que 4 até 5		0	0%
maior que 5	6,6	1	20%
<i>Esperança (x):</i>	2,2	5	100%

FONTE: o autor (2022)

A TABELA 4-11 apresenta os resultados de *estatística descritiva* para a formação de origem de rochas *ígneas plutônica*, nesta amostragem observa-se uma variação de vazão de 0,3 a 6,6 l/min/m com dados de dispersão de *desvio padrão* de 2,6 l/min/m.

TABELA 4-11 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA (ÍGNEAS PLUTÔNICAS)

Descrição	Qe (maior medida) (l/min/m)
	Ígneas plutônicas
Média	2,2
Número Máximo	6,6
Número Mínimo	0,3
Mediana	0,8
Moda	não tem moda
Percentil 95%	5,8
Percentil 85%	4,3
Percentil 75%	2,7
Variância	6,7
Desvio Padrão	2,6
Coefficiente de Variância	116,4
Desvio Médio	1,9

FONTE: o autor (2022)

4.5.3.2 Rochas Ígneas Vulcânicas

A TABELA 4-12 apresenta os resultados de *esperança matemática* (x) = 1,7 l/min/m para a formação de origem de rochas *ígneas vulcânicas*, observe que para este resultado a amostragem total é de 58 barragens das 133 catalogadas, indicando que 52% desta amostragem apresenta vazões até 1 l/min/m com média de 0,4 l/min/m.

TABELA 4-12 - ESPERANÇA MATEMÁTICA (ÍGNEAS VULCÂNICAS)

Ígneas vulcânicas			
Faixa Qe (maior medida)	Qe (maior medida)	Amostragem Barragens	Probabilidade (p%)
	MÉDIA		
	(l/min/m)		
até 1	0,4	30	52%
maior que 1 até 2	1,5	16	28%
maior que 2 até 3	2,5	3	5%
maior que 3 até 4	3,6	4	7%
maior que 4 até 5	4,3	1	2%
maior que 5	9,8	4	7%
Esperança (x):	1,7	58	100%

FONTE: o autor (2022)

A TABELA 4-13 apresenta os resultados de *estatística descritiva* para a formação de origem de rochas *ígneas plutônica*, nesta amostragem observa-se uma variação de vazão de 0,0 a 12,8 l/min/m com dados de dispersão de *desvio padrão* de 2,5 l/min/m.

TABELA 4-13 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA (ÍGNEAS VULCÂNICAS)

Descrição	Qe (maior medida) (l/min/m)
	Ígneas vulcânicas
Média	1,7
Número Máximo	12,8
Número Mínimo	0,0
Mediana	0,9
Moda	0,2
Percentil 95%	8,0
Percentil 85%	2,9
Percentil 75%	1,9
Variância	6,3
Desvio Padrão	2,5
Coefficiente de Variância	143,7
Desvio Médio	1,6

FONTE: o autor (2022)

4.5.3.3 Rochas Metamórficas

A TABELA 4-14 apresenta os resultados de *esperança matemática* (x) = 2,4 l/min/m para a formação de origem de rochas *metamórficas*, observe que para este resultado a amostragem total é de 63 barragens das 133 catalogadas, indicando que 40% desta amostragem apresenta vazões até 1 l/min/m com média de 0,4 l/min/m.

TABELA 4-14 - ESPERANÇA MATEMÁTICA (METAMÓRFICAS)

Metamórficas			
Faixa Qe (maior medida)	Qe (maior medida)	Amostragem Barragens	Probabilidade (p%)
	MÉDIA		
	(l/min/m)		
até 1	0,4	25	40%
maior que 1 até 2	1,5	11	17%
maior que 2 até 3	2,6	9	14%
maior que 3 até 4	3,4	5	8%
maior que 4 até 5	4,7	6	10%
maior que 5	7,7	7	11%
<i>Esperança (x):</i>	2,4	63	100%

FONTE: o autor (2022)

A TABELA 4-15 apresenta os resultados de *estatística descritiva* para a formação de origem de rochas *metamórficas*, nesta amostragem observa-se uma variação de vazão de 0,0 a 9,1 l/min/m com dados de dispersão de *desvio padrão* de 2,4 l/min/m.

TABELA 4-15 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA (METAMÓRFICAS)

Descrição	Qe (maior medida) (l/min/m)
	Metamórficas
Média	2,4
Número Máximo	9,1
Número Mínimo	0,0
Mediana	1,5
Moda	não tem moda
Percentil 95%	7,8
Percentil 85%	4,7
Percentil 75%	3,2
Variância	5,7
Desvio Padrão	2,4
Coefficiente de Variância	100,0
Desvio Médio	1,9

FONTE: o autor (2022)

4.5.3.4 Rochas Sedimentares Clásticas

A TABELA 4-16 apresenta os resultados de *esperança matemática* (x) = 3,7 l/min/m para a formação de origem de rochas *sedimentares clásticas*, observe que para este resultado a amostragem total é de 7 barragens das 133 catalogadas, indicando que 43% desta amostragem apresenta vazões iguais ou superiores a 5 l/min/m com média de 8,5 l/min/m.

TABELA 4-16 - ESPERANÇA MATEMÁTICA (SEDIMENTARES CLÁSTICAS)

Sedimentares Clásticas			
Faixa <i>Qe</i> (maior medida)	<i>Qe</i> (maior medida)	Amostragem Barragens	Probabilidade (p%)
	MÉDIA		
	(l/min/m)		
até 1	0,1	2	29%
maior que 1 até 2		0	0%
maior que 2 até 3	3,0	1	14%
maior que 3 até 4	3,2	1	14%
maior que 4 até 5		0	0%
maior que 5	8,5	3	43%
<i>Esperança</i> (x):	3,7	7	100%

FONTE: o autor (2022)

A TABELA 4-17 apresenta os resultados de *esperança descritiva* para a formação de origem de rochas *metamórficas*, nesta amostragem observa-se uma variação de vazão de 0,0 a 9,9 l/min/m com dados de dispersão de *desvio padrão* de 3,9 l/min/m.

TABELA 4-17- ESTATÍSTICA DESCRITIVA (SEDIMENTARES CLÁSTICAS)

Descrição	<i>Qe</i> (maior medida) (l/min/m)
	Sedimentares Clásticas
Média	4,6
Número Máximo	9,9
Número Mínimo	0,0
Mediana	3,2
Moda	não tem moda
Percentil 95%	9,3
Percentil 85%	8,2
Percentil 75%	7,8
Variância	15,5
Desvio Padrão	3,9
Coefficiente de Variância	86,4
Desvio Médio	3,4

FONTE: o autor (2022)

4.5.4 Regressão Linear Múltipla

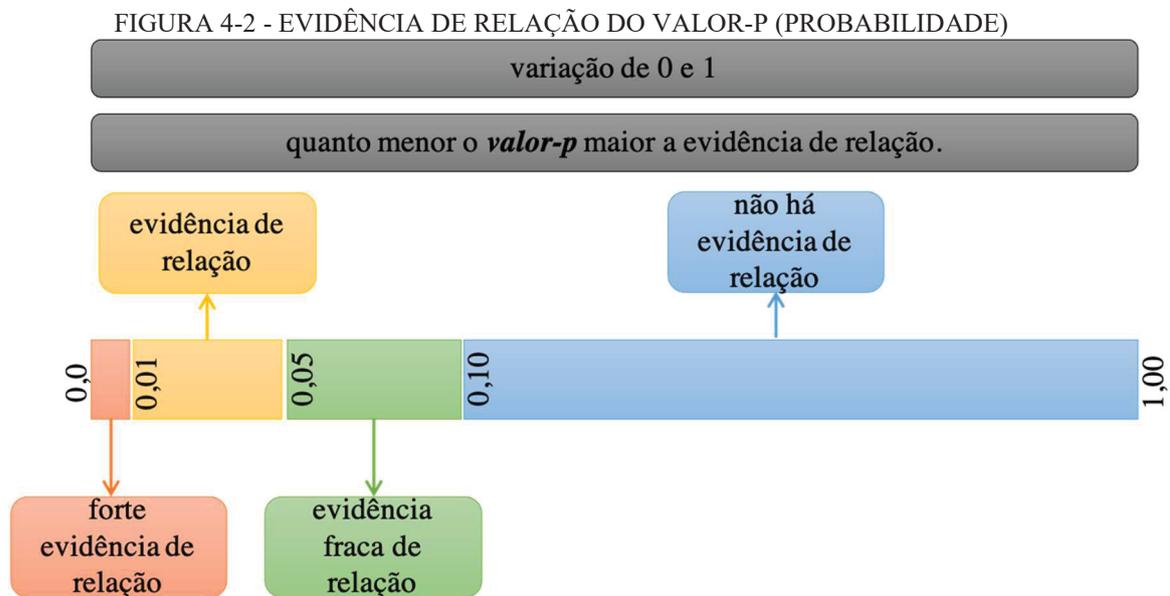
É uma ferramenta estatística que permite utilizar várias variáveis simultâneas para prever um valor variável esperado.

No caso deste estudo serão correlacionadas as variáveis Qt = vazão total (l/min), Hb = altura máxima da barragem (m), Lb = comprimento total da barragem (m), kf = permeabilidade de fundação (m/s), kn = núcleo compactado (m/s), Hr = altura máxima do reservatório (m) e idade da barragem (anos) com a variável dependente que neste caso é a vazão específica, com isso esperasse ter uma diminuição no erro de previsão probabilística (p).

Se tratando da evidência de relação do *valor-p*, este varia de 0 a 1 tendo como conclusão chave o entendimento de quanto menor o *valor-p* maior a evidência de relação.

A faixa de 0 a 0,01 indica uma forte evidência de relação, depois a faixa de 0,01 a 0,05 indica uma evidência de relação, a faixa de 0,05 a 0,10 indica uma evidência fraca de relação e pôr fim a faixa de 0,10 a 1,00 indica que a não há evidência de relação da variável dependente com as demais variáveis.

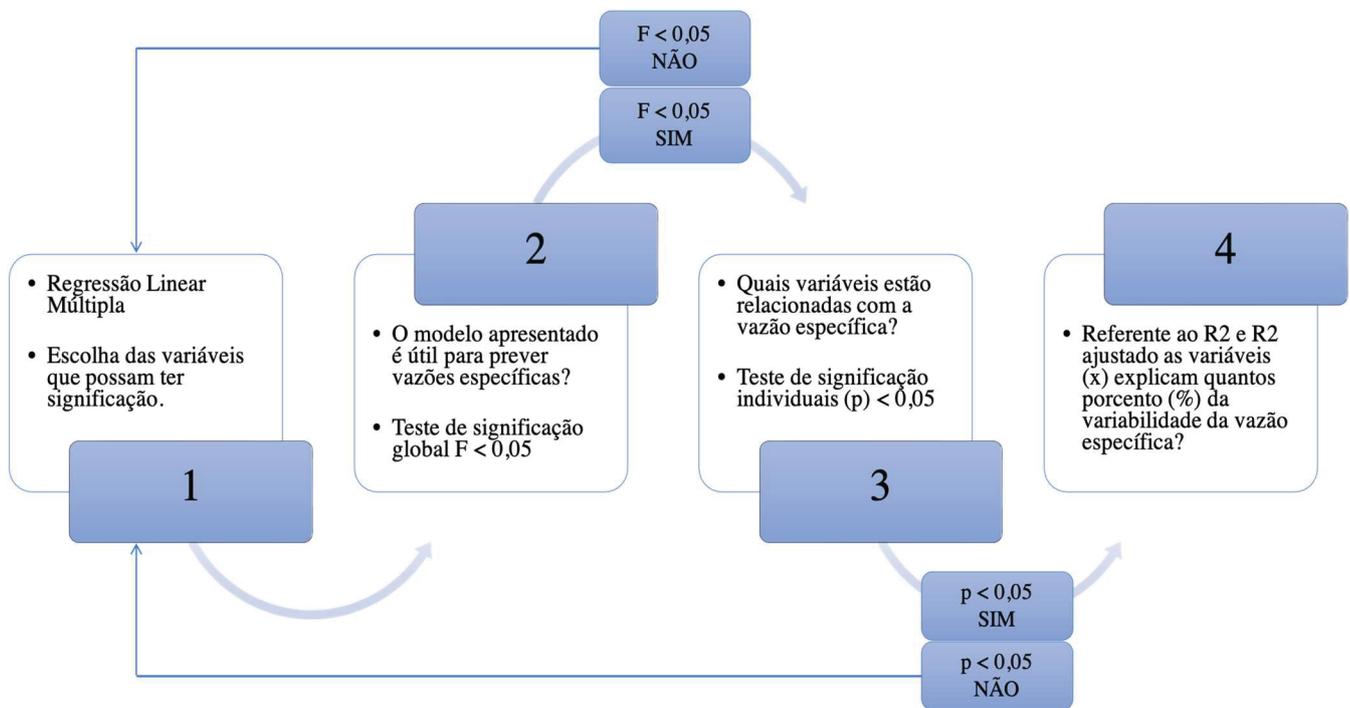
Para avaliação do *valor-p* será observado a faixa de valores de evidência de relação de probabilidade conforme ilustrado na FIGURA 4-2.



FONTE: adaptado de Guimarães (2008)

Para esta verificação estatística foi utilizada a ferramenta de análise de dados do software Excel, as respostas extraídas destas correlações deverão responder às questões a seguir indicadas na FIGURA 4-3:

FIGURA 4-3 - ETAPAS PARA REGRESSÃO LINEAR



FONTE: o autor (2022)

Como resultado, ao final do experimento esperasse obter equações que permitam com apenas o input das variáveis correlacionas calcular estimativa de vazões para barragens de terra e enrocamento.

A primeira equação trata-se de uma análise de regressão linear simples e a segunda equação aplica-se para uma análise de regressão linear múltipla.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_{n1} + b_2 \cdot x_{n2} \quad (12)$$

$y = (Q_e) = \text{vazão específica calculada}$

$b_0 = \text{vazão prevista quando } x_n \dots \text{ é igual a zero.}$

$x_n = \text{variável testada}$

4.5.4.1 Modelo 1 (133 Barragens Brasileiras)

TABELA 4-18 - MODELO 1 - REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA (F<0,05) (P<0,05)

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,796
Quadrado de R	0,634
Quadrado de R ajustado	0,614
Erro-padrão	1,607
Observações	133

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>
Regressão	7	559,149	79,878	30,939	0,000
Residual	125	322,726	2,582		
Total	132	881,876			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor (p)<0,05</i>
Interceptar	1,891(<i>b0</i>)	0,490	3,861	0,000
<i>Qt</i> = vazão total (l/min)	0,001(<i>b1</i>)	0,000	11,662	0,000
<i>Hb</i> = altura máxima da barragem (m)	0,065(<i>b2</i>)	0,120	0,538	0,591
<i>Lb</i> = comprimento total da barragem (m)	-0,001(<i>b3</i>)	0,000	-5,227	0,000
<i>kf</i> = permeabilidade de fundação (m/s)	9846,359(<i>b4</i>)	1631,214	6,036	0,000
<i>kn</i> = núcleo compactado (m/s)	3132953,471(<i>b5</i>)	1136056,063	2,758	0,007
<i>Hr</i> = altura máxima do reservatório (m)	-0,063(<i>b6</i>)	0,121	-0,520	0,604
<i>Id</i> = idade da barragem (anos)	-0,013(<i>b7</i>)	0,009	-1,512	0,133

FONTE: o autor (2022)

gl – grau de liberdade, *SQ* – soma dos quadrados e *MQ* – quadrado médio

ETAPA 1 - Foram escolhidas e testadas as variáveis *Qt* = vazão total (l/min), *Hb* = altura máxima da barragem (m), *Lb* = comprimento total da barragem (m), *kf* = permeabilidade de fundação (m/s), *kn* = núcleo compactado (m/s), *Hr* = altura máxima do reservatório (m) e *Id* = idade da barragem (anos).

ETAPA 2 - O modelo apresentado na TABELA 4-18 serve para prever vazões específicas, considerando que pela metodologia de análise estatística ANOVA como resultado obteve-se através do teste de significação global o valor $F = 0,00 < 0,05$.

ETAPA 3 – Observou-se as variáveis que poderiam estar relacionadas com a vazão específica, com a avaliação do teste de significação individuais para cada variável analisada, e como resultado obteve-se que as variáveis (*Qt*=vazão total, *Lb* = comprimento total da barragem, *kf* = permeabilidade de fundação, *kn* = núcleo compactado) verificam e atendem o critério de $(p) < 0,05$.

Já as variáveis Hb = altura máxima da barragem, Hb = altura máxima do reservatório e Id = idade da barragem analisando matematicamente e estatisticamente, estes valores mostraram-se com evidência de relação nula.

Dentro do ponto de vista se necessita excluir então aquelas variáveis não significativas ou fracas, é importante avaliar que de qualquer maneira apesar das variáveis de altura não explicarem de forma matemática e estatística, estas variáveis podem ser mantidas no modelo pelo fato, primeiramente pelo fato de registro de confirmação de todas as hipóteses possíveis ou não possíveis dando total transparência a análise feita.

Se tratando de uma pesquisa científica pode-se ter dois modelos, o modelo inicial com todas as variáveis e um segundo modelo ajustado com as variáveis que demonstram maior correlação.

ETAPA 4 - Referente ao R^2 das variáveis do **MODELO 1** explicam 63 (%) da variabilidade da vazão específica.

4.5.4.2 Modelo 2 (133 Barragens Brasileiras)

TABELA 4-19 - VARIÁVEIS ESCOLHIDAS PARA FORMULAÇÃO

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,354
Quadrado de R	0,125
Quadrado de R ajustado	0,112
Erro-padrão	2,436
Observações	133

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>
Regressão	2	110,239	55,120	9,286	0,000
Residual	130	771,637	5,936		
Total	132	881,876			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor (p)<0,05</i>
Interceptar	2,006 (<i>b0</i>)	0,343	5,850	0,000
Hb = altura máxima da barragem (m)	0,003 (<i>b1</i>)	0,006	0,426	0,671
kf = permeabilidade de fundação (m/s)	10420,168(<i>b2</i>)	2446,740	4,259	0,000

FONTE: o autor (2022)

gl – grau de liberdade, *SQ* – soma dos quadrados e *MQ* – quadrado médio

ETAPA 1 - Foram escolhidas e testadas as variáveis Hb = altura máxima da barragem (m) e kf = permeabilidade de fundação (m/s), apesar da variável Hb = altura máxima da barragem (m) no MODELO 1 ter apresentado significância quase que nula, será mantida neste modelo, pois se entende que mesmo que esta variável não possa com esta pesquisa ser explicada matematicamente, é um elemento importante quando se trata de vazões observadas em barragens brasileiras.

ETAPA 2 - O modelo apresentado na TABELA 4-19 serve para prever vazões específicas, considerando que pela metodologia de análise estatística *ANOVA* como resultado obteve-se através do teste de significação global o valor $F = 0,00 < 0,05$.

ETAPA 3 – Observou-se as variáveis que poderiam estar relacionadas com a vazão específica, com a avaliação do teste de significação individuais para cada variável analisada, e como resultado obteve-se que a variável (kf = permeabilidade de fundação) verifica e atendem o critério de $(p) < 0,05$.

Já a variável Hb = altura máxima da barragem analisando matematicamente e estatisticamente, estes valores mostram se com evidência de relação nula assim como já observado no MODELO 1.

ETAPA 4 - Referente ao R^2 das variáveis do **MODELO 2** explicam aproximadamente 13 (%) da variabilidade da vazão específica.

Como resultado, ao final do experimento de cada modelo esperasse obter equações que permitam com apenas o input das variáveis correlacionas calcular estimativa de vazões para barragens de terra e enrocamento.

A seguir é apresentada a equação para estimativa de vazões em fundação das variáveis estudadas no MODELO 2:

$$Q = b_0 + b_1.H - b_2.k \quad (13)$$

$$Q_e = 2,006 + 0,003.Hb + 10420,168.kf \quad (14)$$

(Q_e) = vazão específica calculada

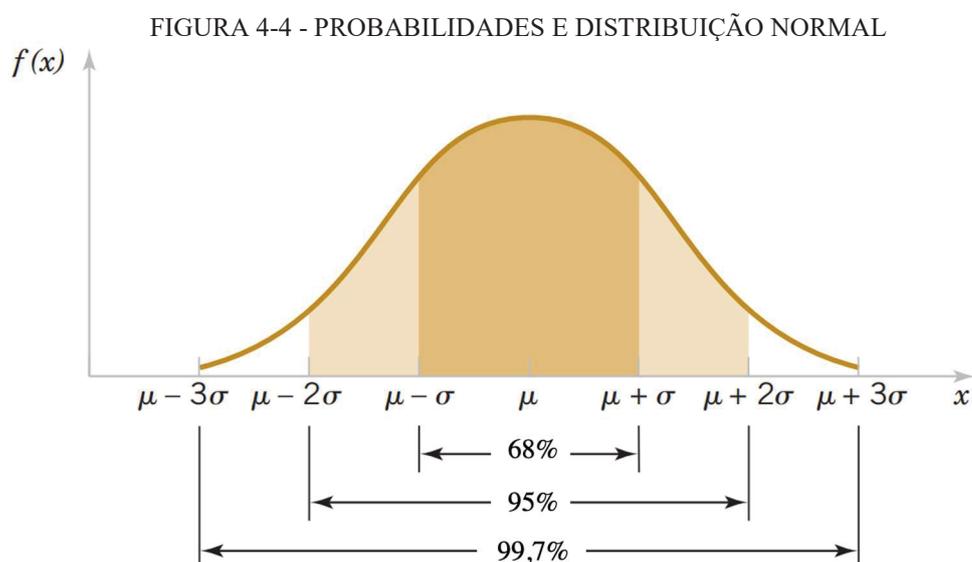
Hb = altura máxima da barragem (m)

kf = permeabilidade de fundação (m/s)

4.5.5 Distribuição Normal (*Gaussiana*)

Sendo considerada a distribuição normal a ferramenta mais importante da estatística, conhecida como a curva gaussiana ou curva do sino devido a seu formato. A distribuição normal é definida por dois parâmetros sendo a média e desvio padrão, tendo neste caso inúmeras distribuições possíveis.

O critério tabelado mais utilizado é a da **normal padronizada** com média 0 e desvio padrão igual a 1. A seguir é apresentado a FIGURA 4-4 que demonstra as probabilidades associadas com uma distribuição normal, com aplicação dos valores da média e desvio padrão.



FONTE: adaptado de Montgomery et. al (2012)

A TABELA 4-20 indica um resumo dos valores μ (média) e σ (desvio padrão) para vazão específica das 133 barragens de terra e enrocamento já apresentados no item 4.5.3, estes dados serão utilizados nos itens a seguir destacando a aplicação de distribuição normal gaussiana para cada tipo de origem de rocha de fundação que são as rochas ígneas plutônicas, ígneas vulcânicas, metamórficas e sedimentares clásticas.

TABELA 4-20 - ORIGEM ROCHA (MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO)

Origem da Rocha de Fundação	μ (média)	σ (desvio padrão)
Ígneas plutônicas	2,2	2,6
Ígneas vulcânicas	1,7	2,5
Metamórficas	2,4	2,4
Sedimentares	4,6	3,9

FONTE: o autor (2022)

4.5.5.1 Rochas Ígneas Plutônicas

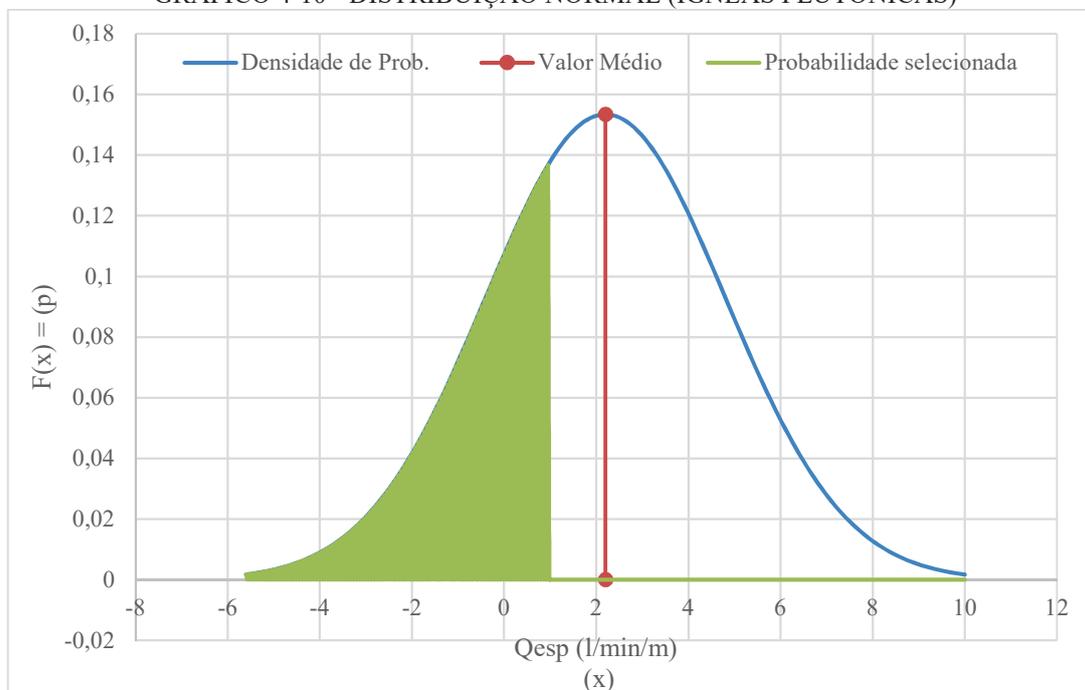
A TABELA 4-21 e GRÁFICO 4-10 apresenta os resultados dos quantís e função de distribuição normal gaussiana com a curva de densidade de probabilidade padronizada para a formação de origem de rochas *ígneas plutônica*, observe que para este resultado a μ = média da vazão específica é **2,2 (l/min/m)** e o desvio padrão de 2,6.

TABELA 4-21 - QUANTÍS E FUNÇÃO (ÍGNEAS PLUTÔNICAS)

μ = média		2,2	
σ = desvio padrão		2,6	
Quantís		Função distribuição	
$F(x)$	Qe (l/min/m)	Qe (l/min/m)	$F(x)$
0,024	-2,964	0,000	0,199
0,135	-0,668	1,000	0,322
0,340	1,128	2,000	0,469
0,500	2,200	3,000	0,621
0,680	3,416	4,000	0,756
0,950	6,477	5,000	0,859
0,997	9,344	10,000	0,999

FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-10 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL (ÍGNEAS PLUTÔNICAS)



FONTE: o autor (2022)

A TABELA 4-22 e GRÁFICO 4-11 demonstra-se que é possível mediante intervalos da função $F(x)$ calcular a probabilidade (p) de incidência de uma determinada faixa de vazão específica (Q_e).

Por exemplo, a probabilidade (p) para uma faixa de vazão específica que varia de 1 l/min/m a 5 l/min/m:

$$(p) \text{ 1 a 5 l/min/m} = 0,8592426840 - 0,3222061669$$

$$(p) \text{ 1 a 5 l/min/m} = 0,5370365168 * 100 = 54\%$$

Ou seja, a probabilidade (p) de ocorrência para vazão específica numa faixa entre 1 a 5 l/min/m é de 54%.

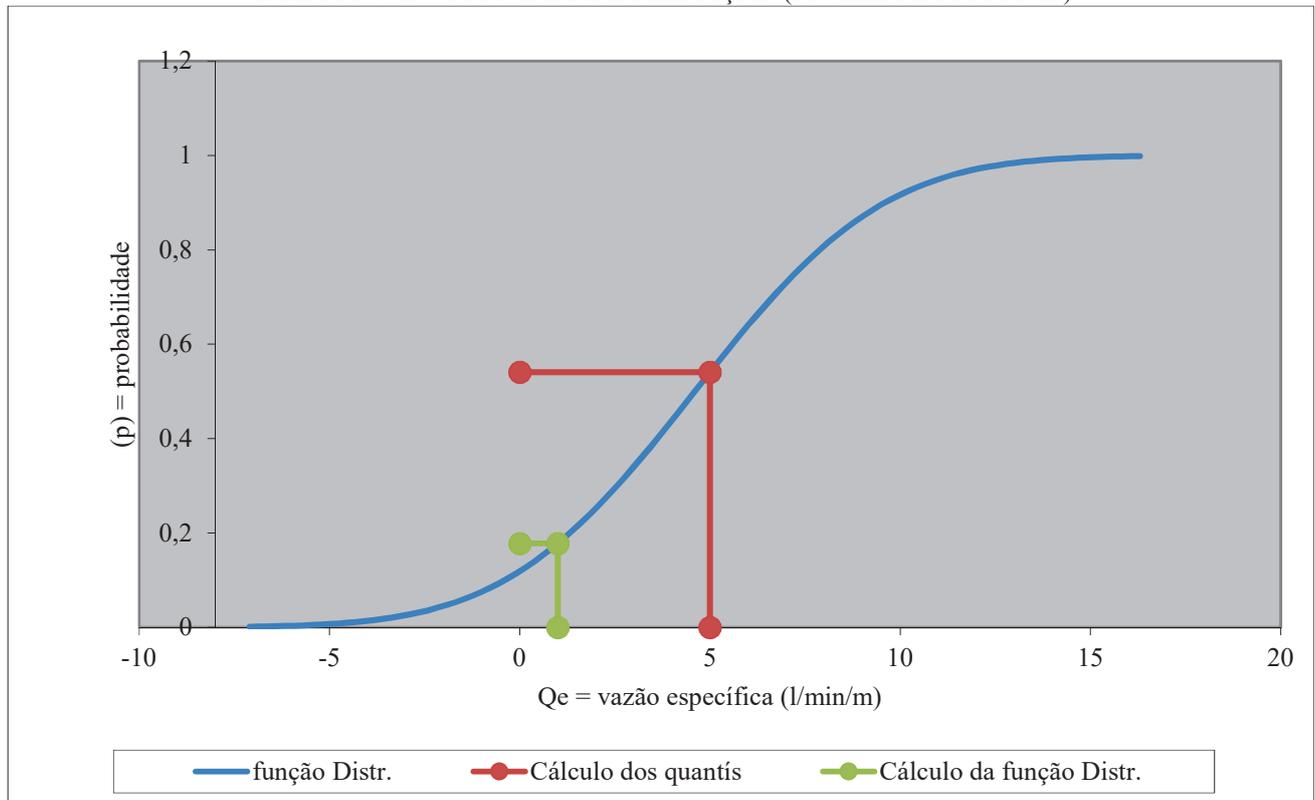
Observando o GRÁFICO 4-11 a probabilidade (p) também pode ser estimada pelo método gráfico observando em escala a variação em observar o intervalo da vazão específica que se deseja analisar.

TABELA 4-22 - CÁLCULO PICTORIAL (ÍGNEAS PLUTÔNICAS)

Função de distribuição para um valor Q_e (l/min/m)		Quantís para uma porcentagem (p)	
$Q_e(x) =$	1	$F(x)$	0,859242684
$F(x)$	0,3222061669	$Q_e =$	5,00000

FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-11 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO (ÍGNEAS PLUTÔNICAS)



FONTE: o autor (2022)

4.5.5.2 Rochas Ígneas Vulcânicas

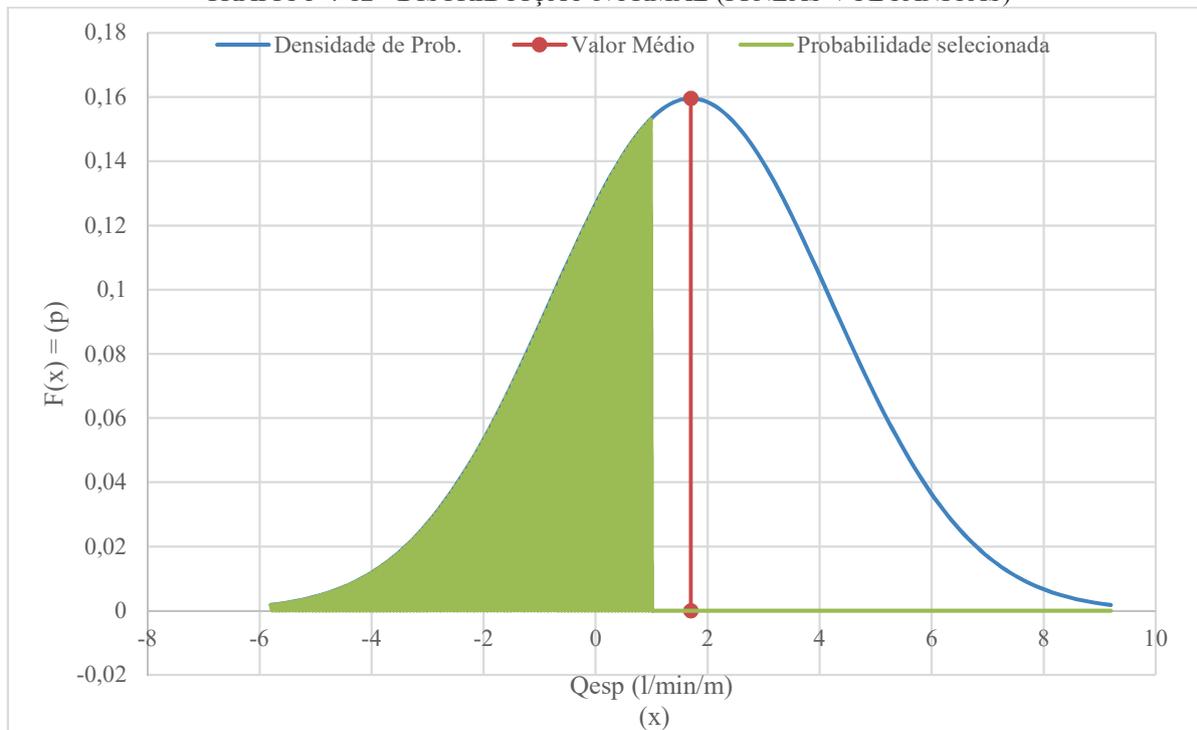
A TABELA 4-23 e GRÁFICO 4-12 apresenta os resultados dos quantís e função de distribuição normal gaussiana com a curva de densidade de probabilidade padronizada para a formação de origem de rochas *ígneas vulcânicas*, observe que para este resultado a $\mu =$ média da vazão específica é **1,7 (l/min/m)** e o desvio padrão de **2,5**.

TABELA 4-23 - QUANTÍS E FUNÇÃO (ÍGNEAS VULCÂNICAS)

$\mu =$ média		1,7	
$\sigma =$ desvio padrão		2,5	
Quantís		Função distribuição	
$F(x)$	Q_e (l/min/m)	Q_e (l/min/m)	$F(x)$
0,024	-3,266	0,000	0,248
0,135	-1,058	1,000	0,390
0,340	0,669	2,000	0,548
0,500	1,700	3,000	0,698
0,680	2,869	4,000	0,821
0,950	5,812	5,000	0,907
0,997	8,569	10,000	1,000

FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-12 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL (ÍGNEAS VULCÂNICAS)



FONTE: o autor (2022)

A TABELA 4-24 e GRÁFICO 4-13 demonstra-se que é possível mediante intervalos da função $F(x)$ calcular a probabilidade (p) de incidência de uma determinada faixa de vazão específica (Q_e).

Por exemplo a probabilidade (p) para uma faixa de vazão específica que varia de 1 l/min/m a 5 l/min/m:

$$(p) \text{ 1 a 5 l/min/m} = 0,9065824910 - 0,3897387524$$

$$(p) \text{ 1 a 5 l/min/m} = 0,5168437386 * 100 = 52\%$$

Ou seja, a probabilidade (p) de ocorrência para vazão específica numa faixa entre 1 a 5 l/min/m é de 52%.

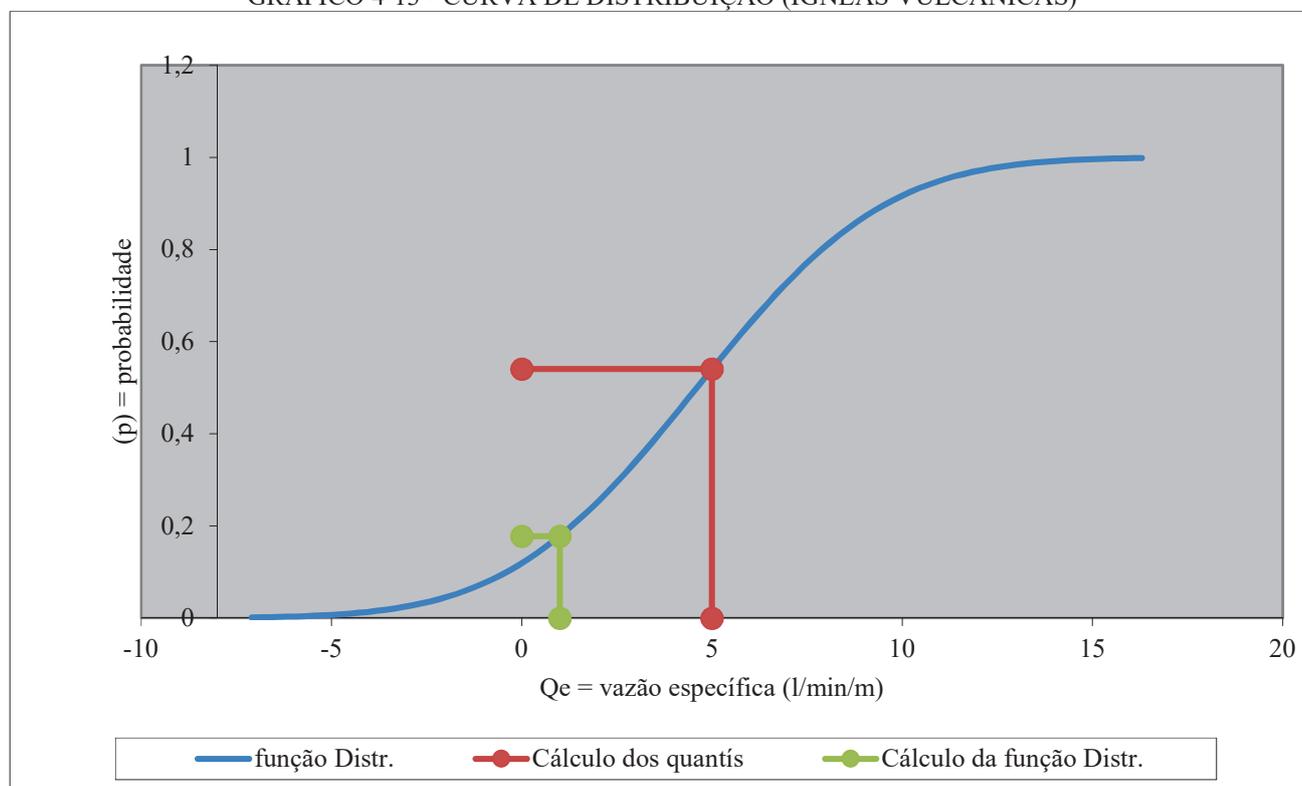
Observando o GRÁFICO 4-13 a probabilidade (p) também pode ser estimada pelo método gráfico observando em escala a variação em observar o intervalo da vazão específica que se deseja analisar.

TABELA 4-24 - CÁLCULO PICTORIAL (ÍGNEAS VULCÂNICAS)

Função de distribuição para um valor Q_e (l/min/m)		Quantís para uma porcentagem (p)	
$Q_e(x) =$	1	$F(x)$	0,906582491
$F(x)$	0,3897387524	$Q_e =$	5,00000

FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-13 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO (ÍGNEAS VULCÂNICAS)



FONTE: o autor (2022)

4.5.5.3 Rochas Metamórficas

A TABELA 4-25 e GRÁFICO 4-14 apresenta os resultados dos quantís e função de distribuição normal gaussiana com a curva de densidade de probabilidade padronizada para a formação de origem de rochas *metamórfica*, observe que para este resultado a μ = média da vazão específica é **2,4 (l/min/m)** e o desvio padrão de 2,4.

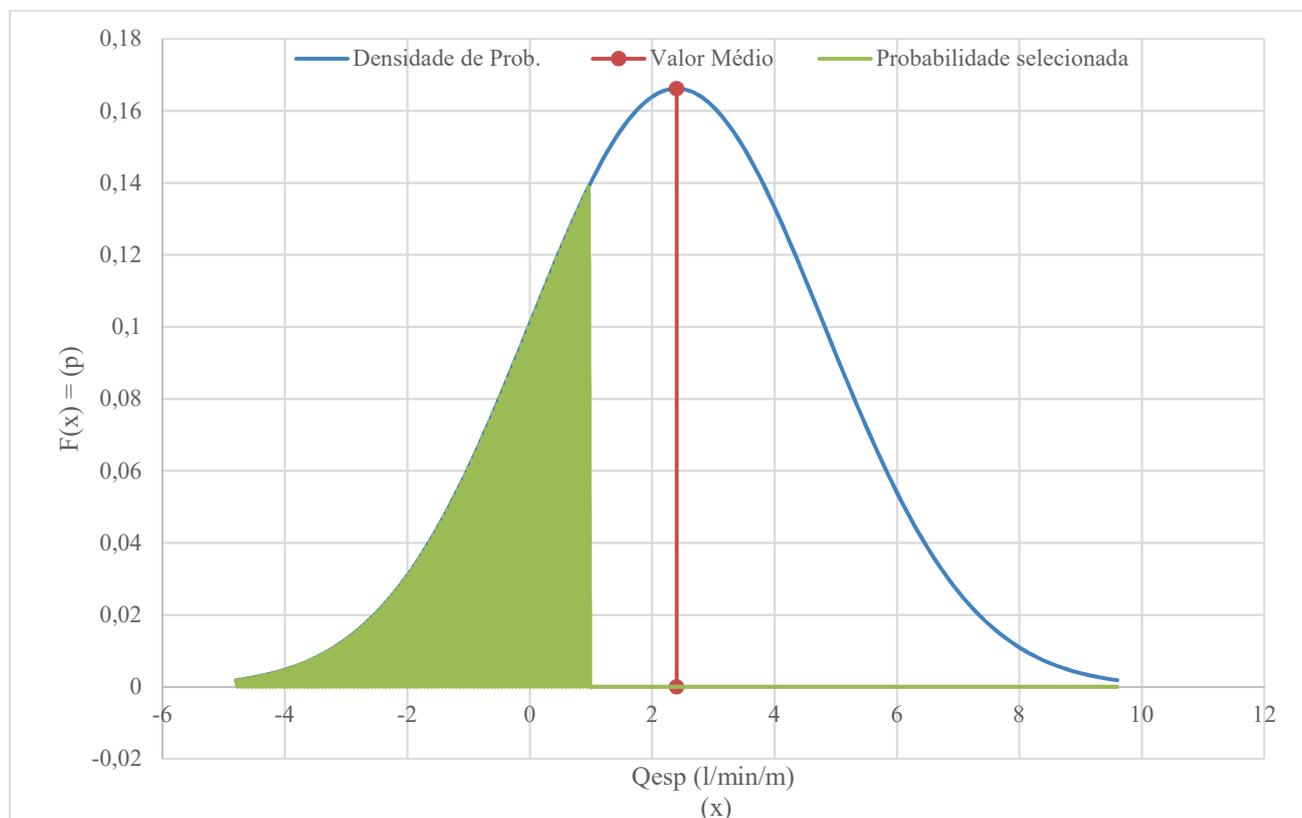
TABELA 4-25 - QUANTÍS E FUNÇÃO (METAMÓRFICAS)

μ = média	2,4
σ = desvio padrão	2,4

Quantís		Função distribuição	
$F(x)$	Q_e (l/min/m)	Q_e (l/min/m)	$F(x)$
0,024	-2,367	0,000	0,159
0,135	-0,247	1,000	0,280
0,340	1,410	2,000	0,434
0,500	2,400	3,000	0,599
0,680	3,522	4,000	0,748
0,950	6,348	5,000	0,861
0,997	8,995	10,000	0,999

FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-14 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL (METAMÓRFICAS)



FONTE: o autor (2022)

A TABELA 4-26 e GRÁFICO 4-15 demonstra-se que é possível mediante intervalos da função $F(x)$ calcular a probabilidade (p) de incidência de uma determinada faixa de vazão específica (Q_e).

Por exemplo a probabilidade (p) para uma faixa de vazão específica que varia de 1 l/min/m a 5 l/min/m:

$$(p) \text{ 1 a 5 l/min/m} = 0,8606697526 - 0,2798344636$$

$$(p) \text{ 1 a 5 l/min/m} = 0,5808352890 * 100 = 58\%$$

Ou seja, a probabilidade (p) de ocorrência para vazão específica numa faixa entre 1 a 5 l/min/m é de 58%.

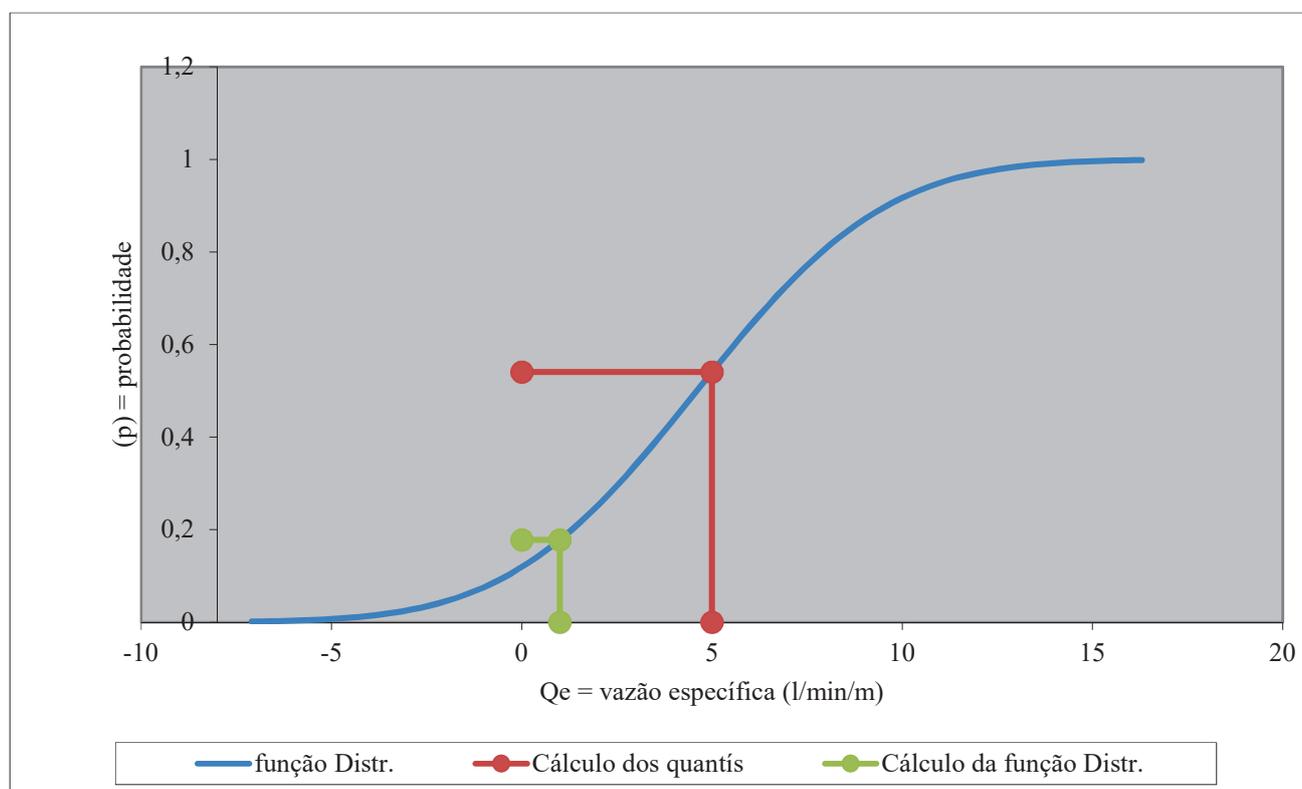
Observando o GRÁFICO 4-15 a probabilidade (p) também pode ser estimada pelo método gráfico observando em escala a variação em observar o intervalo da vazão específica que se deseja analisar.

TABELA 4-26 - CÁLCULO PICTORIAL (METAMÓRFICAS)

Função de distribuição para um valor Q_e (l/min/m)		Quantís para uma porcentagem (p)	
$Q_e(x) =$	1	$F(x)$	0,860669753
$F(x)$	0,2798344636	$Q_e =$	5,00000

FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-15 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO (METAMÓRFICAS)



FONTE: o autor (2022)

4.5.5.4 Rochas Sedimentares Clásticas

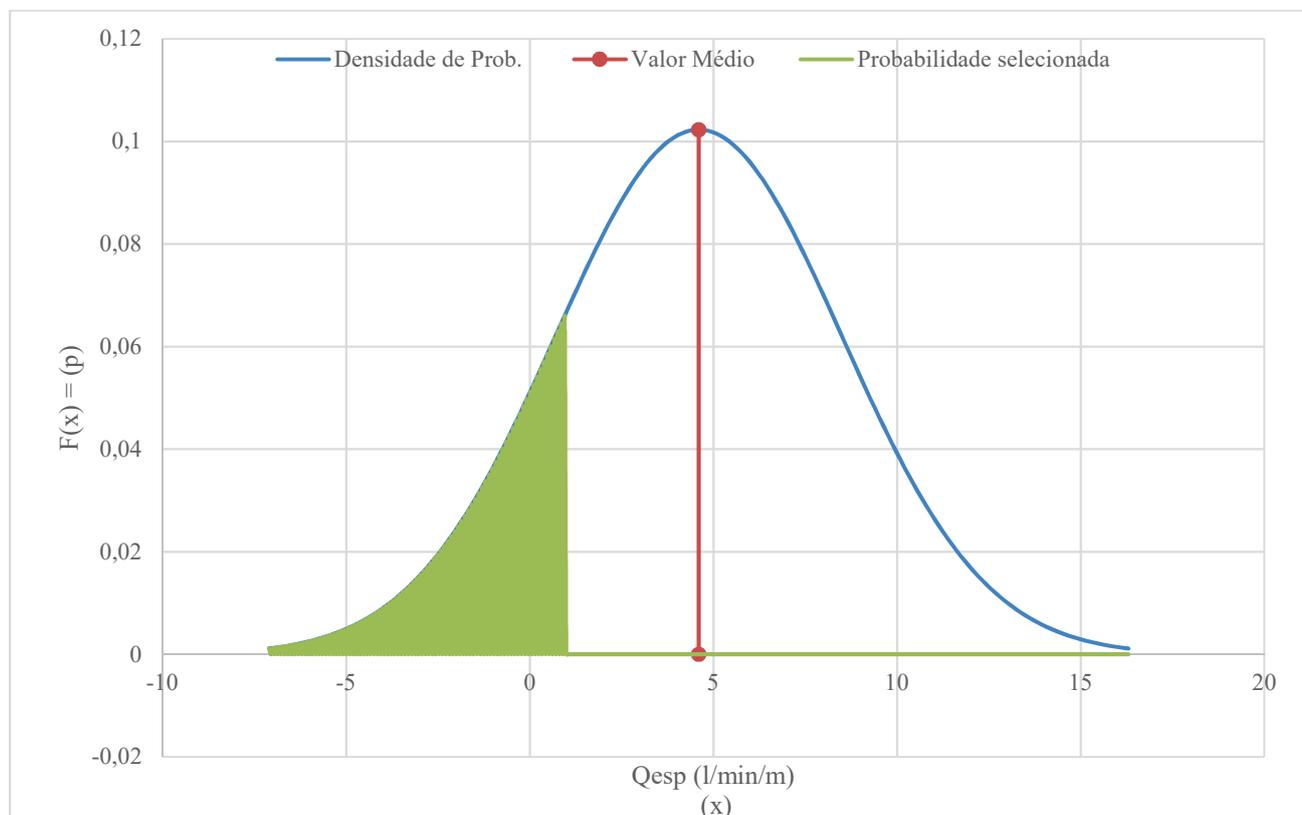
A TABELA 4-27 e GRÁFICO 4-16 apresenta os resultados dos quantís e função de distribuição normal gaussiana com a curva de densidade de probabilidade padronizada para a formação de origem de rochas *ígneas plutônica*, observe que para este resultado a μ = média da vazão específica é 4,6 (l/min/m) e o desvio padrão de 3,9.

TABELA 4-27 - QUANTÍS E FUNÇÃO (SEDIMENTARES CLÁSTICAS)

μ = média		4,6	
σ = desvio padrão		3,9	
Quantís		Função distribuição	
$F(x)$	Q_e (l/min/m)	Q_e (l/min/m)	$F(x)$
0,024	-3,147	0,000	0,119
0,135	0,298	1,000	0,178
0,340	2,991	2,000	0,252
0,500	4,600	3,000	0,341
0,680	6,424	4,000	0,439
0,950	11,015	5,000	0,541
0,997	15,316	10,000	0,917

FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-16 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL (SEDIMENTARES CLÁSTICAS)



FONTE: o autor (2022)

A TABELA 4-28 e GRÁFICO 4-17 demonstra-se que é possível mediante intervalos da função $F(x)$ calcular a probabilidade (p) de incidência de uma determinada faixa de vazão específica (Q_e).

Por exemplo a probabilidade (p) para uma faixa de vazão específica que varia de 1 l/min/m a 5 l/min/m:

$$(p) \text{ 1 a 5 l/min/m} = 0,5408455327 - 0,1779835599$$

$$(p) \text{ 1 a 5 l/min/m} = 0,3628619728 * 100 = 36\%$$

Ou seja, a probabilidade (p) de ocorrência para vazão específica numa faixa entre 1 a 5 l/min/m é de 36%.

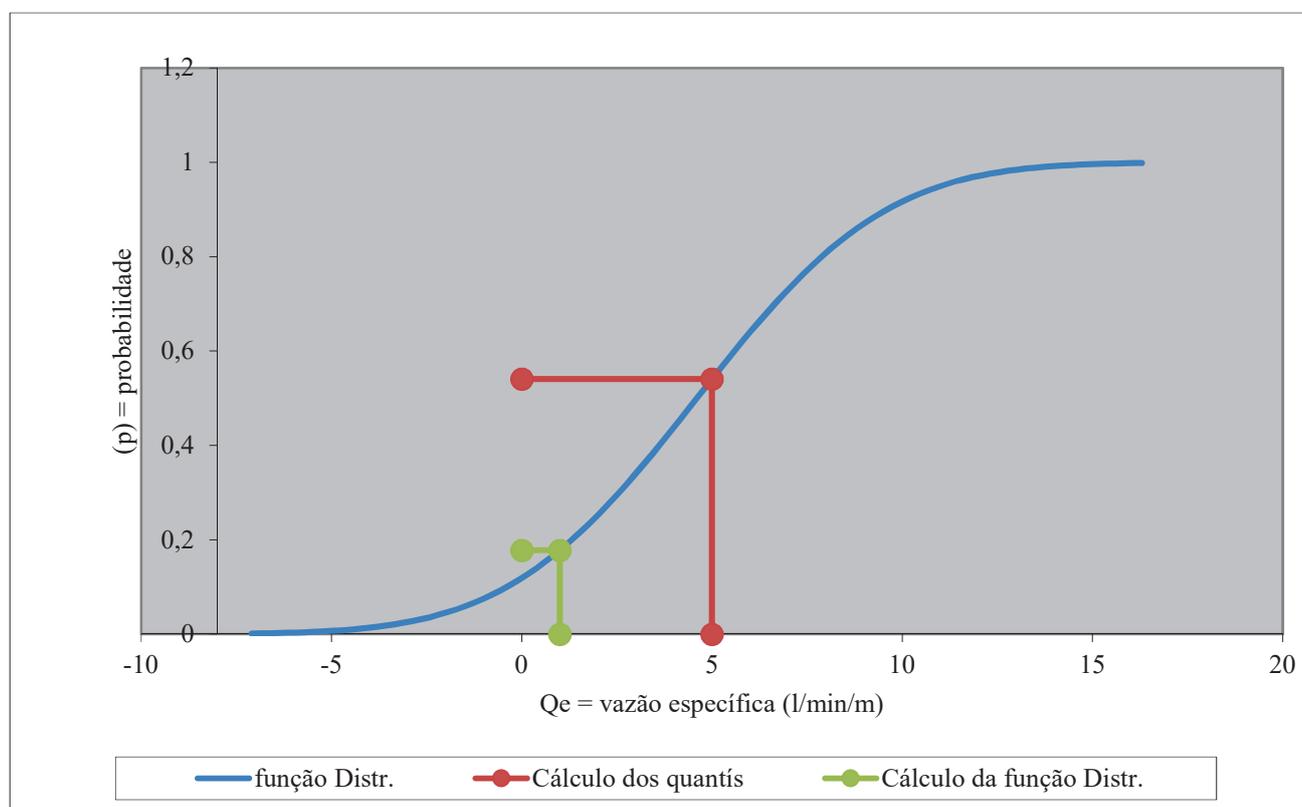
Observando o GRÁFICO 4-17 a probabilidade (p) também pode ser estimada pelo método gráfico observando em escala a variação em observar o intervalo da vazão específica que se deseja analisar.

TABELA 4-28 - CÁLCULO PICTORIAL – SEDIMENTARES CLÁSTICAS

Função de distribuição para um valor Q_e (l/min/m)		Quantís para uma porcentagem (p)	
$Q_e(x) =$	1	$F(x)$	0,540845533
$F(x) =$	0,1779835599	$Q_e =$	5,00000

FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-17 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO (SEDIMENTARES CLÁSTICAS)



FONTE: o autor (2022)

4.5.6 Histograma

Visando representar a frequência das ocorrências dos valores de vazão específica observadas nas 133 barragens de terra e enrocamento é demonstrada na TABELA 4-29 o intervalo das vazões bem como a indicação dos resultados com as faixas do intervalo de confiança (95%), dados estes rodados no software Past4.

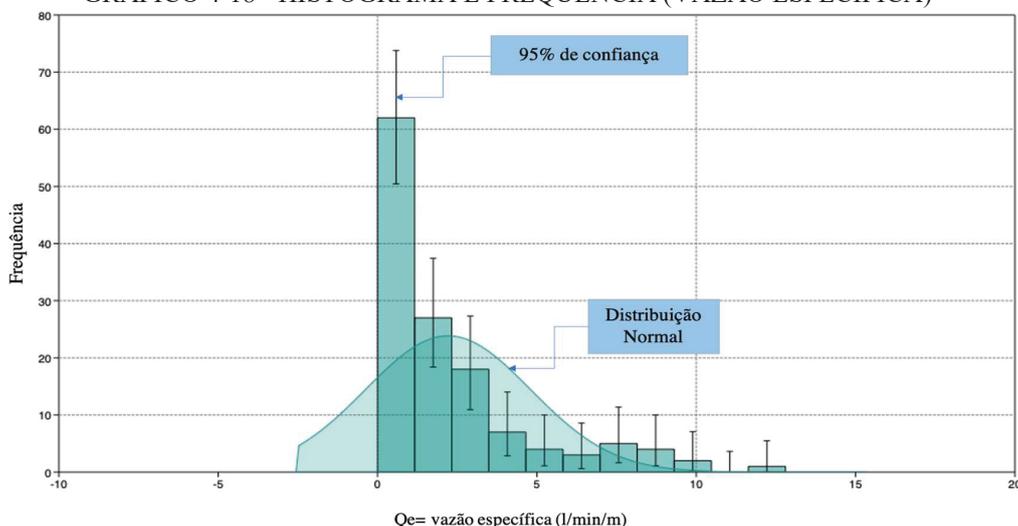
TABELA 4-29 - HISTOGRAMA E FREQUENCIA (VAZÃO ESPECÍFICA)

<i>Q_e</i> = vazão específica (l/min/m) Início do intervalo	<i>Q_e</i> = vazão específica (l/min/m) Fim do intervalo	Frequência	Faixa de 95% Inferior	Faixa de 95% Superior
0,0	1,2	62,0	50,4	73,8
1,2	2,3	27,0	18,4	37,4
2,3	3,5	18,0	10,9	27,3
3,5	4,7	7,0	2,8	14,0
4,7	5,8	4,0	1,1	10,0
5,8	7,0	3,0	0,6	8,6
7,0	8,1	5,0	1,6	11,4
8,1	9,3	4,0	1,1	10,0
9,3	10,5	2,0	0,2	7,1
10,5	11,6	0,0	0,0	3,6
11,6	12,8	1,0	0,0	5,5

FONTE: o autor (2022)

Adicionalmente no GRÁFICO 4-18 é indicada a curva de distribuição normal, intervalo de confiança (95%) e frequência das vazões das barragens, neste é possível observar que há uma frequência de **60%** com uma faixa de confiança entre 50,4% inferior e 73,8% superior, no intervalo de vazão específica entre **0,0 a 1,2 l/min/m**.

GRÁFICO 4-18 - HISTOGRAMA E FREQUENCIA (VAZÃO ESPECÍFICA)



FONTE: o autor (2022)

Desta forma o histograma de barras é bem representativo com a amostragem das 133 barragens, resultando em um modelo de distribuição assimétrico para a direita, que por fim demonstra que a análise de distribuição normal apresentada no 4.5.5 não se ajusta bem em função da dispersão e simetria dos dados.

4.6 VALORES DE CONTROLE

Neste capítulo serão apresentadas formas de obtenção de valores de controle e valores referência. No entanto, estes valores representam barragens do tipo homogênea e de terra e enrocamento, desta forma estes valores não podem ser utilizados como parâmetro de controle para outros tipos de barragem. Ainda os valores obtidos nesta pesquisa devem ser tomados apenas como referência com intuito de auxiliar na investigação, monitoramento e interpretação do comportamento da estrutura.

4.6.1 Valores de controle (*Referência Bibliográfica*)

A seguir é apresentada na TABELA 4-30 valores que podem ser considerados para estimativa de valores de controle para elaboração de manuais de monitoramento de novas obras ou para revisão periódica de segurança de barragens (FERREIRA, 2022).

TABELA 4-30 - ESTIMATIVA DE VALORES DE CONTROLE

Valor de Controle	$q\mu$ (l/min/m) Vazão específica (bibliográfica)
Atenção	2,00
Alerta	3,50
Emergência	5,00

FONTE: adaptado de Ferreira (2022)

A seguir é apresentada na TABELA 4-31 valor que podem ser considerados para estimativa de *valores de referência* para elaboração de manuais de monitoramento de obras que pelas suas características de fundação e maciço do aterro apresentando valores com baixa permeabilidade ou para aquelas em revisão periódica de segurança de barragens que historicamente apresentaram leituras com baixos valores de vazão.

Nesta pesquisa valores de $1,00 \text{ l/min/m}$ apresenta-se como sendo um valor observado com mais frequência em barragens de terra e enrocamento brasileira e ainda conforme Ferreira (2022), acaba sendo um parâmetro usual quando se trata de avaliação de comportamento de barragens.

TABELA 4-31 - MAIOR VALOR OBSERVADO

Valor de Controle	$q\mu$ (l/min/m) Vazão específica (bibliográfica)
Referência	1,00

FONTE: Ferreira (2022)

4.6.2 Valores de controle (*Valor esperado*)

A seguir é apresentado na TABELA 4-32 os valores esperados diferenciados pela formação de origem da rocha de fundação, valores estes obtidos nesta pesquisa.

TABELA 4-32 - VALOR DE REFERÊNCIA POR TIPO DE FUNDAÇÃO

Valor de Controle	$q\mu$ (l/min/m) Vazão específica média por origem de rocha de fundação			
	Ígneas plutônicas	Ígneas vulcânicas	Metamórficas	Sedimentares
	(l/min/m)	(l/min/m)	(l/min/m)	(l/min/m)
Valor de Referência	2,20	1,70	2,40	4,60

FONTE: o autor (2022)

Tendo como base a fórmula da **equação (14)** resultante na análise do modelo 2 apresentado no item 4.5.4.2, esta pode ser utilizada como base de ajuste e correção para estimativa de valores de controle a serem aplicados para medidores de vazão em novos projetos e também em revisões periódicas de segurança de barragem.

Para aplicação em barragens distintas de terra e enrocamento, pode-se fazer o ajuste dos valores de vazão específica de controle apresentados na TABELA 4-30, TABELA 4-31 e TABELA 4-32 utilizando a equação (15) para estimativa de valores de controle:

$$Q_e = q\mu + 0,003.Hb + 10420,168.kf \quad (15)$$

Por fim, para cálculo de valores de controle expressos como vazão total, conforme *equação (16)* basta multiplicar a vazão específica obtida na fórmula (15) pelo comprimento de influência do medidor de vazão.

$$Qt = Qe \cdot Lc \quad (16)$$

(Qe) = vazão específica calculada

Hb = altura máxima da barragem (m)

kf = permeabilidade de fundação (m/s)

Lc = comprimento do trecho de contribuição do medidor de vazão (m)

(Qt) = vazão total | (estimativa de vazão total)

4.6.3 Valores de controle (*Percentis*)

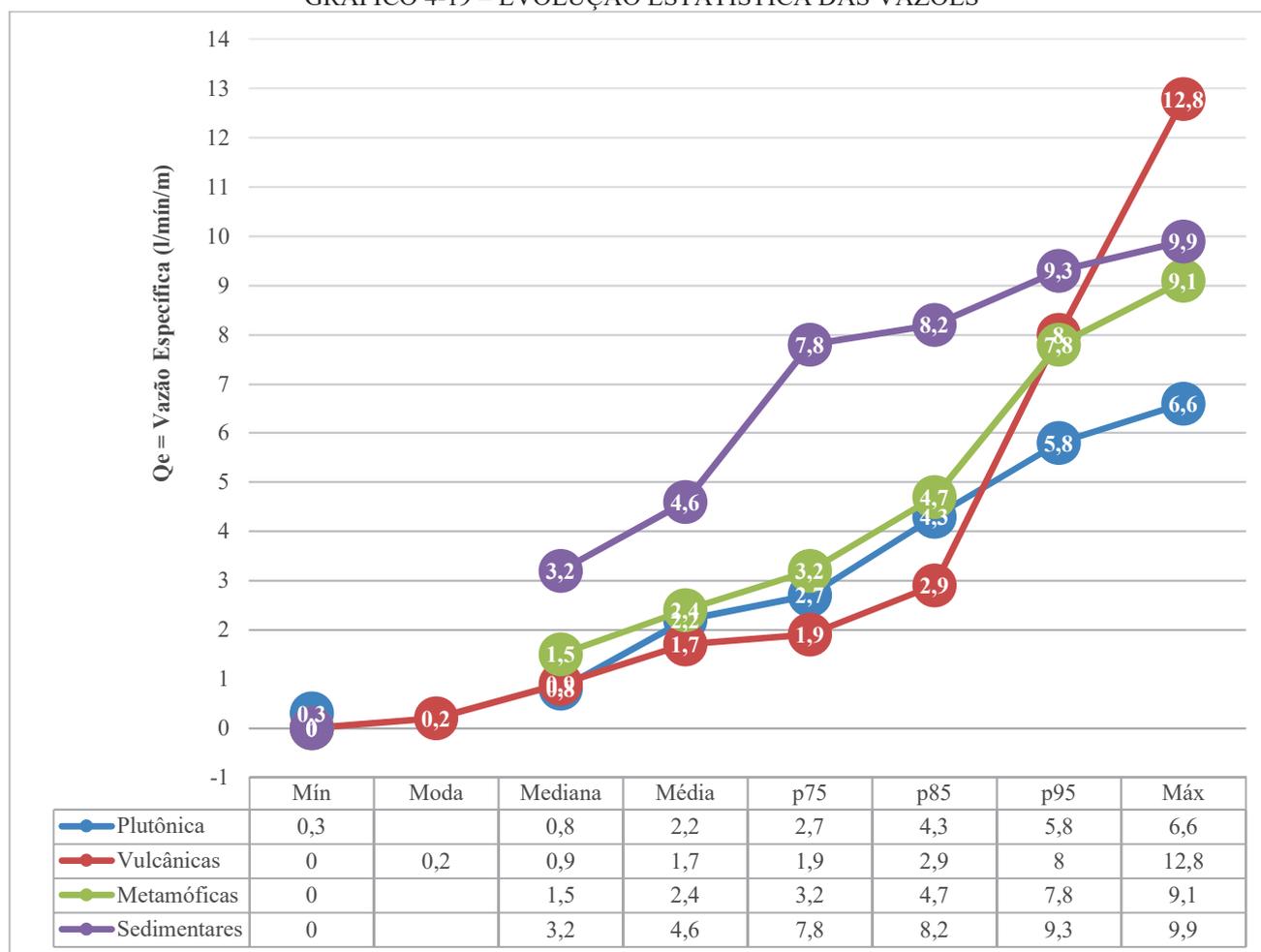
Os percentis são importantes para estabelecer as zonas de segurança ao longo das construções e ao redor das barragens. De modo que partir delas, são definidos os limites para a segurança e o desempenho das estruturas ao longo do tempo. Entretanto, os percentis podem ser aplicados para avaliar e prever o comportamento das estruturas, como a taxa de deformação, resistência à tração, efeitos de corrosão, entre outros.

Além disso, também são usados para avaliar e mensurar os riscos potenciais associados às barragens em relação aos movimentos geodésicos, água subterrânea, clima e outros fatores. Onde, os percentis permitem definir valores de referência os quais podem auxiliar para tomadas de decisão de modo a contribuir para segurança e o desempenho de uma barragem.

Levando em consideração a simetria ou assimetria da distribuição dos dados mesmo que demonstrem uma grande dispersão, entendem-se que as separatrizes podem proporcionar um maior esclarecimento da dispersão do conjunto, podendo o conjunto ser simétrico, simétrico com maior dispersão, assimétrico para a direita ou assimétrico para a esquerda (REIS, 2023).

O **GRÁFICO 4-19** resume a evolução estatística das vazões específicas por tipo de origem de rocha, indicando haver uma tendência de paralelismo na respectiva ordem (Vulcânicas, Plutônicas, Metamórficas e Sedimentares), e diante dos resultados estatísticos extraídos da amostragem das 133 barragens demonstraram que a média é 2,21 l/min/m, a mediana 1,26 l/min/m e a moda 0,2 l/min/m, no entanto, é adequado a adoção dos percentuais 75%, 85% e 95% para valores de controle e grau de aceitação definidos nesta pesquisa.

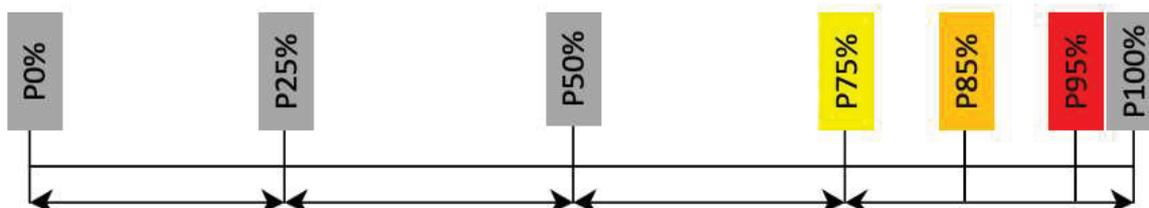
GRÁFICO 4-19 – EVOLUÇÃO ESTATÍSTICA DAS VAZÕES



FONTE: o autor (2022)

A seguir na FIGURA 4-5 de forma esquemática é apresentada as faixas dos percentis, ainda os percentis podem ser representados a cada 1% dentro do limite de 100% em um sentido crescente:

FIGURA 4-5 - ESQUEMA DOS PERCENTIS



FONTE: adaptado de Reis (2023)

A seguir é apresentado na TABELA 4-33 os valores de controle calculados por percentis a partir dos dados de vazões máximas observadas através dos maciços e fundações de 133 barragens brasileiras de terra e enrocamento, os percentis adotados para os valores de controle tendem a ser conservadores em função da gama de dados analisados:

TABELA 4-33 – VALORES DE CONTROLE (PERCENTIS)

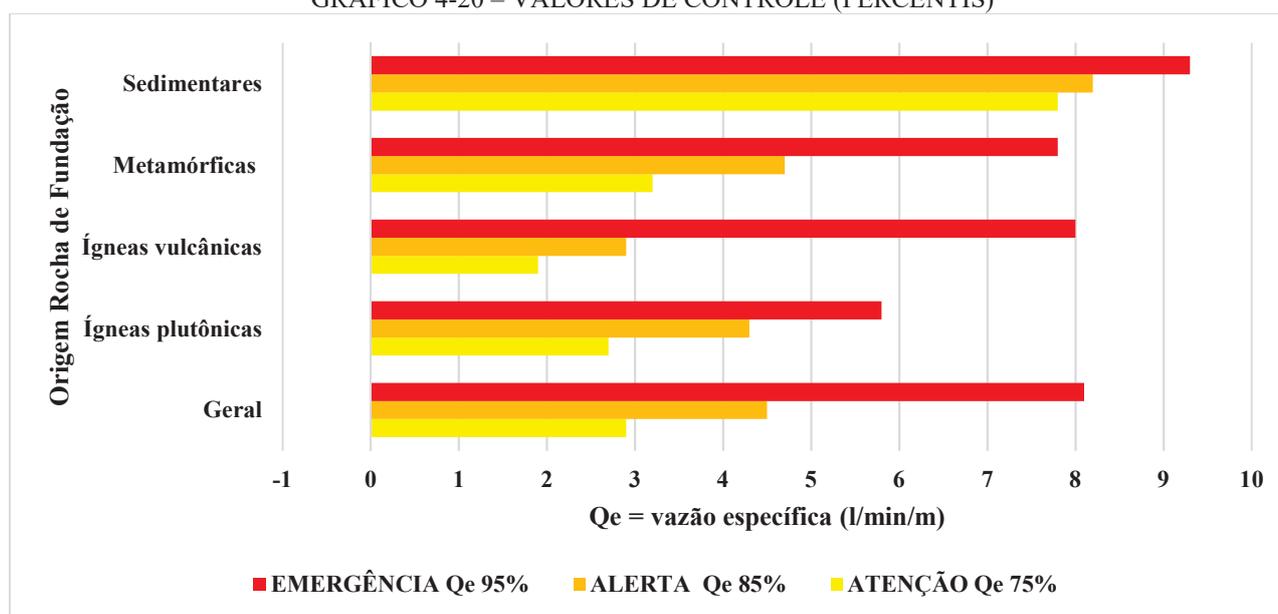
Origem da Rocha de Fundação	ATENÇÃO	ALERTA	EMERGÊNCIA
	Qe 75%	Qe 85%	Qe 95%
Geral	2,9	4,5	8,1
Ígneas plutônicas	2,7	4,3	5,8
Ígneas vulcânicas	1,9	2,9	8,0
Metamórficas	3,2	4,7	7,8
Sedimentares	7,8	8,2	9,3

FONTE: o autor (2022)

(Qe%) = vazão específica (percentil)

A seguir, de forma gráfica é apresentado no GRÁFICO 4-20 os valores de controle plotados e calculados por percentis a partir dos dados de vazões máximas observadas através dos maciços e fundações de 133 barragens brasileiras de terra e enrocamento:

GRÁFICO 4-20 – VALORES DE CONTROLE (PERCENTIS)



FONTE: o autor (2022)

4.6.4 Valores de controle (*Histórico de Leituras*)

Outra forma de se estimar o valor de referência para acompanhamento da instrumentação é se basear no histórico de leitura utilizando ferramentas para tratamentos estatísticos estabelecendo faixas de variação observando a leituras observadas dentro da série histórica, resultando ao fim em um valor de referência para cada instrumento tendo como resultante a média, desvio-padrão. Onde adicionalmente estimam-se os limites inferiores e superiores buscando estabelecer faixas de variação dentro das quais as medidas dos instrumentos poderão ser consideradas historicamente coerentes. De modo que essas faixas são determinadas com uso de técnicas estatísticas aplicadas à série histórica de cada instrumento.

Entretanto, como resultado, efetua-se a determinação de valores de referência para cada instrumento, tidos como média, desvio-padrão e níveis de referência superior e inferior, dentro destas correlações estatísticas é importante se assegurar de todos os dados observando se no período não possa ter nenhuma leitura anômala que possa resultar em um erro de medição, pois, este dado trazer resultados anômalos nas estimativas de valores de referência (JULIANO et al., 2005).

4.7 RESUMO DOS RESULTADOS

De modo a possibilitar uma comparação direta entre as análises apresentadas nos capítulos anteriores, a seguir na TABELA 4-34 é reproduzido o resumo de alguns resultados desta pesquisa de modo a deixar a visualização geral mais didática. É possível ainda observar a comparação entre os valores obtidos pelas correlações estatísticas por tipo de origem da rocha de fundação, indicando amostragem que foi utilizada, bem como os valores de vazão específica calculadas pela estatística descritiva.

TABELA 4-34 – RESULTADOS ROCHA DE ORIGEM (ESTATÍSTICA DESCRITIVA)

Origem da Rocha de Fundação	Nº de Barragens (Amostragem)	Qe = vazão específica (l/min/m)							
		média	mediana	desvio padrão	mínimo	máximo	percentil 75%	percentil 85%	percentil 95%
Rochas em Geral	133	2,2	1,26	2,6	0	12,8	2,9	4,5	8,1
Rochas Ígneas Plutônicas	5	2,2	0,8	2,6	0,3	6,6	2,7	4,3	5,8
Rochas Ígneas Vulcânicas	58	1,7	0,9	2,5	0	12,8	1,9	2,9	8
Rochas Metamórficas	63	2,4	1,5	2,4	0	9,1	3,2	4,7	7,8
Rochas Sedimentares	7	4,6	3,2	3,9	0	9,9	7,8	8,2	9,3

FONTE: o autor (2022)

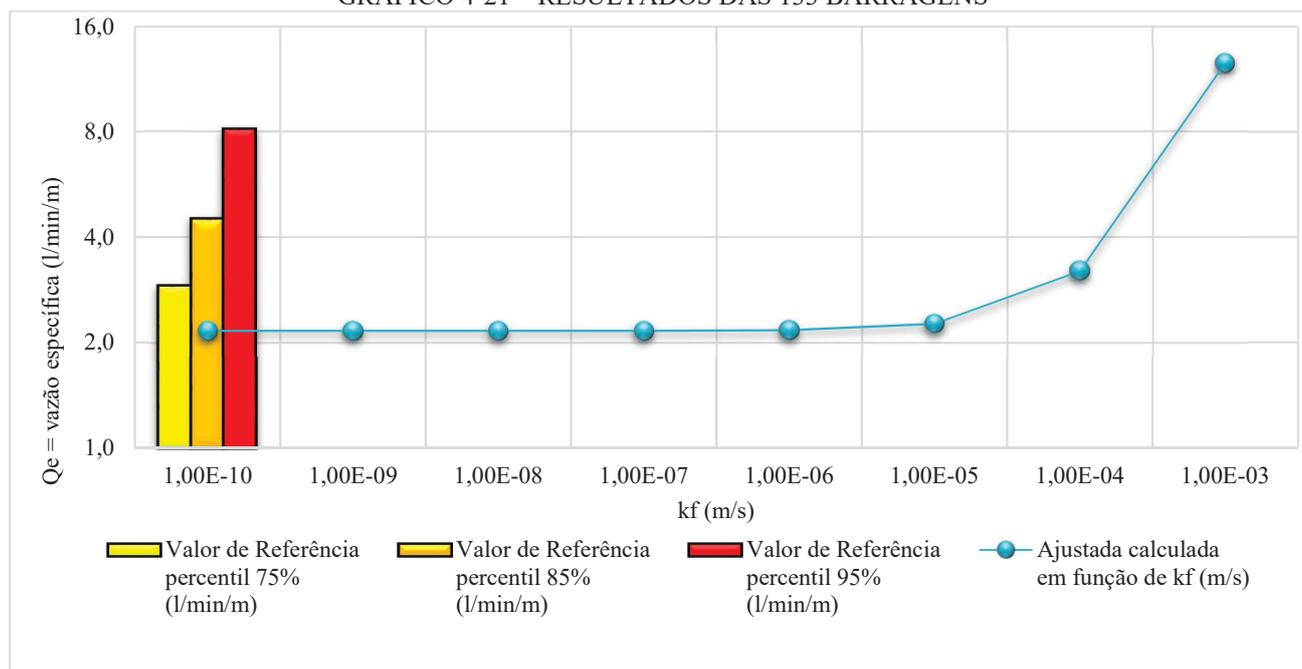
Na TABELA 4-35 e GRÁFICO 4-21 são apresentados demais resultados obtidos com correlações estatísticas (regressão linear múltipla e descritiva) comparando com valores de controle bibliográfico.

TABELA 4-35 – RESULTADOS DAS 133 BARRAGENS

Regressão Linear Múltipla - Modelo 2 ($Q_e=2,006+0,003.H_b+10420,168.k_f$)				Pesquisa					Bibliografia						
				Estatística Descritiva (Origem da Rocha de Fundação) Q_e = vazão específica (l/min/m)					Percentis			Ferreira (2022)			
μ (l/min/m)	H _b (m)	k _f (m/s)	Ajustada calculada em função de k _f (m/s)	Rochas em Geral (l/min/m)	Rochas Ígneas Plutônicas (l/min/m)	Rochas Ígneas Vulcânicas (l/min/m)	Rochas Metamórficas (l/min/m)	Rochas Sedimentares (l/min/m)	Valor de Referência percentil 75% (l/min/m)	Valor de Referência percentil 85% (l/min/m)	Valor de Referência percentil 95% (l/min/m)	Valor de Atenção (l/min/m)	Valor de Alerta (l/min/m)	Valor de Emergência (l/min/m)	
2,006	50	1,00E-10	2,2												
2,006	50	1,00E-09	2,2												
2,006	50	1,00E-08	2,2												
2,006	50	1,00E-07	2,2	2,2	2,2	1,7	2,4	4,6	2,9	4,5	8,1	2,0	3,5	5,0	
2,006	50	1,00E-06	2,2												
2,006	50	1,00E-05	2,3												
2,006	50	1,00E-04	3,2												
2,006	50	1,00E-03	12,6												

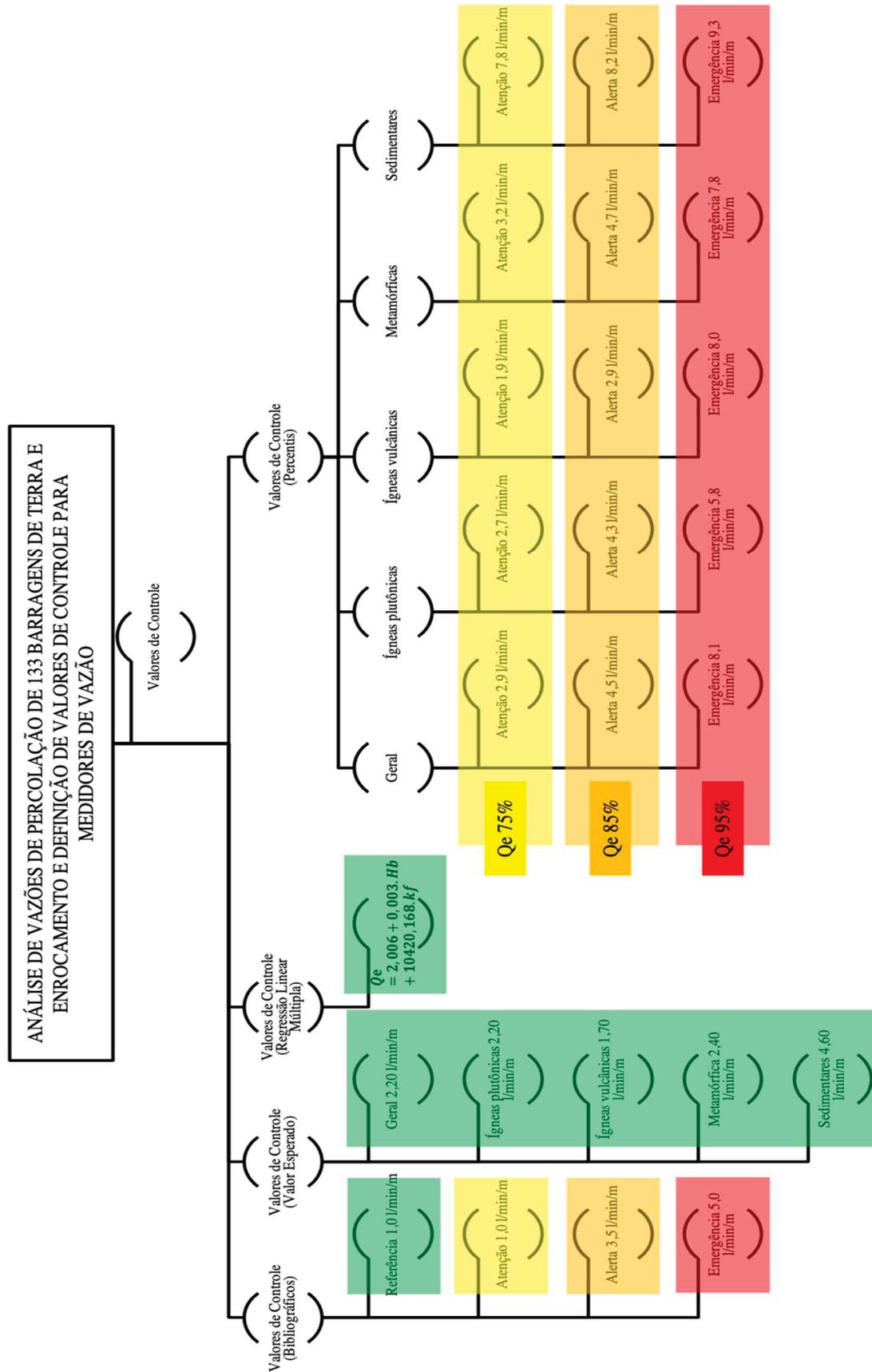
FONTE: o autor (2022)

GRÁFICO 4-21 – RESULTADOS DAS 133 BARRAGENS



FONTE: o autor (2022)

FIGURA 4-6 - VALORES DE CONTROLE E DE REFERÊNCIA



FONTE: o autor (2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo é apresentado as conclusões desta pesquisa, bem como sugestões para elaboração de trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as conclusões descritas separadamente por tipo de análise tratando-se de vazões analisadas, análises estatísticas e valores de controle.

5.1.1 Vazões analisadas

Visando representar a frequência das ocorrências dos valores de vazão específica observadas nas 133 barragens. Este trabalho teve como abordagem principal apresentar correlações entre vazões de drenagem observadas através dos maciços e fundações de 133 barragens brasileira de terra e enrocamento.

Nesta pesquisa foi reunida uma ampla revisão bibliográfica detalhada do que se diz respeito a técnica de observação de vazões, instrumentos de auscultação para medição de vazões, detalhes construtivos e intervenções emergenciais e definitivas em remediação a anomalias que podem surgir com processo de erosão interna de uma barragem.

Plotagem gráfica do histórico de vazões específicas consolidando a maior medição observada correlacionando com o nível histórico do reservatório, geologia do solo de fundação e aspectos geométricos (comprimento e altura) de barragens de terra e enrocamento brasileiras, aumentando o acervo já existente e vazões publicados em bibliografias de referência.

Referente as *análises de vazões de percolação de 133 barragens de terra e enrocamento*, foram apresentados valores de vazões de drenagem que percolam através do maciço e fundação de 98 barragens brasileiras, neste estudo foram observadas leituras históricas de 280 medidores de vazão implantados e distribuídos nestas 98 barragens.

Somando com as 35 barragens já apresentadas por Silveira em 2006, totaliza-se 133 barragens de terra e enrocamento com valores reais de vazões observadas em barragens brasileiras.

Conclui-se durante as análises que **43%** das barragens tem vazões máximas observadas na faixa de **0 a 1,00 l/min/m**, que por fim também 88,65% destas 133 barragens possuem vazões máximas observadas entre **0 a 5 l/min/m**.

Mediante uma relação entre a vazão teórica com a maior vazão medida, fazendo uma média das barragens as quais foi possível obter também as vazões teóricas, conclui-se que ao comparar estas vazões, a vazão real de campo pode ser **6,81 vezes** maior que a vazão teórica de projeto.

Na análise de correlação entre a vazão específica com o *ano de início de operação* das 133 barragens, notou-se que não há uma tendência em que a vazão pudesse variar em função do avanço dos anos, considerando que as barragens mais novas foram construídas com tecnologias de construção mais aprimoradas, entretanto não é possível confirmar com este estudo que haja uma grande influência de tecnologia de construção neste caso.

Na relação entre a vazão mais atual medida observada com a vazão específica de controle, a média é igual a **0,3 vezes**, e a relação entre a maior vazão específica medida observada com a vazão específica de controle, a média é igual a **1,6 vezes**, o que resulta numa redução de vazão de aproximadamente 21%.

Observou-se também que após avaliação de correlação da vazão específica com a *permeabilidade do aterro compactado* do maciço de cada barragem apresentou um índice de baixa correlação e consequentemente indica pouca influência nas medições obtidas nos medidores de vazão, porém, é importante que esta avaliação seja feita com cuidado, pois, historicamente há casos de erosão interna diretamente pelo maciço com surgências de água no talude de jusante.

Para a correlação da vazão específica com a *permeabilidade da fundação* de cada barragem, apresentou-se um comportamento de tendência linear mais favorável, ainda que baixo, demonstra uma maior influência nos valores de vazão específica em relação as demais variáveis estudadas.

Após a avaliação das vazões específicas observadas médias indicadas por *faixas de vazão*, conclui-se que **45%** das 133 barragens de terra e enrocamento apresentaram vazões específicas máximas na ordem de até **1 l/min/m** com média entre todas as barragens de **0,4 l/min/m**.

Quanto as vazões específicas médias observadas indicadas por *origem das rochas de fundação*, observou-se que nas rochas de origem sedimentares clásticas, tendem a ter a vazões específicas superiores, com média de **4,6 l/min/m**, enquanto os outros tipos de fundações com origem estão com médias entre **1,7 a 2,4 l/min/m**.

5.1.2 Análises Estatísticas

Para as *análises probabilísticas* foram apresentados os resultados dos dados das vazões específicas tratados de forma estatística, respectivamente utilizando os métodos da estatística descritiva, correlação linear (R - Pearson, esperança matemática, regressão linear múltipla, distribuição normal gaussiana e por fim um histograma de frequência.

Em todos os cenários a correlação de *pearson* que se mostrou com maior combinação foi a vazão específica com a permeabilidade da fundação com $R=0,35$.

Para a formação de origem de rocha *ígneas plutônicas*, o resultado de *esperança matemática* foi de uma vazão específica de $2,2 \text{ l/min/m}$, para este resultado a amostragem total é de apenas 5 barragens das 133 catalogadas, indicando que **60%** desta amostragem apresenta vazões até 1 l/min/m com média de $0,6 \text{ l/min/m}$. Foram apresentados os resultados de estatística descritiva para a formação de origem de rocha *ígneas plutônica*, nesta amostragem observa-se uma variação de vazão de $0,3 \text{ a } 6,6 \text{ l/min/m}$ com dados de dispersão de desvio padrão de $2,6 \text{ l/min/m}$.

Para a formação de origem de rochas *ígneas vulcânicas*, o resultado de *esperança matemática* foi de uma vazão específica de $1,7 \text{ l/min/m}$, para este resultado a amostragem total é de 58 barragens das 133 catalogadas, indicando que **52%** desta amostragem apresenta vazões até 1 l/min/m com média de $0,4 \text{ l/min/m}$. Foram apresentados os resultados de estatística descritiva para a formação de origem de rochas *ígneas vulcânica*, nesta amostragem observa-se uma variação de vazão de $0,0 \text{ a } 12,8 \text{ l/min/m}$ com dados de dispersão de desvio padrão de $2,5 \text{ l/min/m}$.

Para a formação de origem de rocha *metamórfica*, o resultado de *esperança matemática* foi de uma vazão específica de $2,4 \text{ l/min/m}$, para este resultado a amostragem total é de 63 barragens das 133 catalogadas, indicando que **40%** desta amostragem apresenta vazões até 1 l/min/m com média de $0,4 \text{ l/min/m}$. Foram apresentados os resultados de estatística descritiva para a formação de origem de rocha *metamórfica*, nesta amostragem observa-se uma variação de vazão de $0,0 \text{ a } 9,1 \text{ l/min/m}$ com dados de dispersão de desvio padrão de $2,4 \text{ l/min/m}$.

Para a formação de origem de rochas *sedimentares clásticas*, o resultado de *esperança matemática* foi de uma vazão específica de $3,7 \text{ l/min/m}$, para este resultado a amostragem total é de 7 barragens das 133 catalogadas, indicando que **43%** desta amostragem apresenta vazões superiores a 5 l/min/m com média de $8,5 \text{ l/min/m}$. Foram apresentados os resultados de estatística descritiva para a formação de origem de rochas *sedimentares clásticas*, nesta amostragem observa-se uma variação de vazão de $0,0 \text{ a } 9,9 \text{ l/min/m}$ com dados de dispersão de desvio padrão de $3,9 \text{ l/min/m}$.

No estudo, utilizando a ferramenta estatística de *regressão linear múltipla* como resultado obteve-se a *equação (14)* que poderá auxiliar de forma simplificada estimar vazões em barragens a partir da altura máxima da barragem e a permeabilidade da fundação.

Referente a *distribuição normal (gaussiana) para fundação* com formação de origem de rochas *ígneas plutônicas* a probabilidade (*p*) de ocorrência para vazão específica numa faixa entre $1 \text{ a } 5 \text{ l/min/m}$ é de **54%**.

Referente a distribuição normal (gaussiana) para fundação com formação de origem de rochas *ígneas vulcânicas* a probabilidade (p) de ocorrência para vazão específica numa faixa entre **1 a 5 l/min/m** é de **52%**.

Referente a distribuição normal (gaussiana) para fundação com formação de origem de rochas *metamórficas* a probabilidade (p) de ocorrência para vazão específica numa faixa entre **1 a 5 l/min/m** é de **58%**.

Referente a distribuição normal (gaussiana) para fundação com formação de origem de rochas *sedimentares clásticas* a probabilidade (p) de ocorrência para vazão específica numa faixa entre **1 a 5 l/min/m** é de **36%**.

Adicionalmente, observando *histograma e frequência* da curva de distribuição normal de todas as 133 barragens, construídos no software *past4*, é possível observar que há uma frequência de **60%** com uma faixa de confiança (95%) entre 9,6% inferior e 13,8% superior, indicando um intervalo de vazão específica entre **0,0 a 1,2 l/min/m**.

Por fim, o histograma de barras é bem representativo e demonstra que a distribuição normal não se ajusta bem em função da dispersão e simetria dos dados.

5.1.3 Valores de Controle

Referente a definição de *valores de controle*, foram calculados em função dos dados de vazões observadas e analisadas das 133 barragens, primeiramente utilizou-se a ferramenta estatística (regressão múltipla linear) para estimativa de valores esperados de referência, num segundo momento calculou-se função dos percentis adotados em 75%, 85% e 95% valores de controle respectivamente adotando-se como valores de atenção, alerta e emergência padronizando com a nomenclatura atualmente utilizada em revisões periódicas de segurança de barragem.

Estes valores representam barragens do tipo homogênea e terra e enrocamento, estes valores não podem ser utilizados como parâmetro de controle para outros tipos de barragem.

No entanto, os valores observados nesta pesquisa devem ser tomados apenas como referência com intuito de auxiliar na investigação, monitoramento e interpretação do comportamento da estrutura.

Os valores de controle estabelecidos nesta pesquisa, devem ser empregados com limites de um instrumento de medição de vazão, e não devem ser considera um valor de alerta de toda barragem, importante considerar que uma avaliação mais abrangente deve ser conduzida observando leituras de outros instrumentos adjacentes, bem como também inspeções de rotina em campo.

Nenhuma destas 133 barragens apresentaram incidentes significativos que pudessem colocar a estrutura em condição de emergência, algumas estruturas apenas, tiveram como medida preventiva a execução de filtros invertidos.

A observação de valores de vazão superiores à referência estabelecida em projeto ou revisão periódica não indicam necessariamente que a estrutura possa estar correndo algum risco, no entanto, se somado a valores excedentes de vazão, os piezômetros apresentem valores fora do intervalo normal e ainda nos medidores de vazão sejam observadas partículas em suspensão na água, pode-se estar ocorrendo um forte sinal de erosão regressiva.

Tendo como as melhores práticas na engenharia geotécnica dentro da revisão periódica de segurança de barragens, é recomendável quando se trata de dados históricos, que este sempre sejam atualizados e os estudos retroalimentados de modo a consolidar ao longo do tempo. A seguir algumas recomendações importantes:

- Analisar os dados de séries temporal disponíveis para o período de 5 anos;
- Calcular os níveis de referência para o período de 5 anos;
- Comparar os níveis de referência calculados com os níveis de referência anteriores;
- Se houver diferenças significativas entre os níveis de referência, ajustar os níveis de referência para refletir as mudanças na série temporal.

5.2 SUGESTÕES

Com intuito de enriquecer ainda o tema abordado nesta pesquisa, a seguir algumas sugestões para elaboração estudos futuros:

- - Correlacionar vazões específicas com outras variáveis não apresentadas neste trabalho, como, por exemplo, o volume do reservatório das barragens, inclinação do talude do espaldar de jusante, gradiente hidráulico medido na fundação e outras variáveis geométricas e empíricas que possam responder relações matemáticas e estatísticas.
- - Ampliar este estudo com um número ainda maior de barragens de terra e enrocamento.
- - Reavaliar os resultados separando por tipo de barragem (homogêneas *versus* terra e enrocamento).
- - Estender a avaliação de vazão específica a barragens de mineração de armazenamento de rejeitos.

- - Estudar a influência de diferentes tipos de impermeabilização na fundação na vazão específica das barragens.
- - Além disso, sugere-se a realização de simulações numéricas para avaliar o comportamento de vazões específicas em diferentes condições de operação.

REFERÊNCIAS

ABINT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS TECIDOS TÉCNICOS. Comitê Técnico Geotêxtil (CTG), **Curso Básico de Geotêxteis**; 2001.

ABMS ABGE e CBMR, **Simpósio sobre a geotecnia da bacia do alto paraná, São Paulo, 1983.**

AESABESP, 29 Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, **Plano de Manuteno e Segurança de Barragens – RMSP**, Fenasan, IFAT, São Paulo, 2018.

ALONSO, U. R. **Rebaixamento temporário de aquíferos - 2a. Edio**, São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Diretrizes para a elaborao do plano de operao, manuteno e instrumentao de barragens**. Brasília, 2016.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Diretrizes para elaborao de projetos de Barragens**. Brasília, 2016.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DO ÁGUAS. **Guia Prático de Pequenas Barragens**. Brasília, 2016.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DO ÁGUAS. **Guia de Orientao e Formulários para Inspeoes de Segurança de Barragem**. Brasília, 2016.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DO ÁGUAS. **Revisão de Boas Práticas de Segurança de Barragens de Pequena Dimensão**. Brasília, 2012.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Curso de segurança de barragens**, Brasília, 2016.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens 2018**. Brasília, 2019.

ARAÚJO M.C.N, SOUZA JÚNIOR T.F, TREVIZOLLI M.N.B, TEIXEIRA C.A, TEIXEIRA S.H.C e FARO V.P. **A Method for Designing Finger Drains and Assessing Phreatic Lines for Dams**. Department of Civil Construction Engineering, Federal University of Paraná, Curitiba, 2018.

ARAUJO, A. A. F. **Estudo teórico e experimental da segurança de filtros de barragens de terra à erosão interna**. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. 150p.

ARAUJO, M.C.N. **Estudo de equivalência entre drenos franceses e tapetes drenantes em barragens de terra**. Dissertação de Mestrado, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. 252p.

ASSIS, A. P. **Apostila de Barragens. Disciplina do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília**. ENC/FT, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2003.

ASTM, **Métodos de Teste para Partículas e Matéria Dissolvida na Água**, nº ASTM-D 1888-67, Edição 1978.

AYRES, Aurora. **Lições de Mariana**, Volume 20. Infosustentabilidade, Revista Seguro Total, 2016. Disponível em: <<http://www.fenacor.org.br/premiodejornalismo/conteudo/materias/1207/0touc3hw.pwp.pdf>>. Acesso em 26/03/2020.

BAZZAN, J. **Método para coletar e analisar dados de assistência técnica da construção civil**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

BERIGO, E. A. **Comportamento Filtro-Drenante de Geotêxteis em Barragens de Rejeito de Mineração**. UNB – Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil, Distrito Federal, 2005.

BITTENCOURT, Radke Hélio. **Estatística aplicada à Engenharia** – Curso de Especialização em Engenharia de Processos e de Sistemas de Produção – PUC/RS - Abril/2014.

BRK, AMBIENTAL. **A importância das barragens para a sociedade e a comunidade no entorno**, Maio/2020. Disponível em: < <https://blog.brkambiental.com.br/importancia-das-barragens/>>. Acesso em 14/03/2020.

BUREAU OF RECLAMATION, **Design Standards, No. 13 – Embankment Dams, Chapter 5 – Protective Filters**. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver (2011).

BUREAU OF RECLAMATION, **Embankment Dam Instrumentation Manual**. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver (1987).

BUREAU OF RECLAMATION, **Manual de irrigação - Avaliação de pequenas barragens**, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Brasília (2002).

BUREAU OF RECLAMATION. **Design Standard No 13, Protective filters**, Denver, 2004.

CAMPOS, R. et al. **Parâmetros de brecha em rupturas de barragens em cascata utilizando modelagens física, empírica e numérica**. RBRH [online]. 2020, vol.25, e30. Epub May 18, 2020. ISSN 2318-0331. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190109>.

CARIM, A. L. C.; DIAS G. G.; CRUZ, J. F.; FUSARO, T. C. Piau dam – **biological clogging of the drainage of the downstream toe**. Workshop on Dam safety problem and solutions-sharing experience. In: ICOLD MEETING, 72., Seul, Coreia, 2004.

CBGB – COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. **Auscultação e instrumentação de barragens no Brasil – Volume I**. Belo Horizonte, 1996.

CBM – COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS – **Barragens e Desenvolvimento: Um novo modelo para tomada de decisões – Um sumário**. Novembro, 2020.

COHEN, Jacob. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale, NJ, Erlbaum. 1988.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ PAULO. T., et al. **100 Barragens Brasileiras Casos Históricos Materiais de Construção Projeto**, 2a edição, São Paulo; Oficina de Textos, 2004.

CRUZ PAULO. T., et al. **Flow of water through dams and foundations**, Second International Dam Word Conference, Lisbon - Portugal; 2015.

DAMASIO, Bruno; **O que é Regressão Linear Múltipla?** Psicométricaonline, [201-]. Disponível em: <https://psicometriaonline.com.br/o-que-e-regressao-linear-multipla>, Acesso em 02/02/2023.

DAMASIO, Bruno. **O que é Correlação de Pearson?** [202-]. Disponível em: <https://psicometriaonline.com.br/o-que-e-correlacao-de-pearson>, Acesso em 01/02/2023.

DANCEY, Christine & REIDY, John., **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre, Artmed, 2006.

DE MELLO, F. B.. **Some lessons learned from unsuspected, real and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil**. In: 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. II, 1975, Durban, S. Africa. Anais... Durban, 1975, p. 285- 304.

DRIP - DAM REHABILITATION & IMPROVEMENT PROJECT. **Guidelines for Instrumentation of Large Dams**. – Central Water Commission - Dam Safety Rehabilitation Directorate - Ministry of Water Resources, River Development & Ganga Rejuvenation Government of India. India, January 2018. Doc. No. CDSO_GUD_DS_02_v1.0

ELETROBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: RJ, 2015. 80 p.

FELL ROBIN et. Al. **Geotechnical Engineering off Dams**. Taylor & Francis Group plc. London, UK, 2005. ISBN 04 1536 440 x

FELL, R., E FRY, J.-J. **The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations**, In **Internal erosion of dams and their foundations**, Taylor and Francis, Aussois (France), 2007.

FEMA - FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY - Interagency committee on Dam Safety (ICODS). **Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion**. Oklahoma, 2015.

FERREIRA, J. Antunes, **Critérios para definição de valores de controle para piezômetros e medidores de vazão em barragens de aterro**. Revista Brasileira de Engenharia de Barragens – Comitê Brasileiro de Barragens – Ano VIII nº 13 – CIGB – ICOLD – CBDB, Florianópolis, 2022.

FERREIRA, R. **Dimensionamento de filtros**. Goiânia: Puc - Goiás, [201-]. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_4.pdf

FERREIRA, R. **Transições**. Goiânia: Puc - Goiás, [201-]. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_5.pdf, Acesso em 21/01/2023.

FOSTER, M., e FELL, R. **Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001. 127(5): 398-407.

FREITAS, R.; ALMEIDA, F. **Um ano após tragédia da Vale dor e luta por justiça unem famílias de 259 mortos e 11 desaparecidos**. G1 Notícias, Brumadinho, 25/01/2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/25/um-ano-apos-tragedia-da-vale-dor-e-luta-por-justica-unem-familias-de-259-mortos-e-11-desaparecidos.ghtml>. Acesso em 14/03/2021.

FREITAS, T. M. **Investigação dos efeitos do fluxo na zona de percolação de um maciço de barragem homogênea de terra: análises em modelos reduzidos**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia /Vitória da Conquista / BA, 2019. 75 f.

GAIOTO, N. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento**. São Carlos - SP, 2003. EESC-USP. NLM.

GERHARDT, T, E; e SILVEIRA D, T; **Métodos de pesquisa**, Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GOUVEIA G.; ALMEIDA L.; NEIVA F.; CELLA P. **Modelamento geomecânico 3d utilizando software leapfrog geo®**, 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Belo Horizonte, 2015.

GUIMARÃES, Paulo Ricardo Bittencourt. **Métodos Quantitativos Estatísticos**. Curitiba, IESDE Brasil S.A., 2008.

HONJO, Y; VENEZIANO, D. **Improved filter criterion for cohesionless soils**. *Journal of Geotechnical Engineering* - ASCE, v. 115, n. 1, p. 75-94, 1989.

HUMES, C.. **Um Novo Enfoque para a Determinação da Curva de Vazios de Filtros Granulares**. 1998. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, 1998. Anais... Brasília: COBRAMSEG, v. II, 1998, p. 983-991.

ICOLD - BULLETIN 154: **Dam safety management: operational phase of the dam life cycle**. International Commission on Large Dams, Paris, 2017.

ICOLD - BULLETIN 158: **Dam surveillance guide: guide de la surveillance des barrages**. International Commission on Large Dams, Paris, 2003.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The energy progress report 2020**. Tracking SDG 7 – Washington DC, 2020.

INDRARATNA, B.; ISRAR, J.; RUJIKIATKAMJORN, C. **Geometrical Method for Evaluating the Internal Instability of Granular Filters Based on Constriction Size Distribution**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* - ASCE, v. 141, n. 10, 2015.

INTERTECHNE, DUARTE J. M. G, CALCINA A. M. e GALVÁN V. R. **Instrumentação geotécnica de obras hidrelétricas brasileiras: alguns casos práticos atuais**, Curitiba, Brasil, 2006.

INTERTECHNE. **Consulta a Acervo e Relatórios relacionados a Instrumentação e Revisão Periódica de Segurança de Barragens**, Curitiba, Brasil, 2022.

JULIANO, F.K.; CARDIA, R.J.R.; LOPES, W.P. **Aproveitamento múltiplo Mogi-Guaçu: Valores de referência para piezômetros**. In: 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE, 13 a 16 de novembro de 2005, Florianópolis, SC.

KANJI, M. A.; FIGUEIRA, P. C. DA S. “**Quantificação tentativa do uso de instrumentação em barragens**”, Rio de Janeiro, Simpósio sobre Instrumentação Geotécnica de Campo – SINGEO’90”, ABMS, Rio de Janeiro, pp. 119-128, 1990.

KENNEY, T.C., e LAU, D. **Internal stability of granular filters**, Canadian Geotechnical Journal, 1985. 22: 215-225.

KENNEY, T.C., e LAU, D. **Internal stability of granular filters: Reply**, Canadian Geotechnical Journal, 1986. 23: 420-423.

LADEIRA, Josias Eduardo Rossi. **Avaliação De Segurança Em Barragem De Terra, Sob O Cenário De Erosão Tubular Regressiva, Por Métodos Probabilísticos: O Caso UHE São Simão**. 2007.

LAFLEUR, J; MLYNAREK, J.; ROLLIN, A. L. **Filtration of broadly graded cohesionless soils**. Journal of Geotechnical Engineering - ASCE, v. 115, n. 12, p. 1747-1768, 1989.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics, SI Version. Series in soil engineering**. Massachusetts Institute of Technology, 1979.

LI, M.. **Seepage induced instability in widely graded soils**. 2008. 300 f. PhD thesis. The Faculty of Graduate Studies, Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, 2008.

LIMA, Roberval, **Estatística Descritiva aplicada à Engenharia**, 2016, Disponível em: https://studio-pubs-static.s3.amazonaws.com/152865_d62c883749ed4340948f515bbce60d93.html, Acesso em 02/02/2023.

LUTTI, Eduardo Ismael. **Crise de abastecimento era uma tragédia anunciada**. São Paulo, 2014.

LOCKE, M.; INDRARATNA, B.; ADIKARI, G.. **Time-dependent particle transport through granular filters**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE, v. 127, n. 6, p. 521-529, 2001.

MACHADO, Willian Gladstone de Freitas. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração** / W.F.G. Machado. – São Paulo, 2007. 155 p.

MARANHA DAS NEVES, E. **Comportamento de barragens de terra enrocamento**, PhD, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia (UNL - FCT), Lisboa, 1991. 371.

MASSAD, F. **Obras de terra - 2a. Edição, com exercícios resolvidos**. 2. Ed. São paulo: oficina de textos, 2010. V. 1. 216p .

MAXWELL. **Instrumentação de barragens** - PUC-Rio - Certificação Digital N° 0221066/CA, [202-]. - Disponível em: < https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/6368/6368_4.PDF>. Acesso em 21/01/2023.

MAXWELL. **Instrumentação e segurança de barragens** - PUC-Rio - Certificação Digital N° 0124945/CA, [202-]. - Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4244/4244_3.PDF . Acesso em 11/07/2022.

MELLO PORTO, R. **Hidráulica Básica**. 2ª Edição – Publicação EESC USP. Brasil. (2001).

MELO, D. C. S. **Manutenção e Reabilitação em Poços Tubulares – A Experiência da Copasa em MG**. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2011.

MENDONÇA, M. B. **Notas de aula da disciplina Obras de Terra**. Rio de Janeiro, 2012.

MENSAH, J.H.R et. al, **Estimativa preliminar de potencial hidrelétrico de rios**, fevereiro/2017, Edição n° 514. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/em/materia/2017/02/17/estimativa_preliminar.html>, Acesso em 20/03/2021.

MOFFAT, R.. **A laboratory study of particle migration in cohesionless soils**. 2002. 119 p. Master thesis. The Faculty of Graduate Studies, Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, 2002.

MOFFAT, R.. **Experiments on the internal stability of widely graded cohesionless soils**. 2005. 279 p. PhD thesis. The Faculty of Graduate Studies, Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, 2005.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5a Edição; Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MUSKAT, M. **The flow of homogeneous fluids through porous media**. Mc-Graw-Hill Book Company, Michigan, 1937.

MUSSO, A.; FEDERICO, F.. **Un método geométrico-probabilístico per la verifica dei filtri**.. *Rivista Italiana di Geotecnica*, v. XVII, n. 4, p. 177-193, 1983.

OKEKE, AC, F. WANG, T. SONOYAMA e Y. MITANI. **Experimentos de laboratório sobre rompimento de barragem de deslizamento devido a tubulação**: Uma avaliação de deslizamento de terra induzido por tufão e barragem de deslizamento de terra em 2011 no oeste do Japão. In *Progress of Geo-Disaster Mitigation Technology in Asia* , ed. FW Wang, M. Miyajima, T. Li, S. Wei e TF Fathani, 525–545. Berlin Heidelberg: Springer, 2013.

PARK, Y., BRANDON, T.L., E DUNCAN, J.M. "**Filter performance test for embankment dams containing cracks**", *Proc., 22nd ICOLD Congress on Large Dams, Barcelona, Spain, 18-23 June, International Commission on Large Dams, Vol.3, 2006*. pp. 307-317.

RAUL FLORES et al, **Geotechnical Engineering Applied on Earth and Rock-Fill Dams**, March 2019, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.84899>

RAUT, A. K.; INDRARATNA, B.. **Further Advancement in Filtration Criteria through Constriction-Based Techniques**..Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE, v. 134, n. 6, p. 883-887, 2008.

RAUT, A. K.. **Mathematical modelling of granular filters and constriction-based filter design criteria**. 229 f. PhD thesis. Department of Civil Engineering, University of Wollongong, Wollongong, 2006.

REIS, Marcelo. Menezes; **Estatística** – Aula 06 – UFSC – Depto. de Informática e Estatística, [202-]. Disponível em: <https://www.inf.ufsc.br/~marcelo.menezes.reis/AED05.pdf>, Acesso em 01/02/2023.

RÖNNQVIST, H.; VIKLANDER, P.. **On the Kenney-Lau approach to internal stability evaluation of soils**. *Geomaterials*, n. 4, p. 129-140, 2014.

FILHO, Julio de Mesquita; **Estatística e Bioestatística** – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Vertinárias, São Paulo, 2019.

SANDRONI, S. S. **Barragens de Terra e Enrocamento**, Oficina de Textos, São Paulo, 2021.

SANTOS, R. E CALDEIRA, L. **Influência da compactação na erodibilidade de um solo parcialmente saturado sujeito a uma fuga concentrada**. *Geotecnia* n° 125, julho, 2012.

SANTOS, R. E CALDEIRA, L. **Processos de erosão interna em barragens de aterro e suas fundações**. Lisboa, Portugal, 2008.

SAYÃO, A. **Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento**. Rio de Janeiro, 2009.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P. **Critical filters for impervious soils**. *Journal of Geotechnical Engineering - ASCE*, v. 115, n. 7, p. 927-947, 1989.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R.. **Basic properties of sand and gravel filters**. *Journal of Geotechnical Engineering* – ASCE, v. 110, n. 6, p. 684-700, 1984a.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R. **Filters for silts and clays**. *Journal of Geotechnical Engineering* – ASCE, v. 110, n. 6, p. 701-718, 1984b.

SHERARD, J.L. **Embankment Dam Cracking**. In: Hirschfeld, R.C. e Poulos, S.J., Eds., *Embankment-Dam Engineering (Casagrande Volume)*, John Wiley, Nova York, 1973. 324-328.

SHERARD, J.L., e DUNNIGAN, L.P. **Critical filters for impervious soils**, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1989. 115(7): 927-947.

SILVA, D. S; **Estudo de Filtro Aplicado ao Controle de Erosão Interna em Barragens**. Ouro Preto, 2016.

SILVEIRA, A.. **An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters**. In: 6th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 2, 1965, Montreal, Canada. *Anais... Montreal: ICSMFE*, 1965, p. 551-555.

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

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

SILVEIRA, J.F.A.. **Experiência na Operação de Limpeza de Drenos de Fundação em Três Barragens em CCR"**. XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens – CBDB, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017.

SILVEIRA, J.F.A.. **Teria sido possível evitar a ruptura da Barragem de Teton através de um bom plano de instrumentação?** *Revista Brasileira de Engenharia de Barragens - Instrumentação | CBDB Comitê Brasileiro de Barragens - País / Edição: Brasil / 2014*.

SILVEIRA, N. C. B. Et al. **Execução de um dreno de pé para contenção de surgência de água – Anomalia detectada em uma barragem de terra em Maiquinique – BA.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 11, Vol. 15, pp. 71-94. novembro de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso:<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/execução>

SMIDERLE, C. S. D. **Segurança De Barragens: Análise Da Instrumentação Da Barragem De Itaúba.** 2014.

SOUSA, L. N. **Avaliação Do Comportamento Da Fundação De Barragem Em Rocha Arenítica: Estudo De Caso Da Barragem Jaburu I.** 2014.

SOUSA, Lucrecia Nogueira de. **Avaliação Do Comportamento Da Fundação De Barragem Em Rocha Arenítica: Estudo De Caso Da Barragem Jaburu I.** 2014.

TERZAGHI, K, PECK R.B e MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice.** 3ª Edição, John Wiley and Sons, Inc., Nova Iorque, 1996.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Engineering and Design - Manual - **General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams**, July 2004 - EM 1110-2-2300

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Engineering and Design - Manual - **Design, construction, and maintenance of relief wells**, Washington, DC 20314-1000, 1992 - EM 1110-2-1914

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Drainage and erosion control - sub-surface drainage facilities for airfields**, In Part XIII, Chapter 2, Engineering Manual, Military Construction, Washington, D.C., 1955.

VAUGHAN, P.R., e SOARES, H.F. **Design of filters for clay cores of dams**, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982. 108(GT1): 17-31.

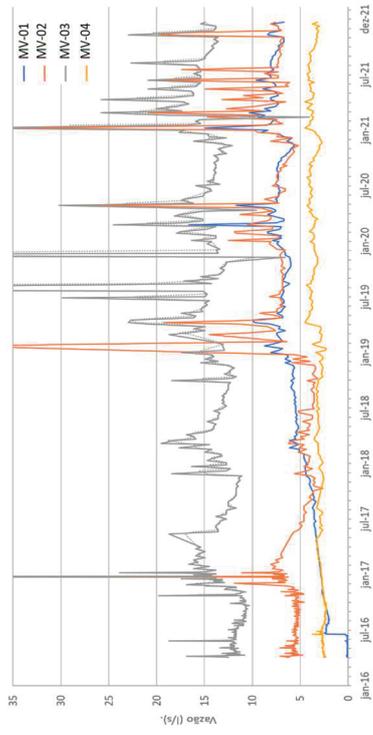
VEIGA PINTO, A. **Barragem de Beliche.** Aterros experimentais e estudo dos filtros. LNEC, 1984. Relatório 240/84 - NF.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Tradutor: Daniel Grassi – 2º ed. – Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZUFFO, M. S. R.. **Metodologia para avaliação da segurança de barragens**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

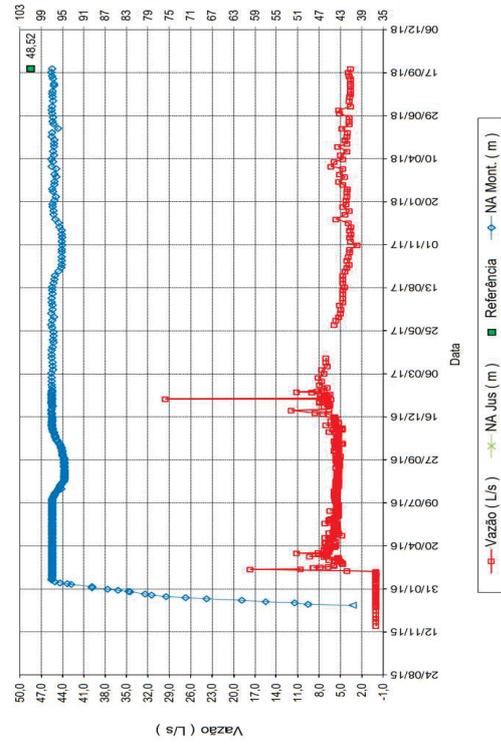
ANEXOS

Vazões da barragem BTE47



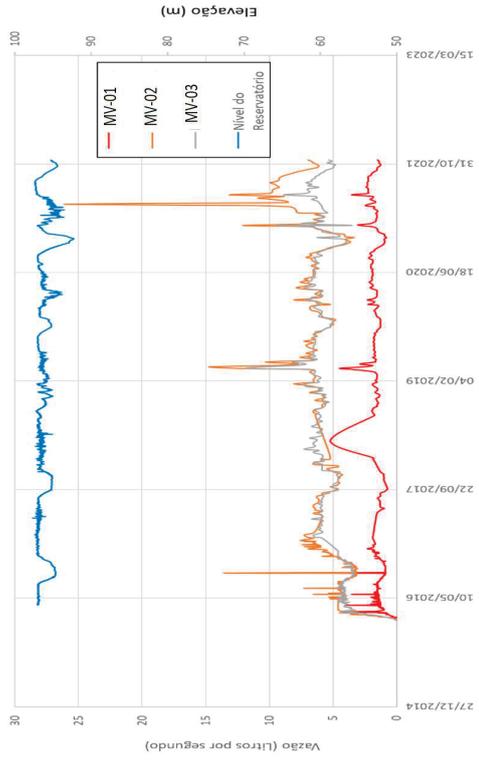
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE48 – MV-01



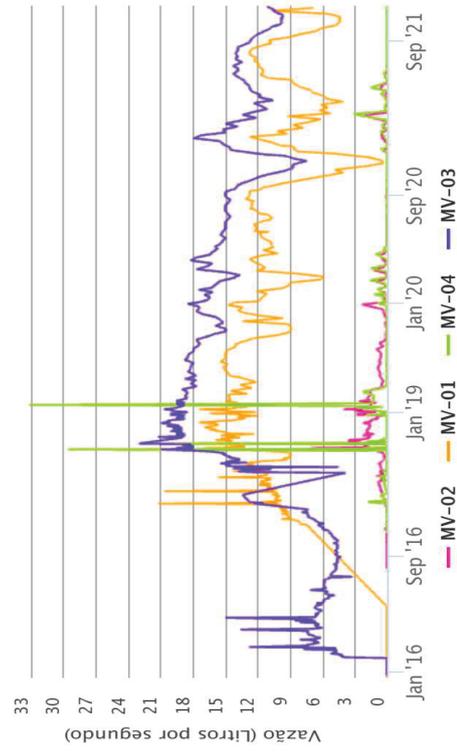
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE52



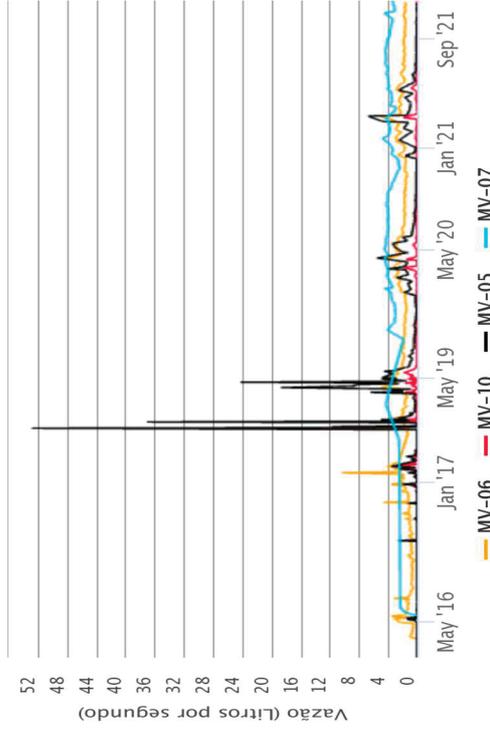
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE55



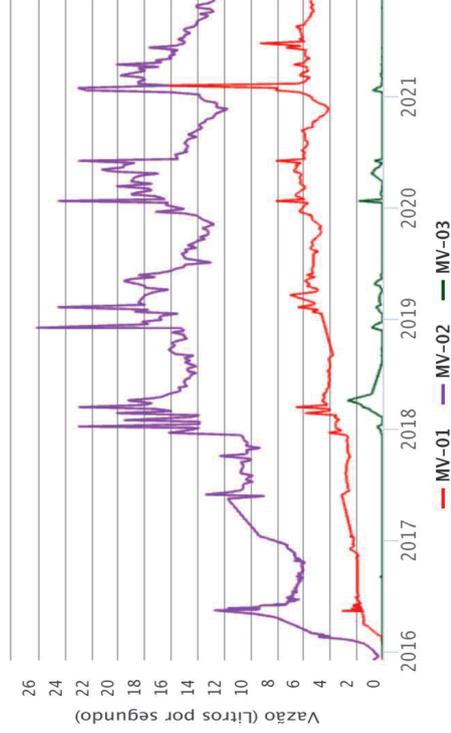
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE55



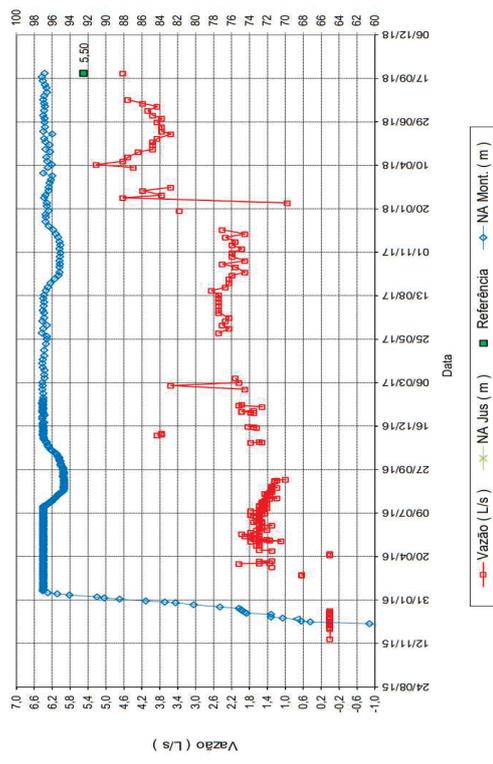
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE58



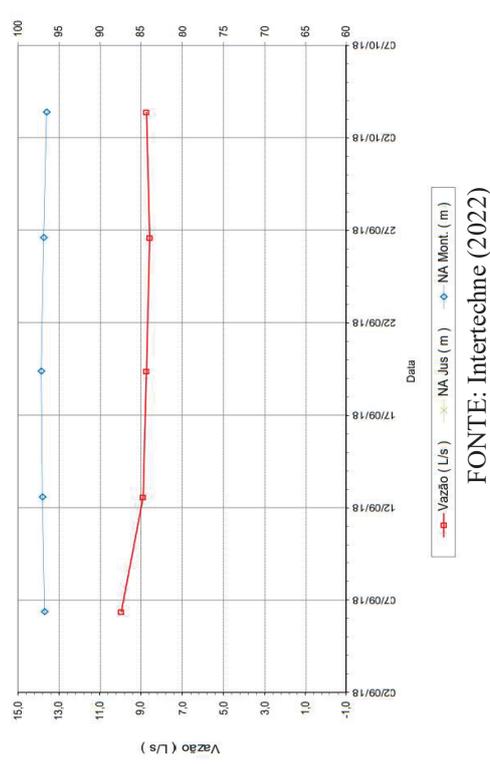
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE59 – MV-03



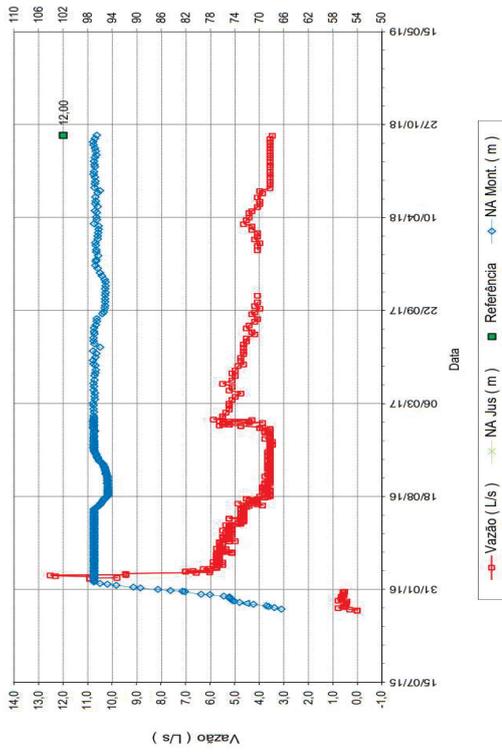
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE63 – MV-06



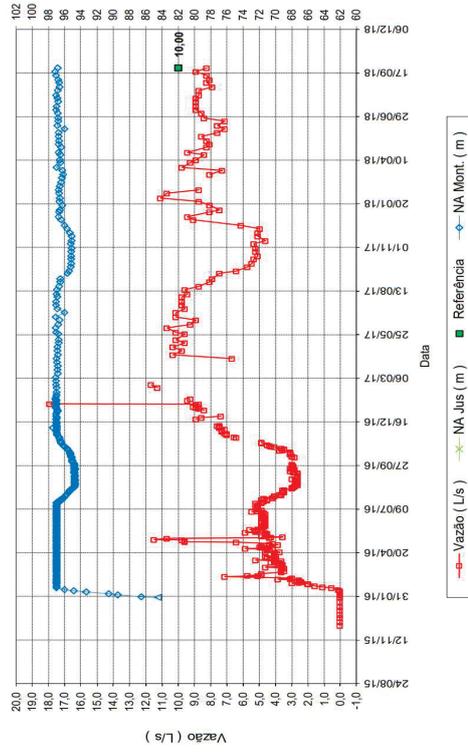
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE63 – MV-07



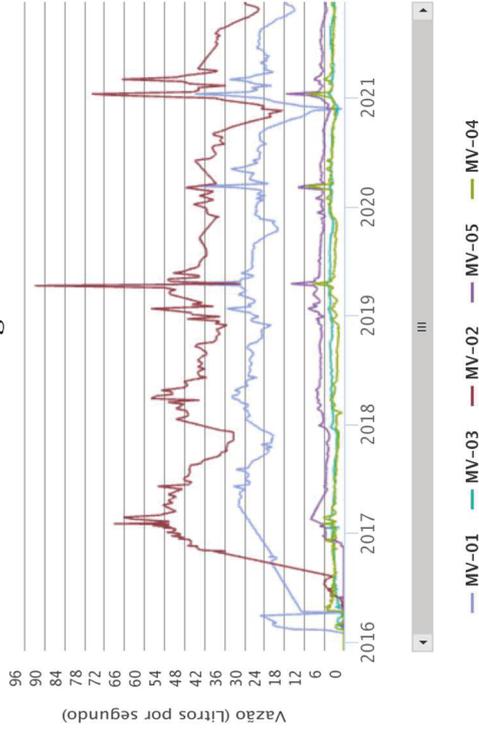
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE67



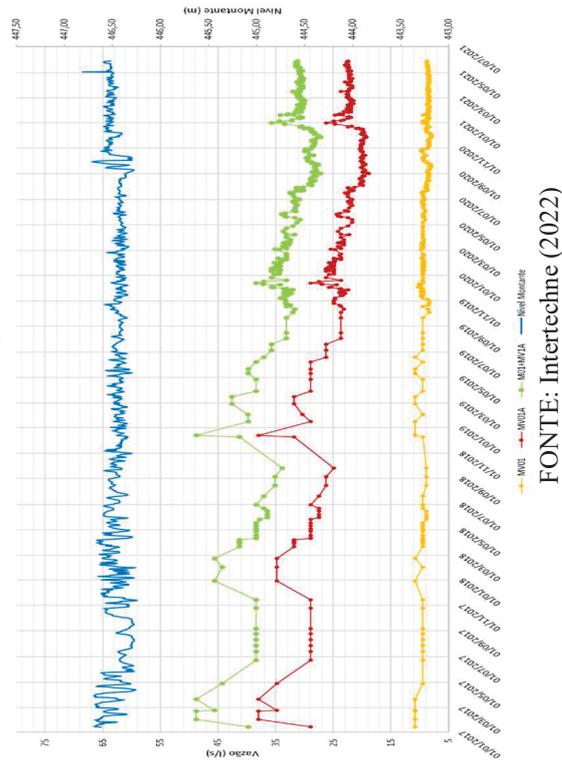
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE68



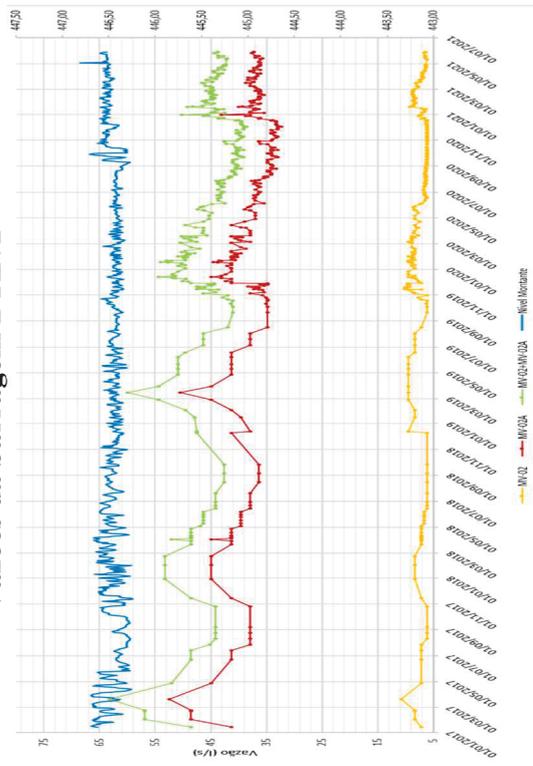
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE71

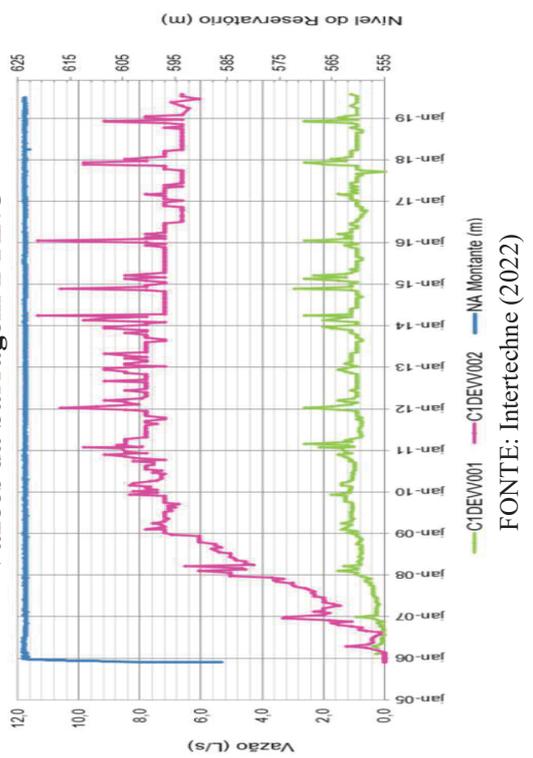


FONTE: Intertechne (2022)

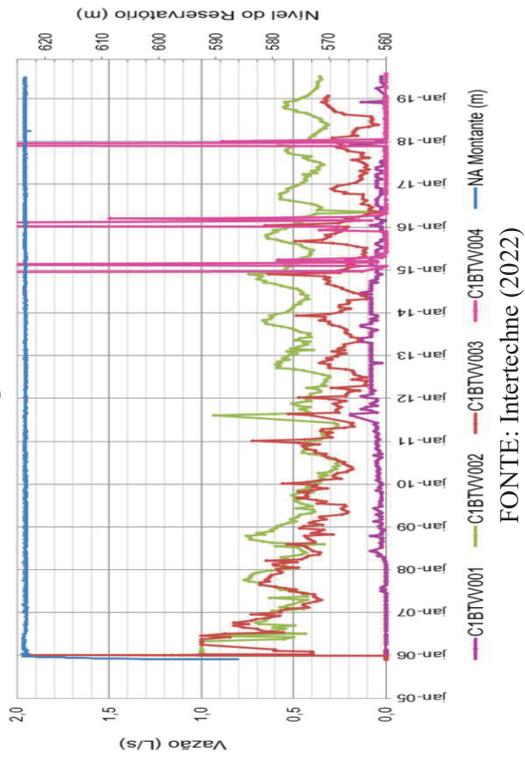
Vazões da barragem BTE72



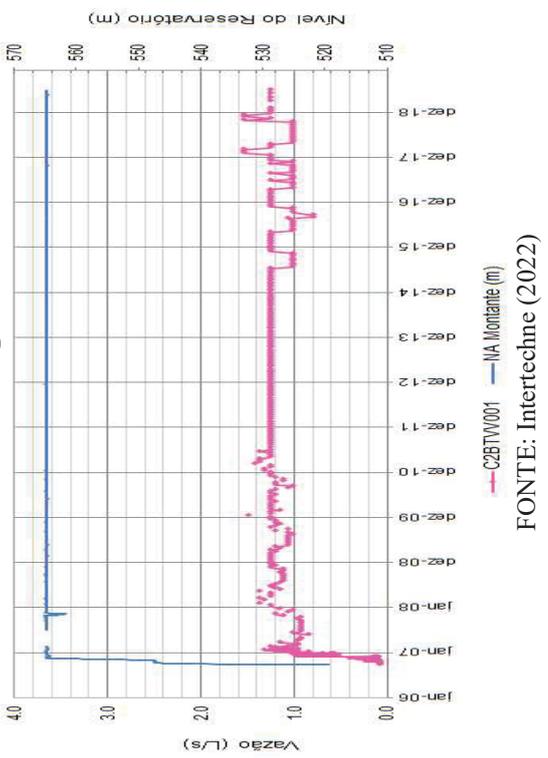
Vazões da barragem BTE75



Vazões das barragens BTE73 e BTE74



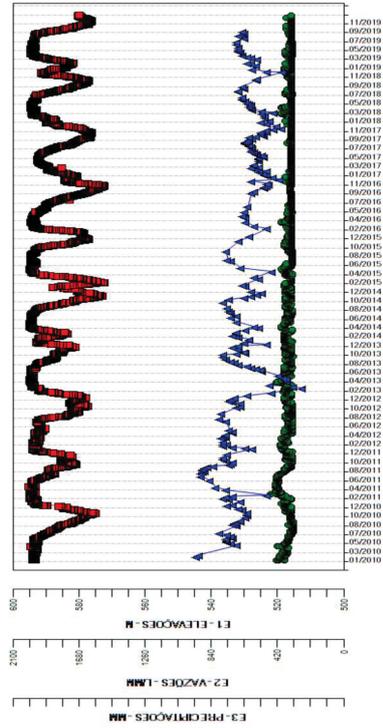
Vazões da barragem BTE76



Vazões da barragem BTE77 – DRD001

■ CORBP23MAN001.M1.E1 ● CORBP23MAN001.M2.E1 ▲ CORBP22DRD001.M2.EZ

Exibir marcadores (Medidas)

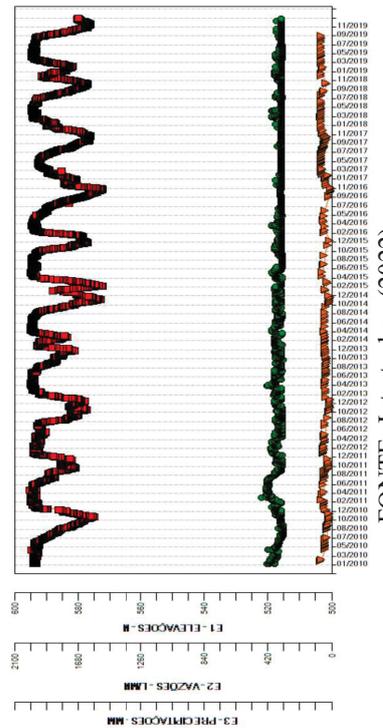


FONTE: Intertecne (2022)

Vazões da barragem BTE77 – DRD002

■ CORBP23MAN001.M1.E1 ● CORBP23MAN001.M2.E1 ▼ CORBP22DRD002.M2.EZ

Exibir marcadores (Medidas)

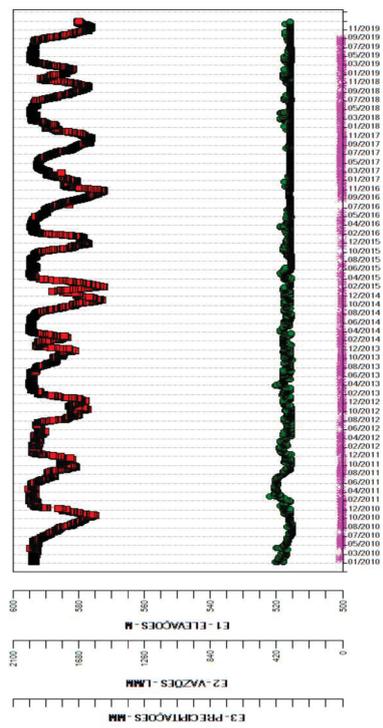


FONTE: Intertecne (2022)

Vazões da barragem BTE77 – DRD003

■ CORBP23MAN001.M1.E1 ● CORBP23MAN001.M2.E1 * CORBP22DRD003.M2.EZ

Exibir marcadores (Medidas)

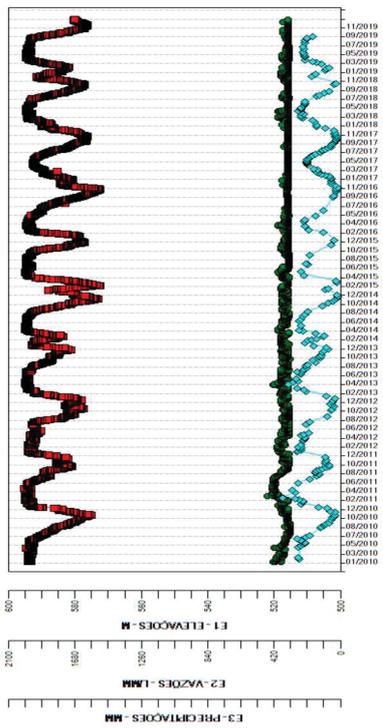


FONTE: Intertecne (2022)

Vazões da barragem BTE77 – DRD004

■ CORBP23MAN001.M1.E1 ● CORBP23MAN001.M2.E1 ◆ CORBP22DRD004.M2.EZ

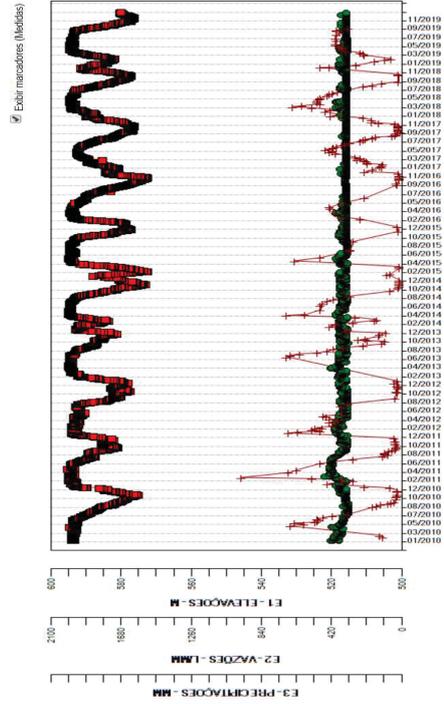
Exibir marcadores (Medidas)



FONTE: Intertecne (2022)

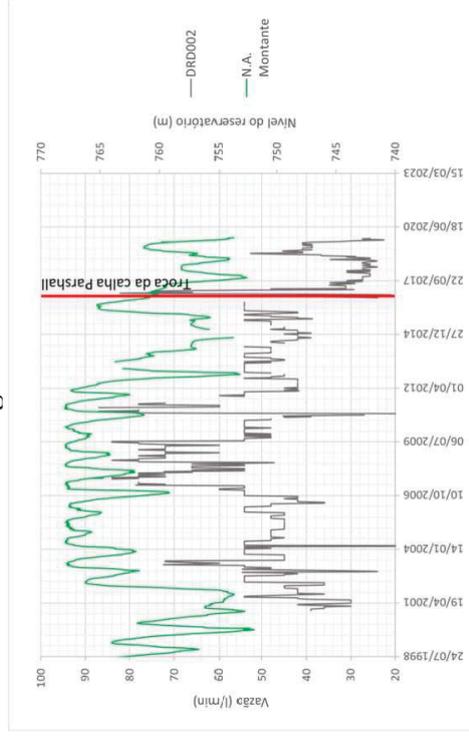
Vazões da barragem BTE77 – DRD005

■ C08P23M001.M1.E1 ● C08P23M001.M2.E1 † C08P23M005.M2.E2



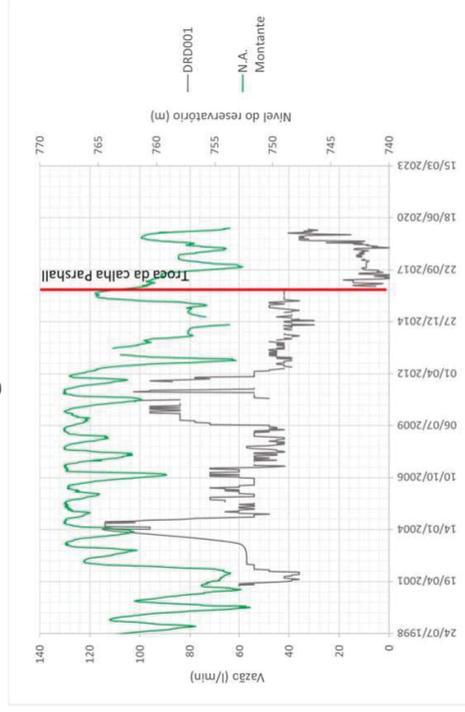
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE78 – DRD002



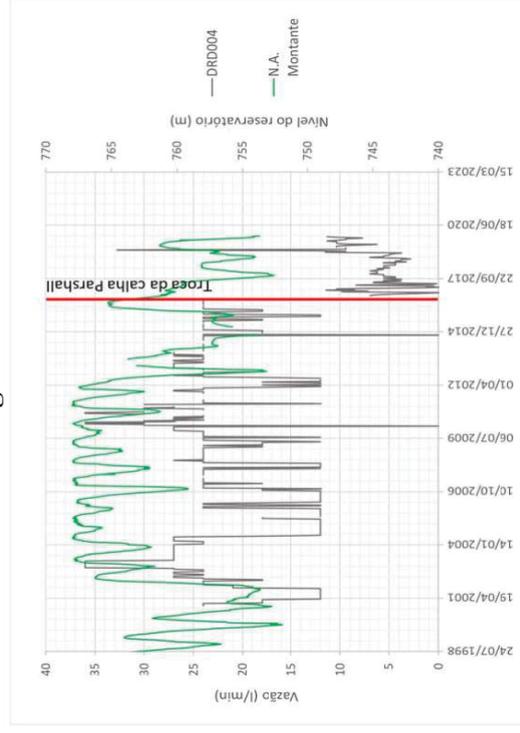
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE78 – DRD001



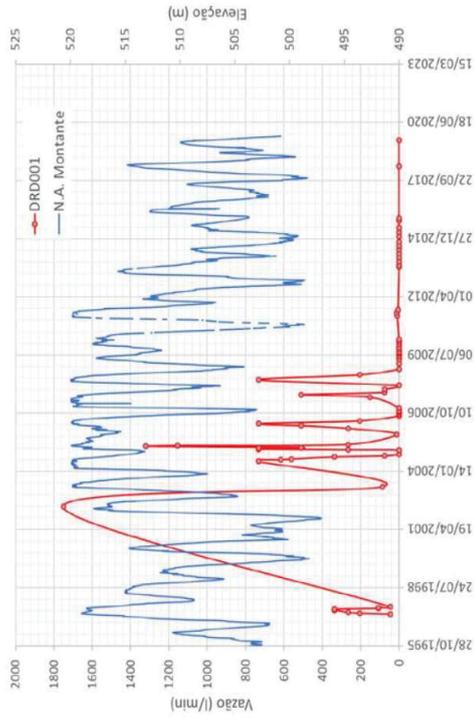
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE78 – DRD004



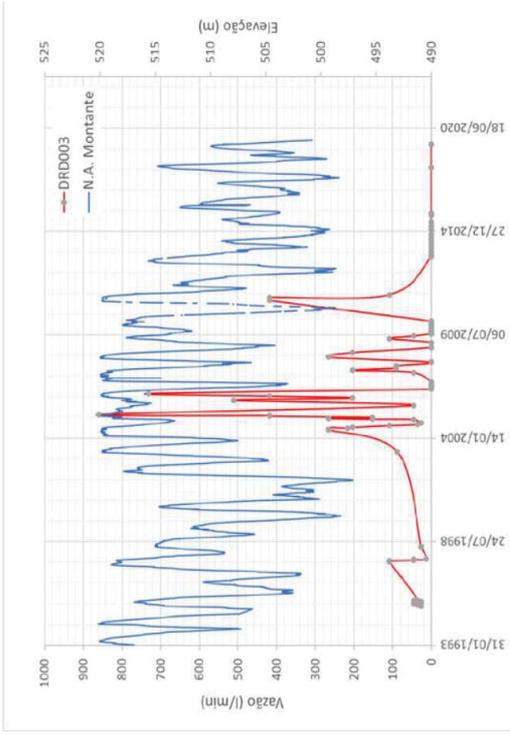
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE79 – DRD001



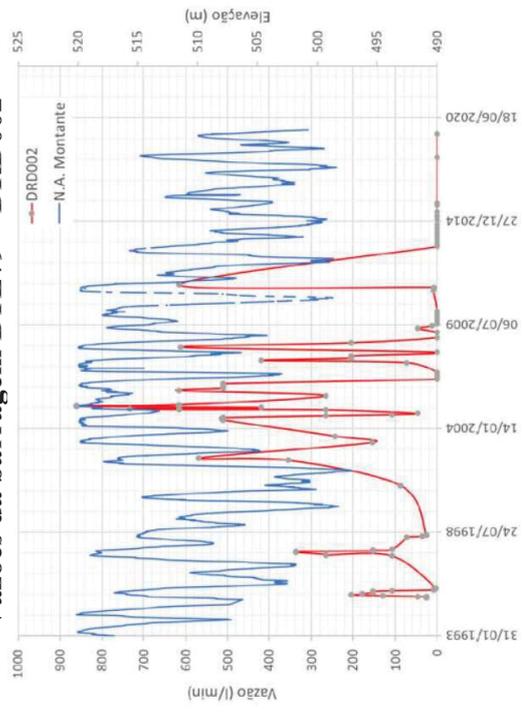
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE79 – DRD003



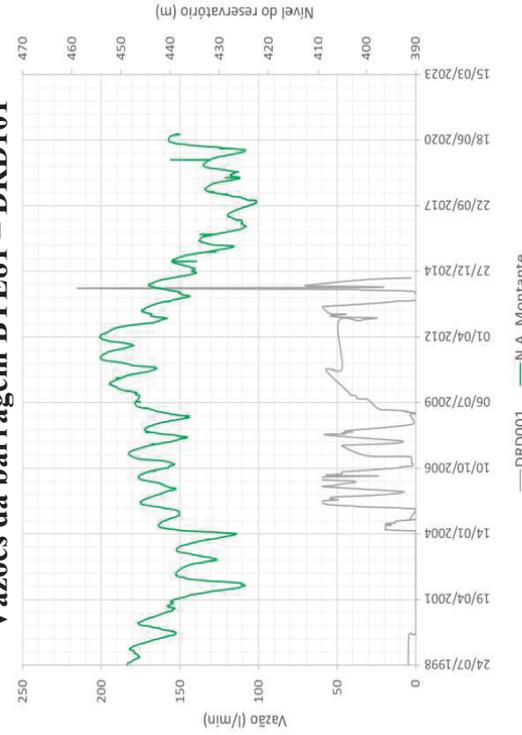
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE79 – DRD002



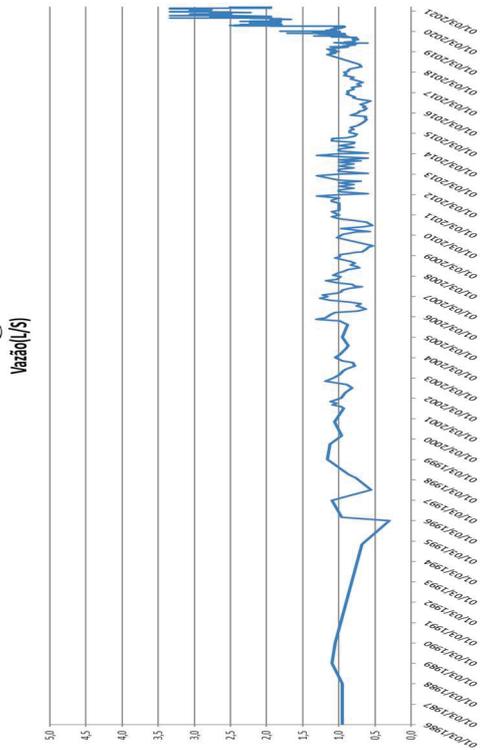
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE81 – DRD101



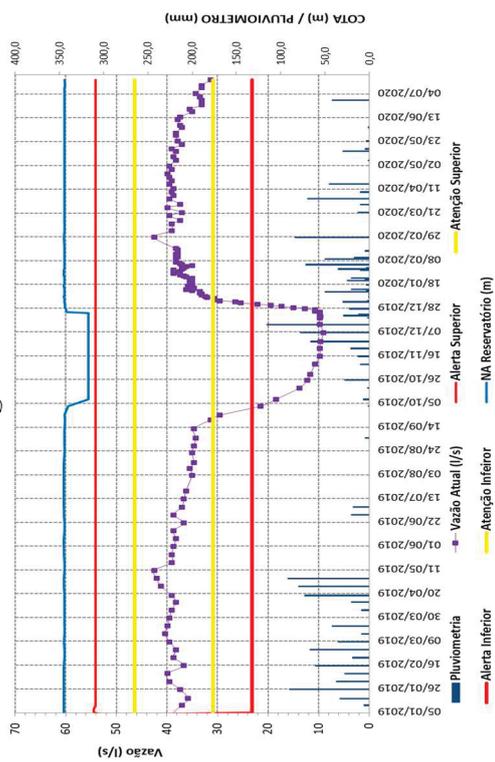
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE82



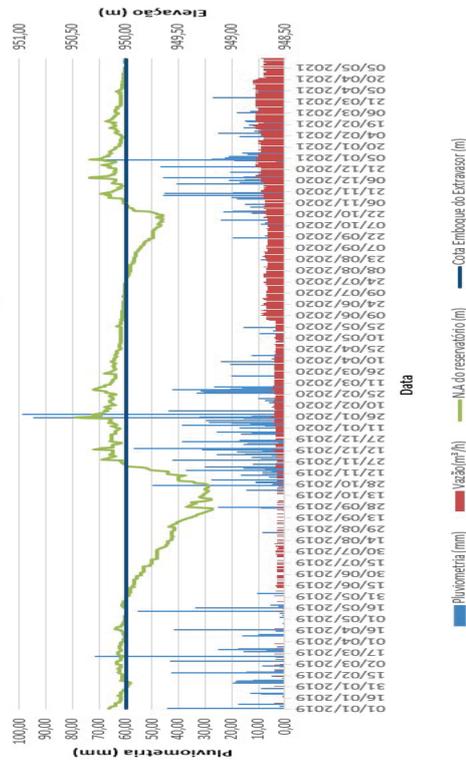
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE83 – MV01



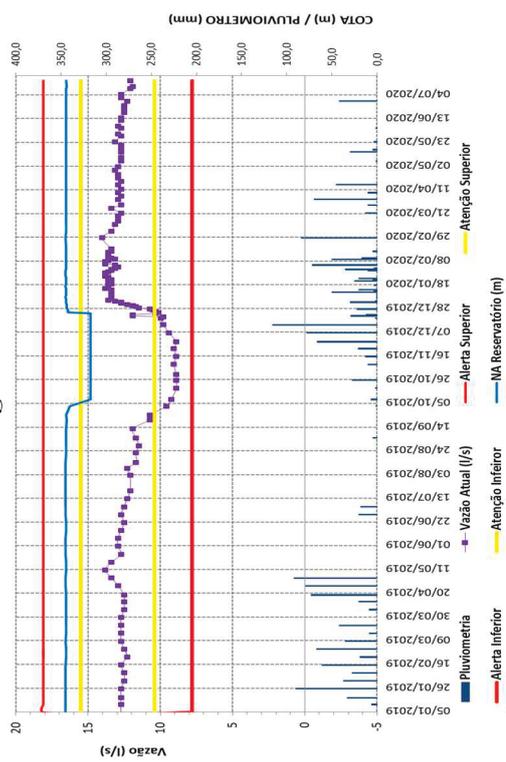
FONTE: Intertechne (2022)

Pluviometria da barragem BTE82



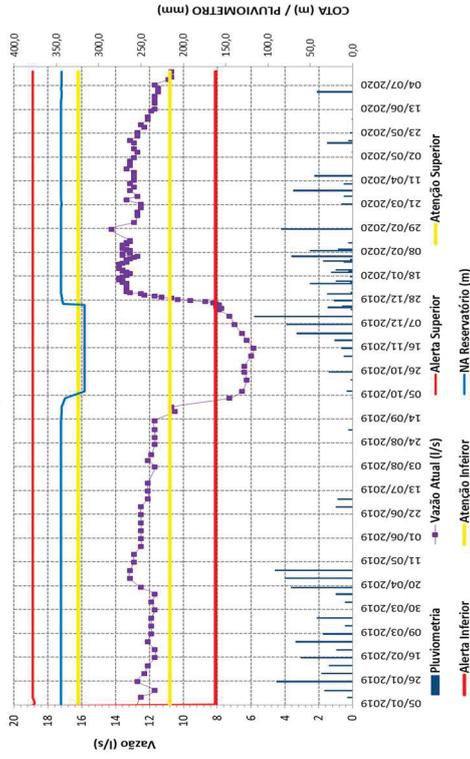
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE83 – MV02

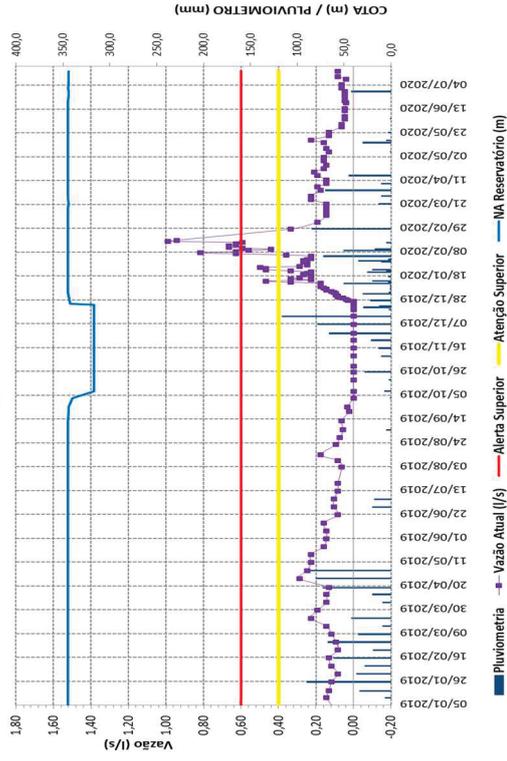


FONTE: Intertechne (2022)

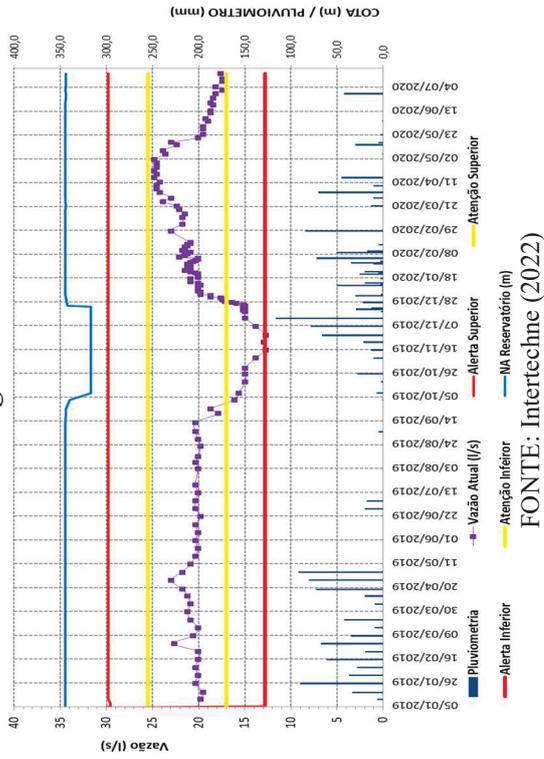
Vazões da barragem BTE83 – MV03



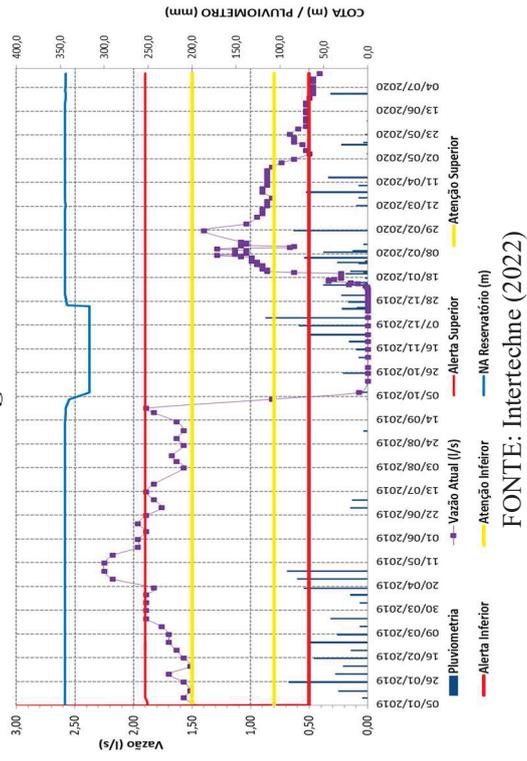
Vazões da barragem BTE83 – MV05



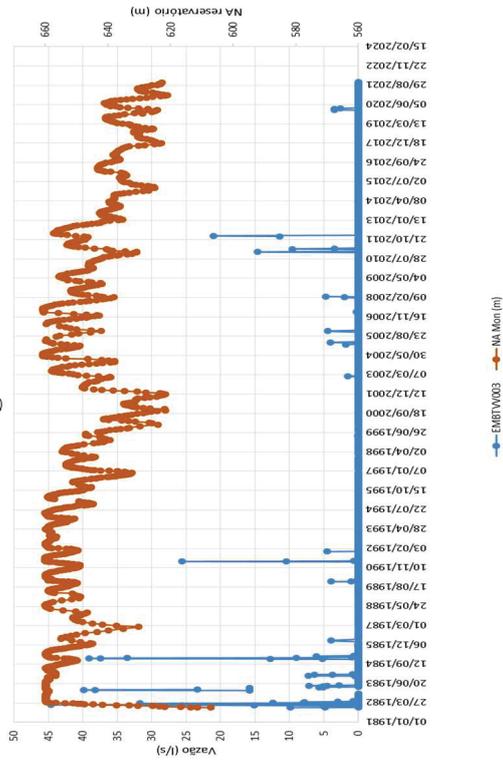
Vazões da barragem BTE83 – MV04



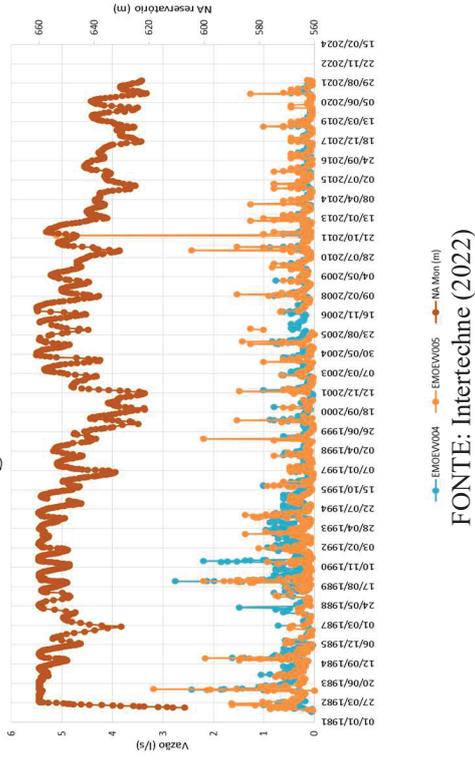
Vazões da barragem BTE84 – MV06



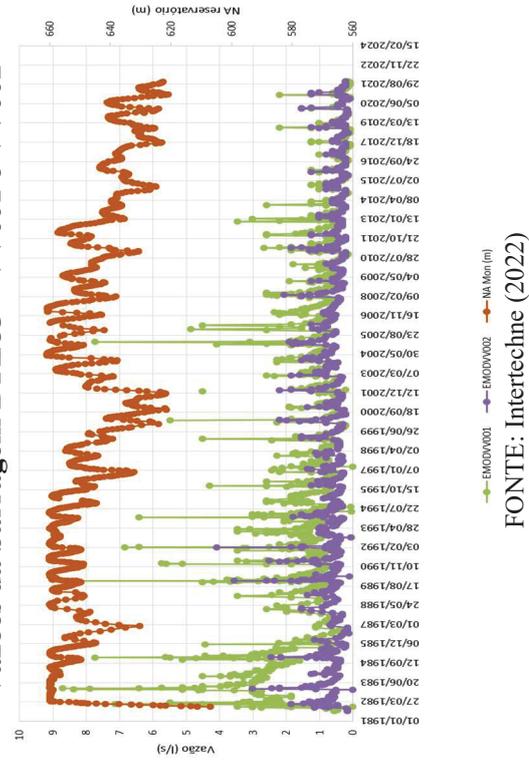
Vazões da barragem BTE85 – VV003



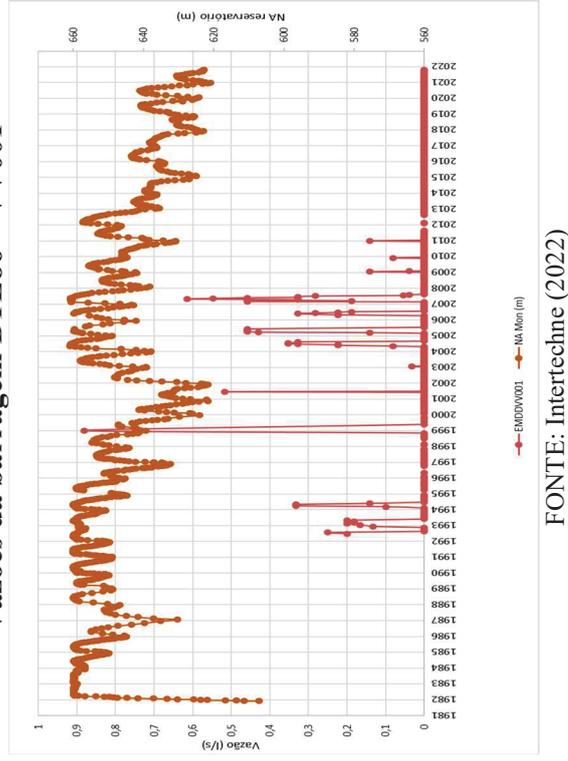
Vazões da barragem BTE85 – VV004 e VV005



Vazões da barragem BTE85 – VV001 e VV002



Vazões da barragem BTE86 – VV001

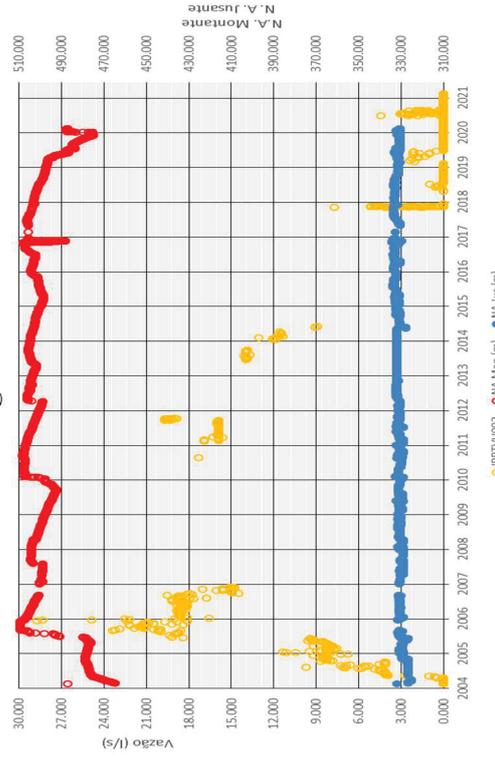


Vazões da barragem BTE87 – VV001



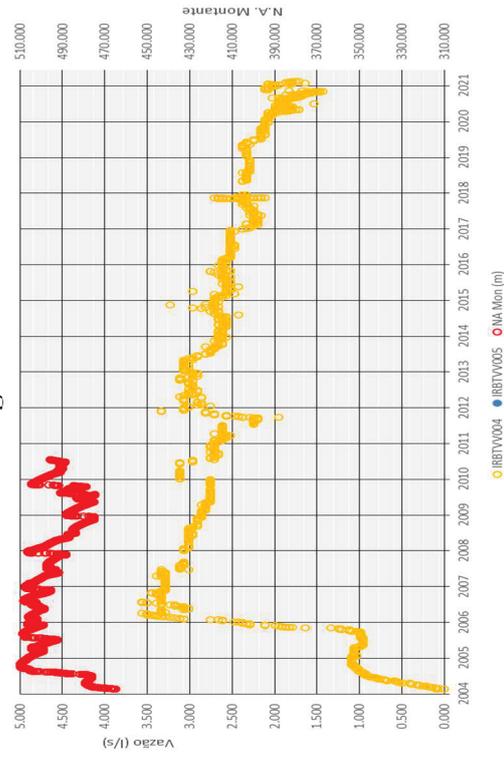
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE87 – VV003



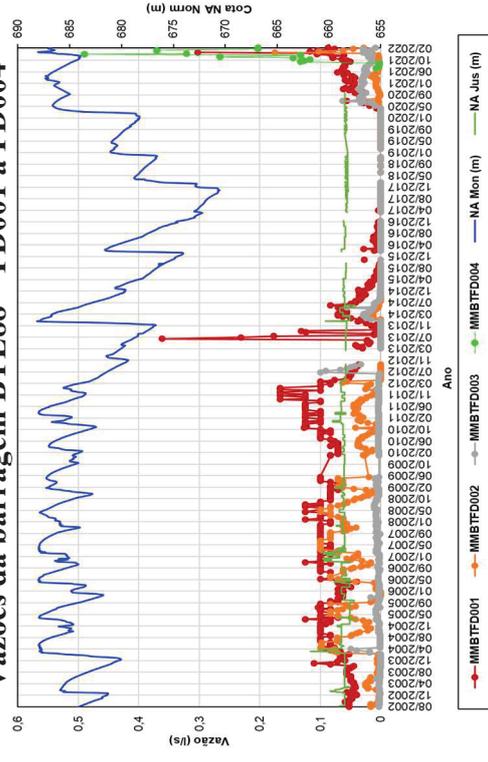
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE87 – VV004



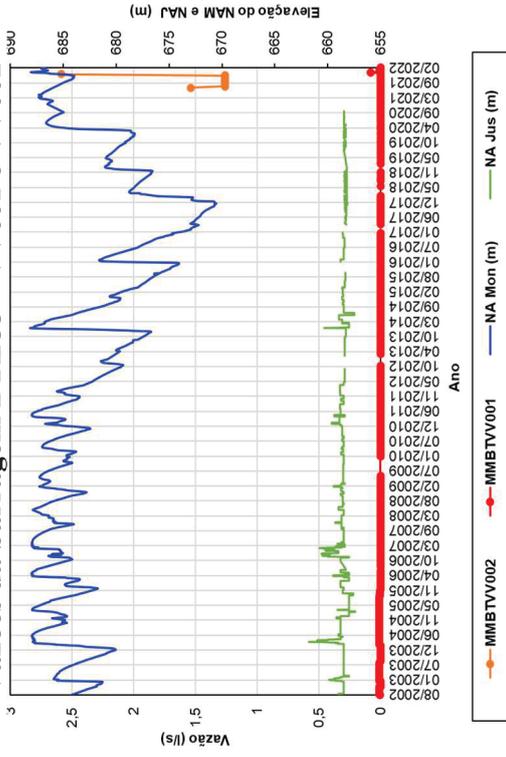
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE88 – FD001 a FD004



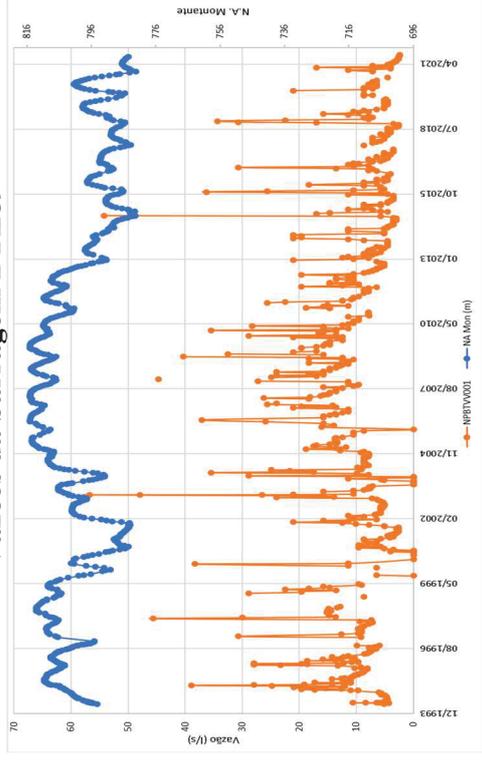
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE88 – VV001 e VV002



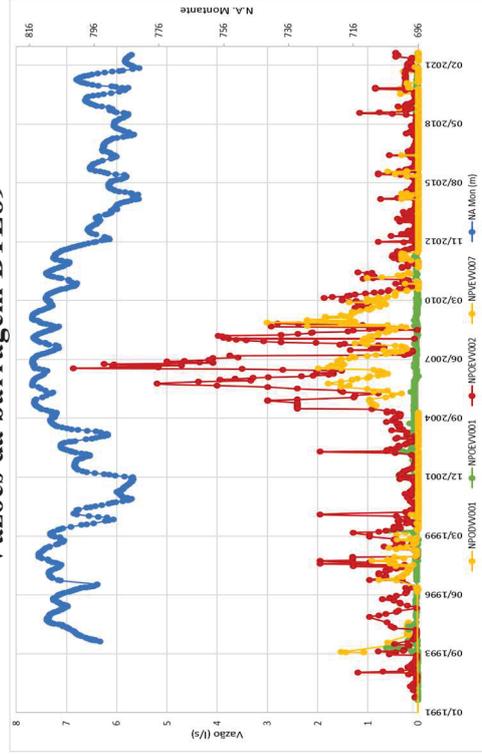
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE89



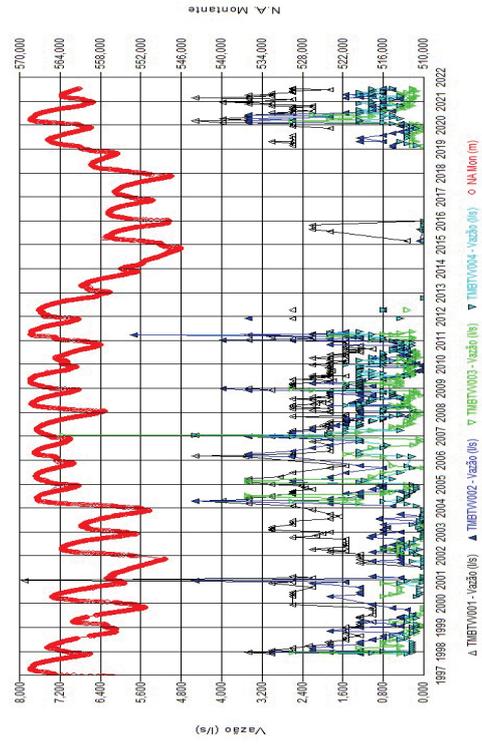
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE89



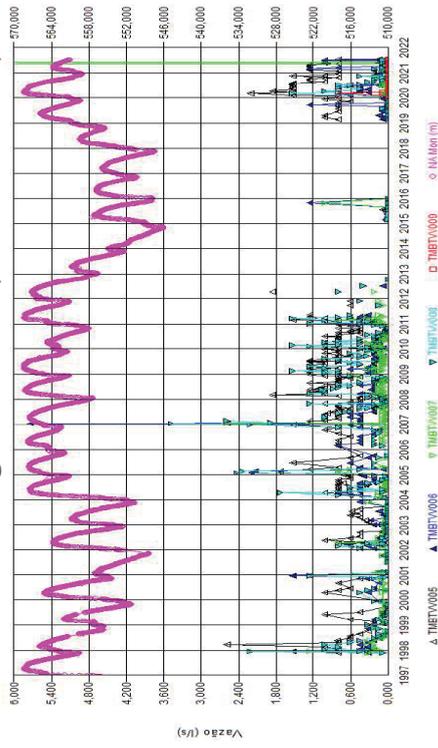
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE90 - (VV001 a VV004)



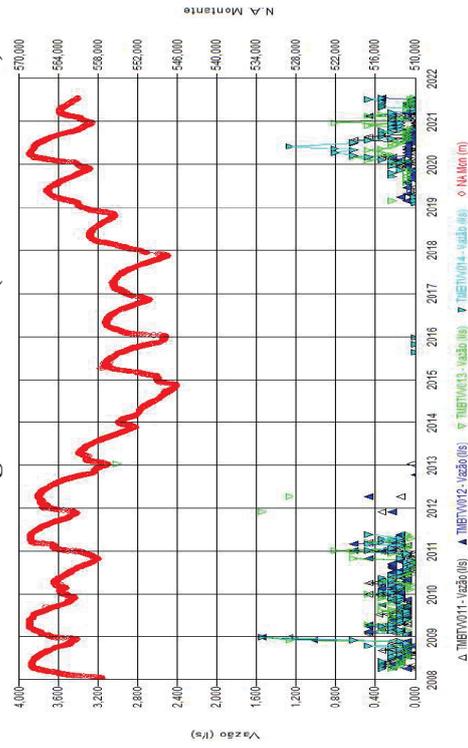
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE90 - (VV005 a VV009)



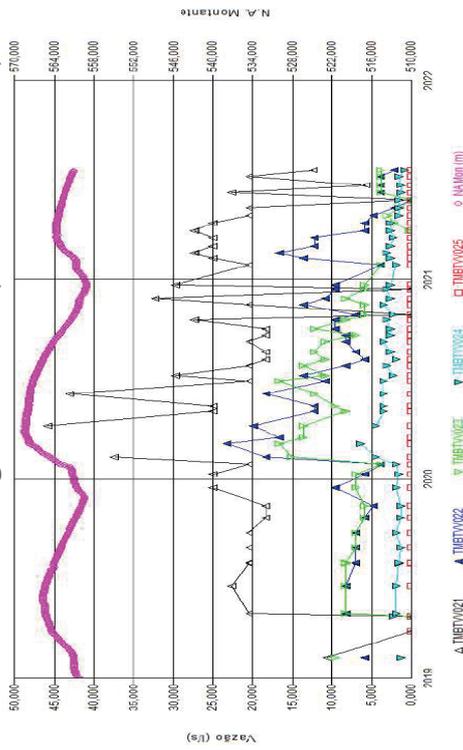
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE90 - (VV011 a VV014)



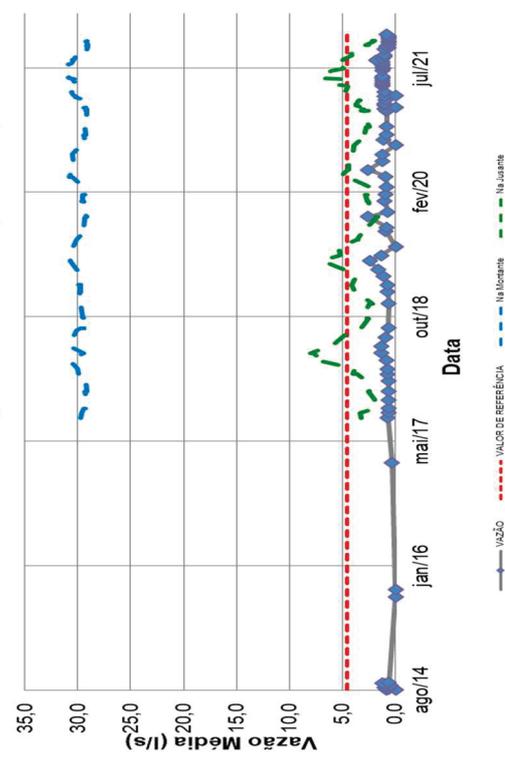
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE90 - (VV021 a VV025)



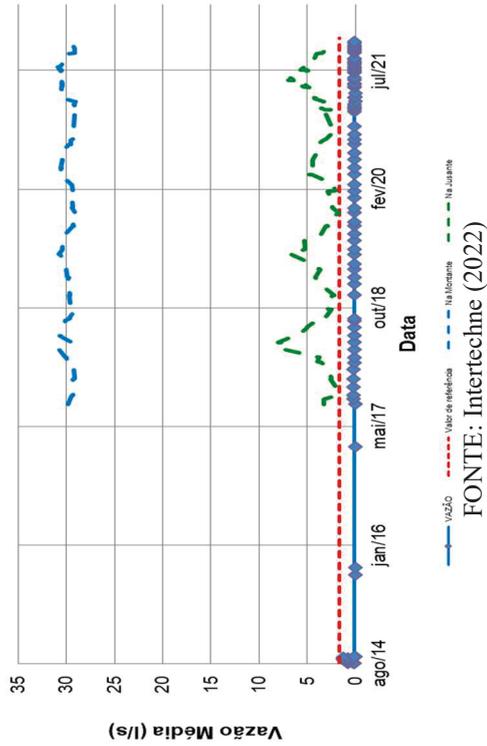
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE91 - (MV-01)

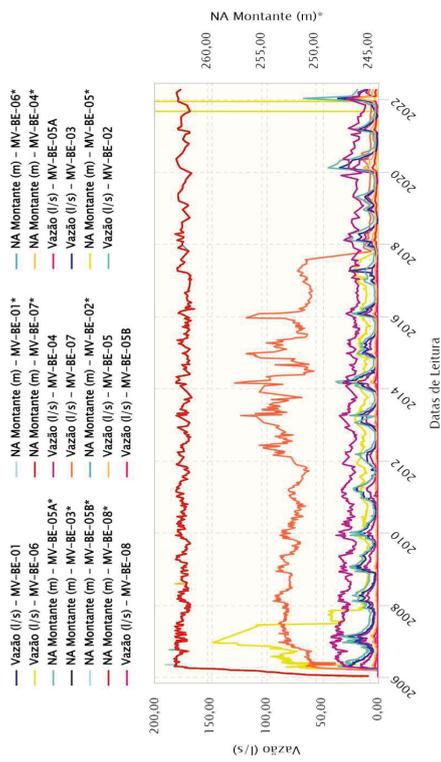


FONTE: Intertechne (2022)

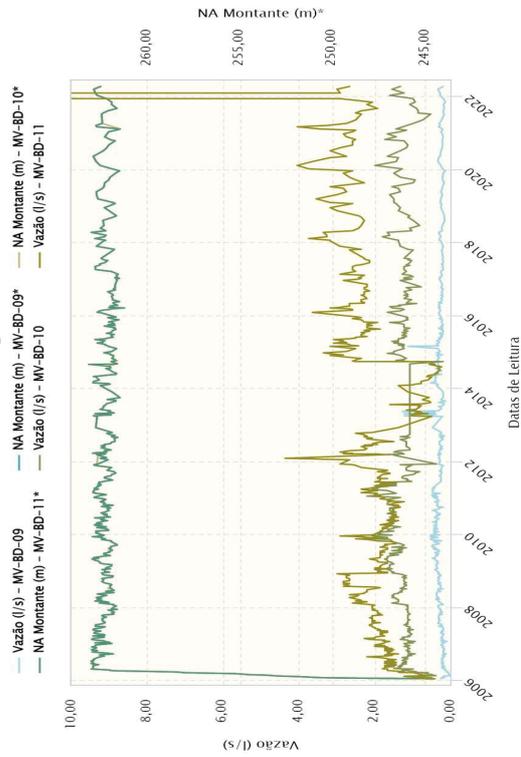
Vazões da barragem BTE92 - (MV-03)



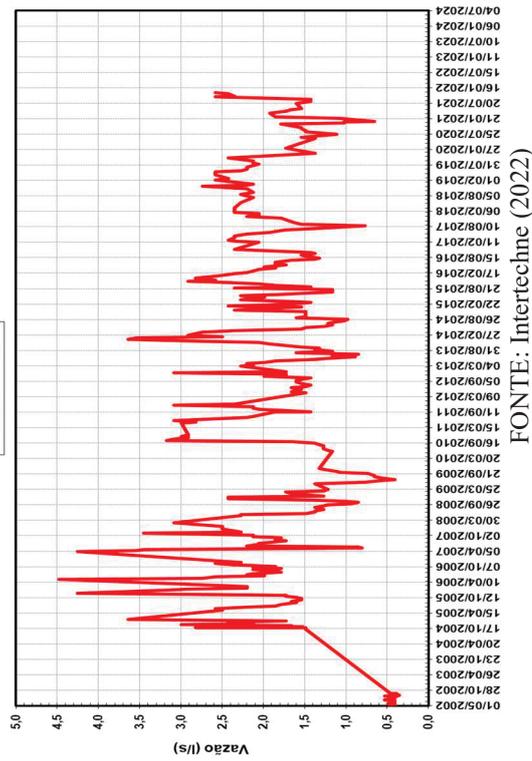
Vazões da barragem BTE94



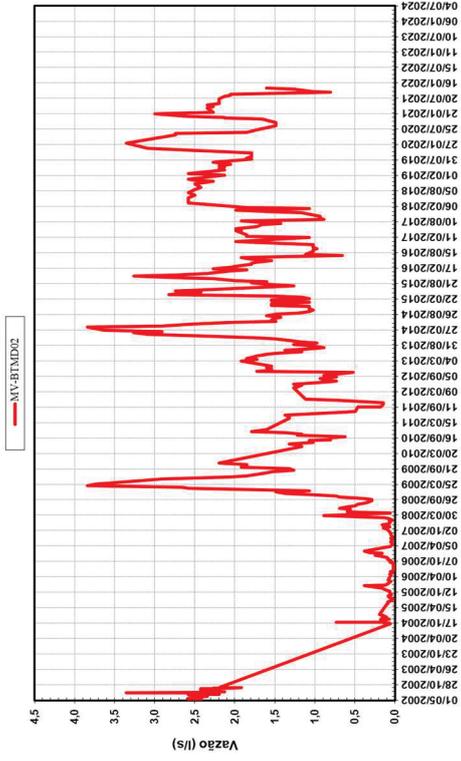
Vazões da barragem BTE93



Vazões da barragem BTE95

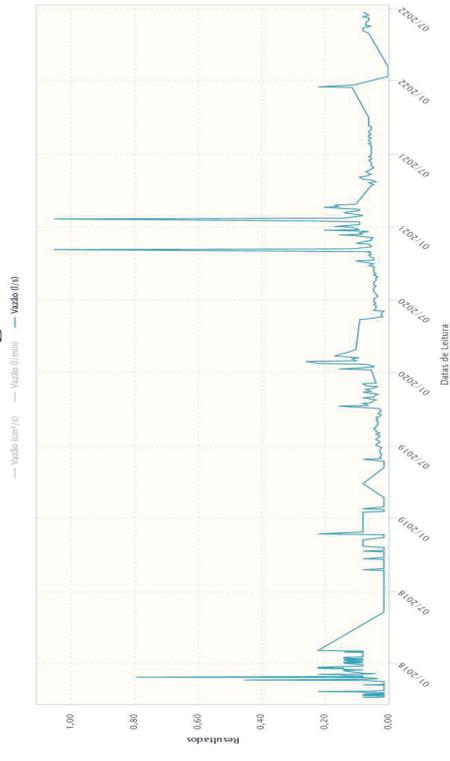


Vazões da barragem BTE95



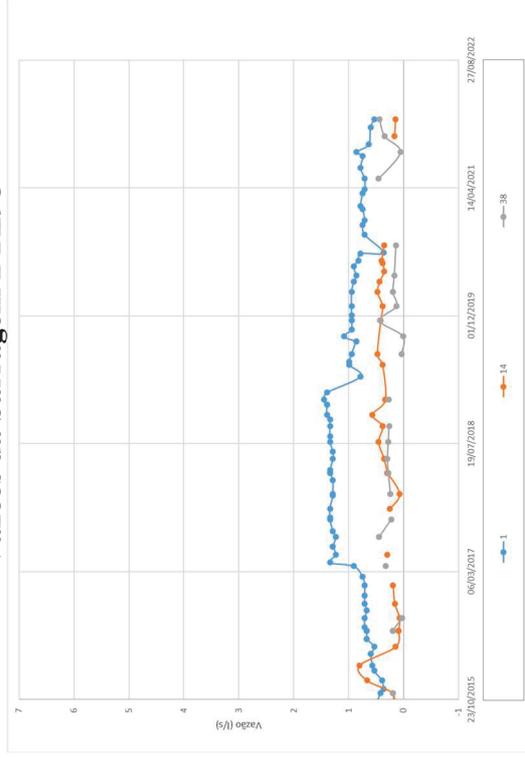
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE97



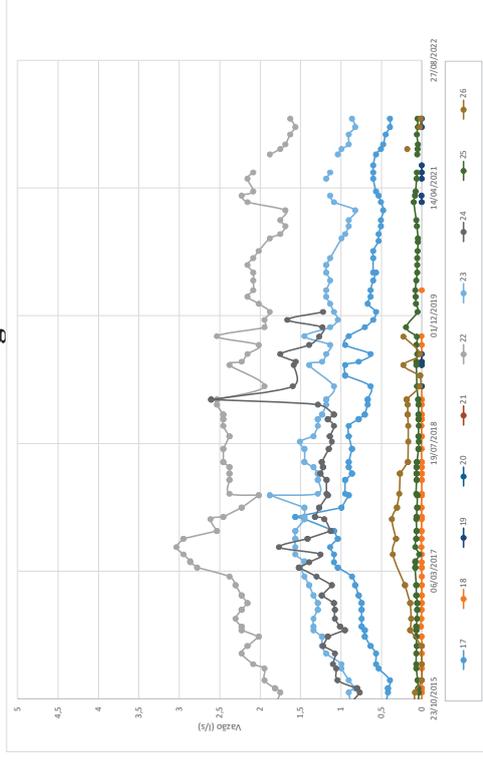
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE98



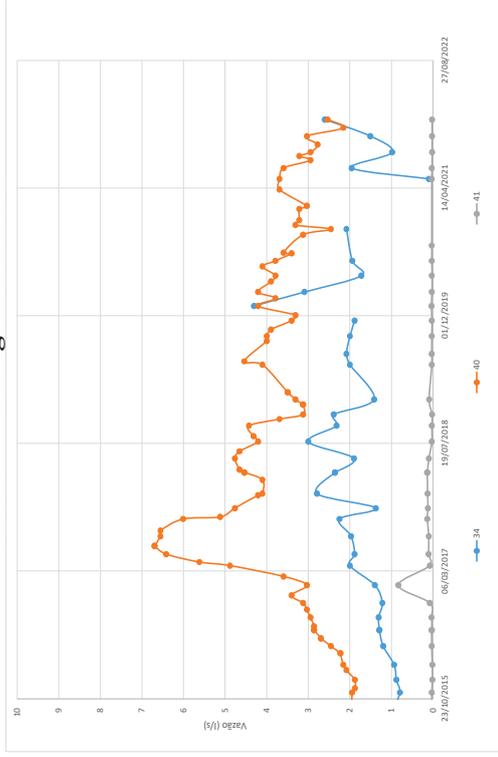
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE99



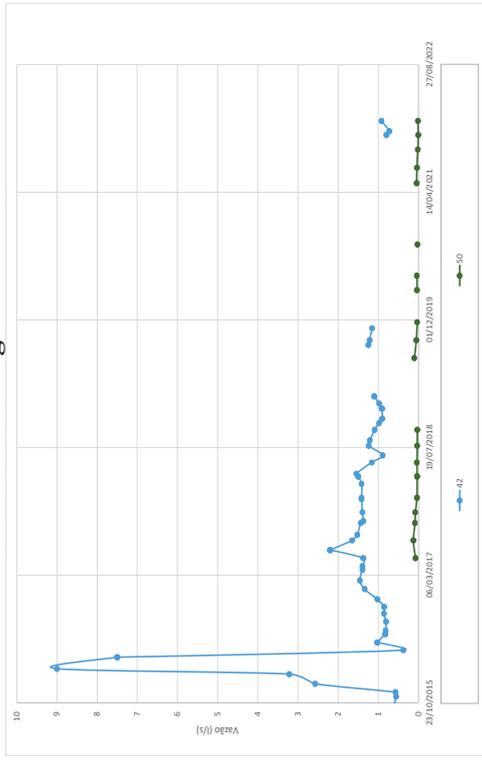
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE102



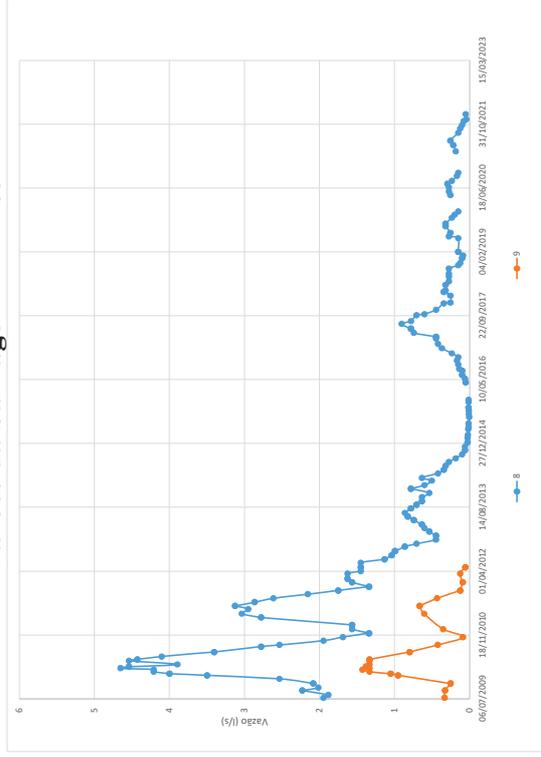
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE103



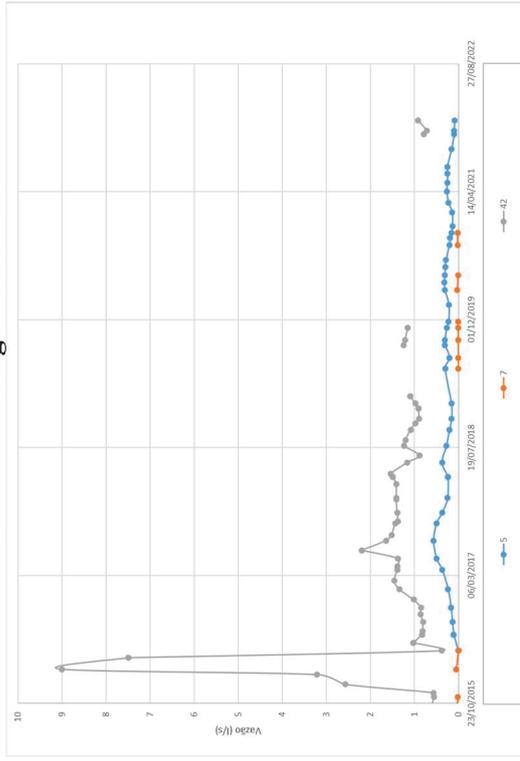
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE103



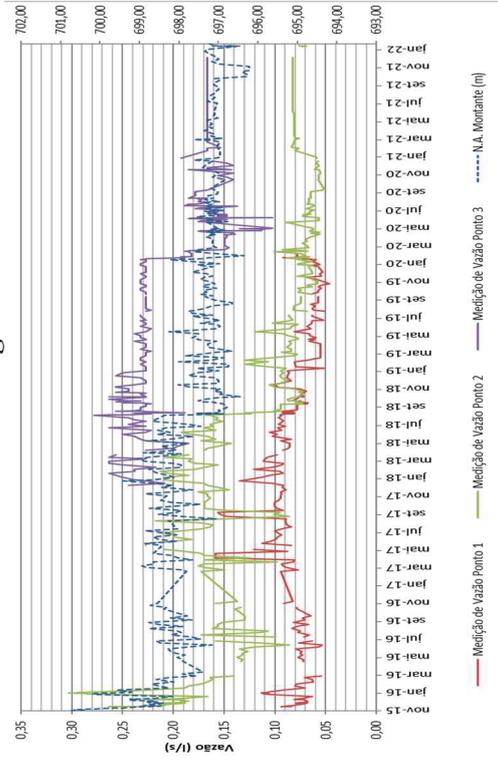
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE104



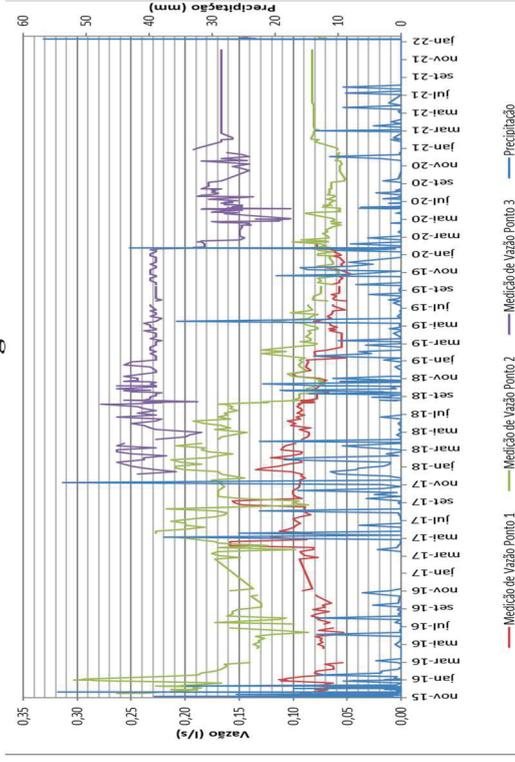
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE105



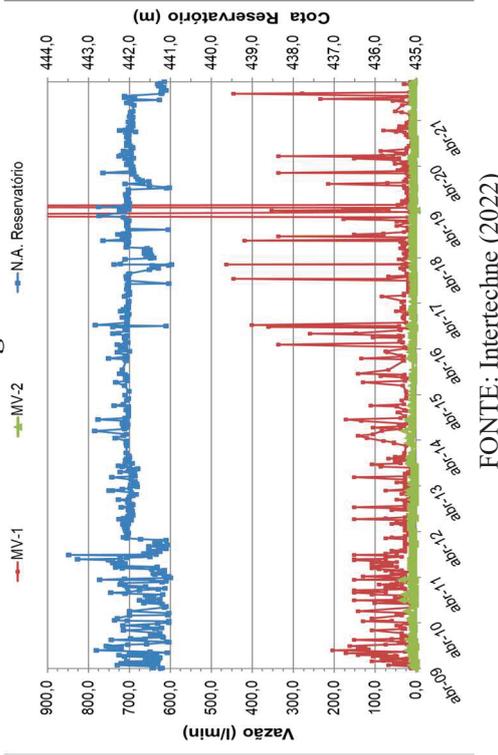
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE105



FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE106



FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE107



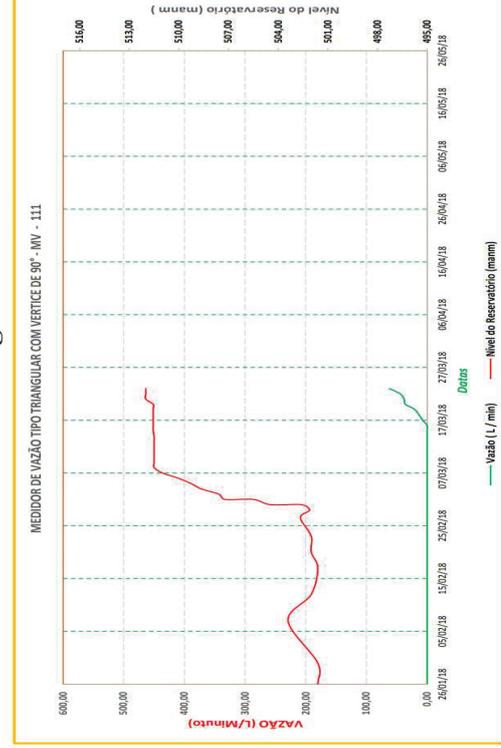
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE107



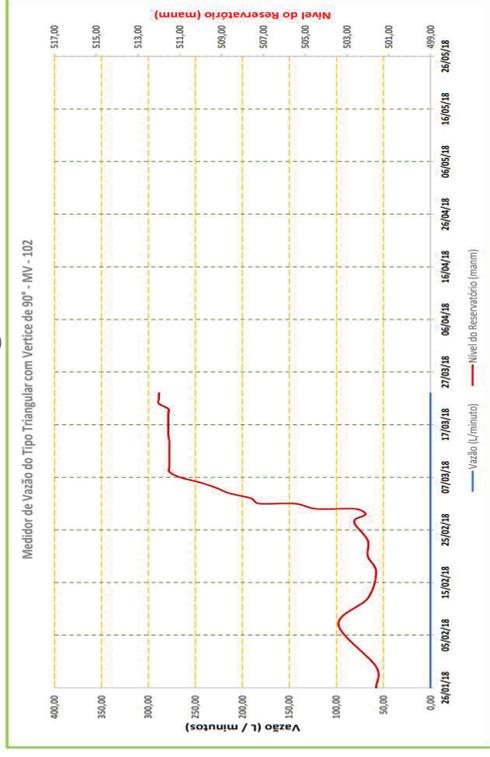
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE108



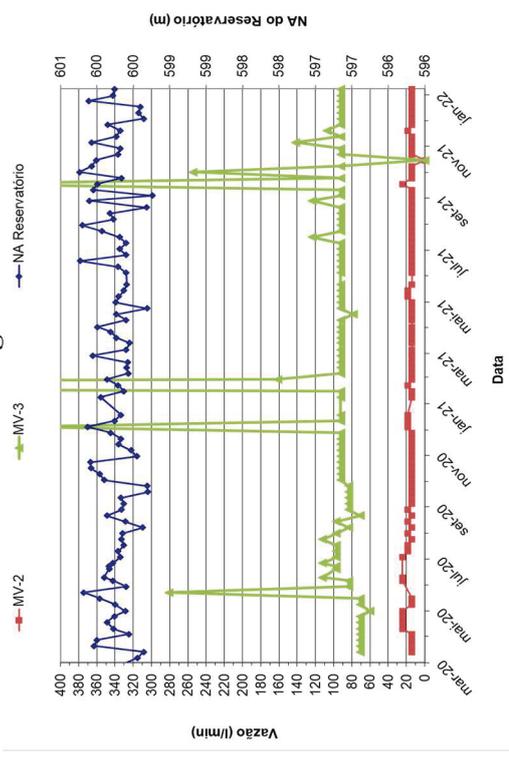
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE108



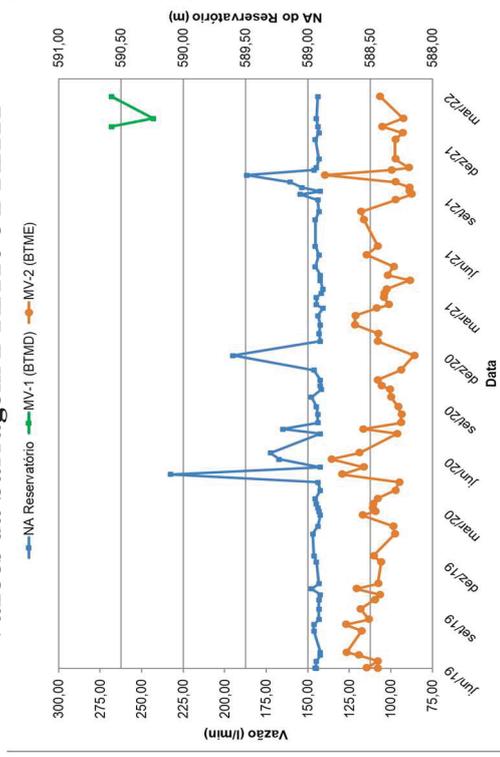
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE108



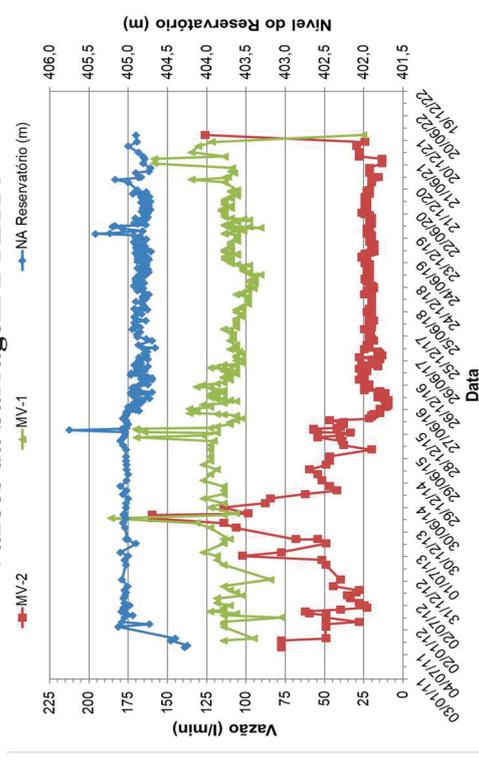
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE110 e BTE111



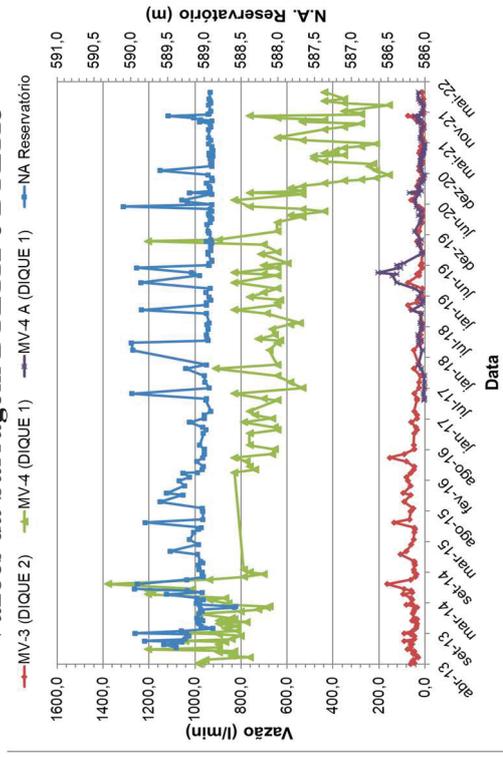
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE114



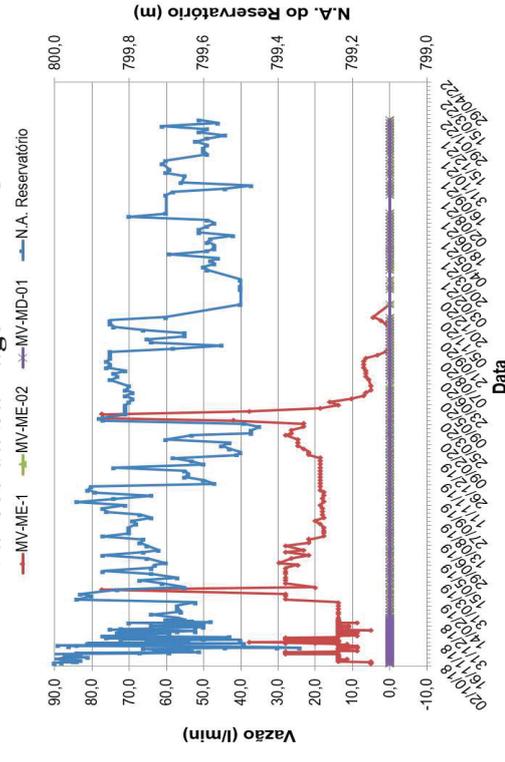
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE112 e BTE113



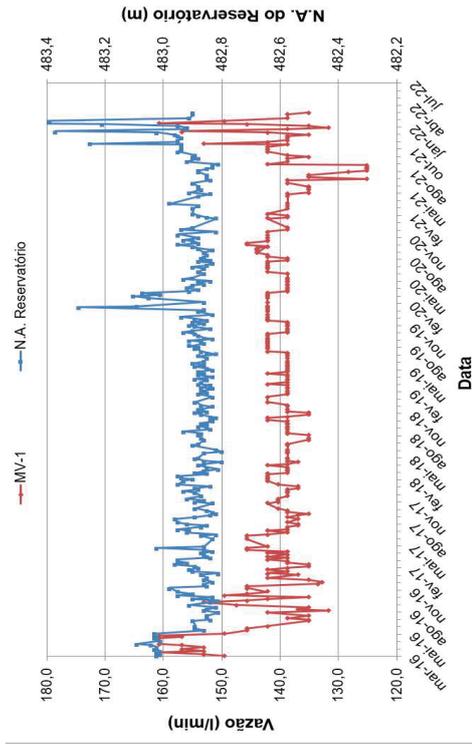
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE115



FONTE: Intertechne (2022)

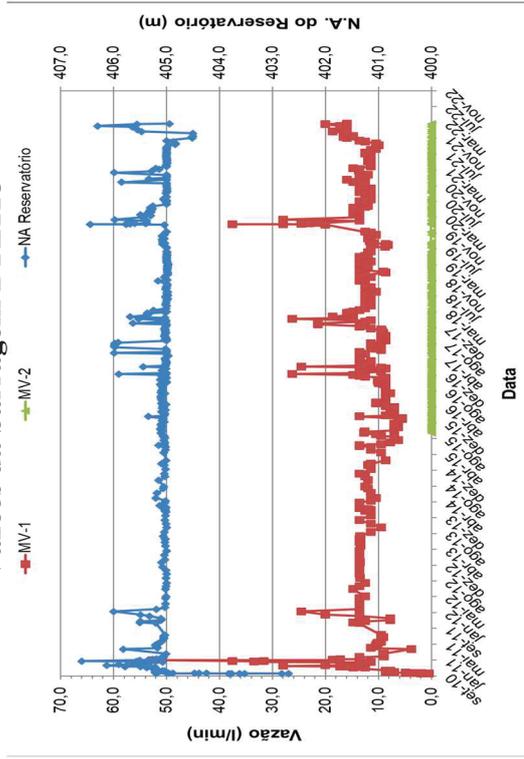
Vazões da barragem BTE116



Data

FONTE: Intertechne (2022)

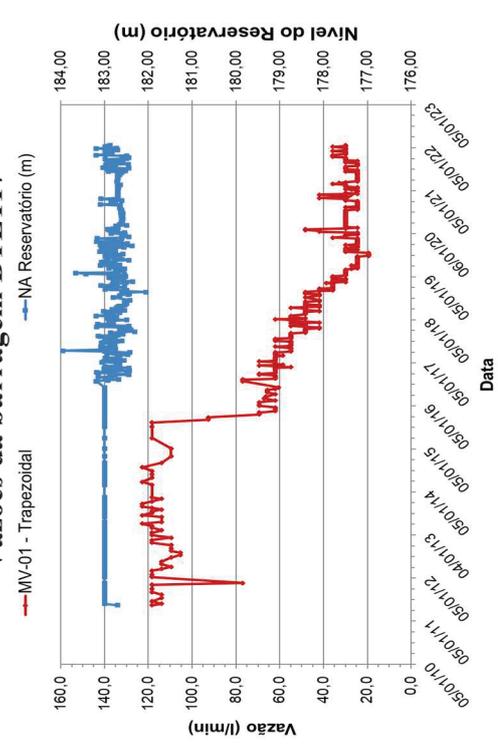
Vazões da barragem BTE118



Data

FONTE: Intertechne (2022)

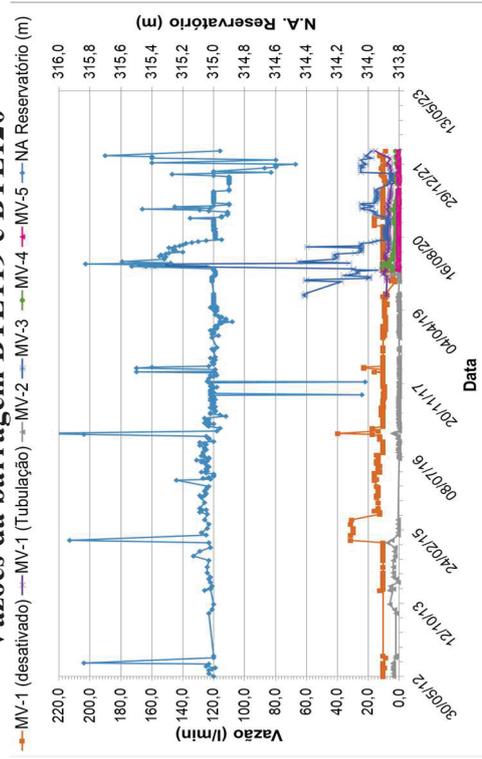
Vazões da barragem BTE117



Data

FONTE: Intertechne (2022)

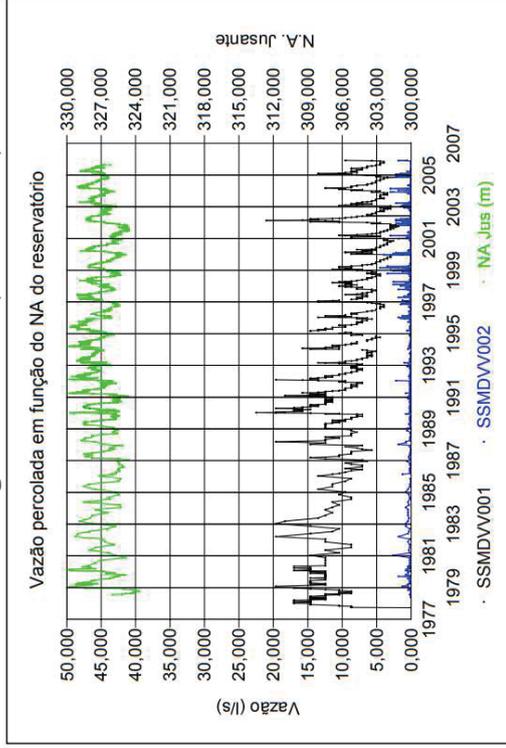
Vazões da barragem BTE119 e BTE120



Data

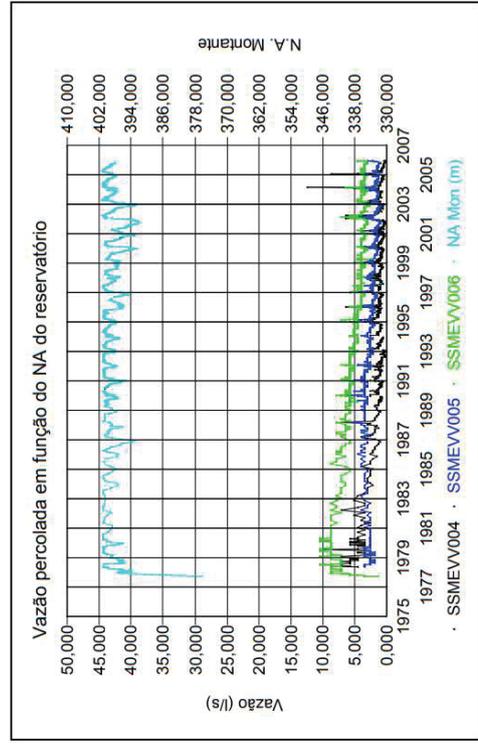
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE121 (São Simão)



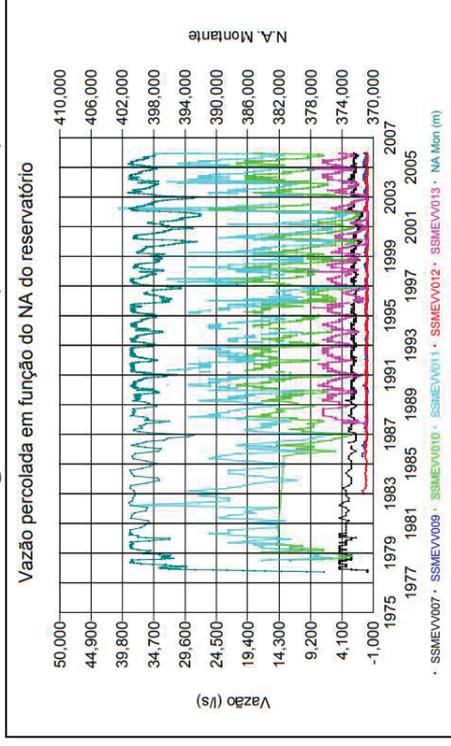
FONTE: Ladeira (2017)

Vazões da barragem BTE122 (São Simão)



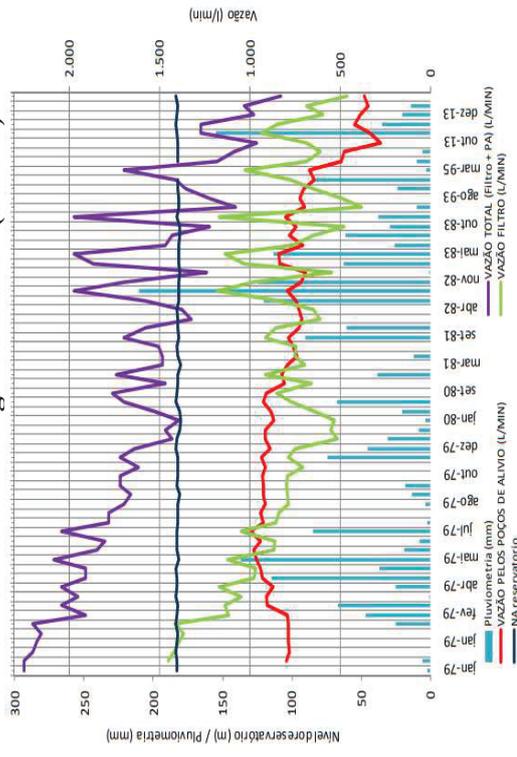
FONTE: Ladeira (2017)

Vazões da barragem BTE122 (São Simão)



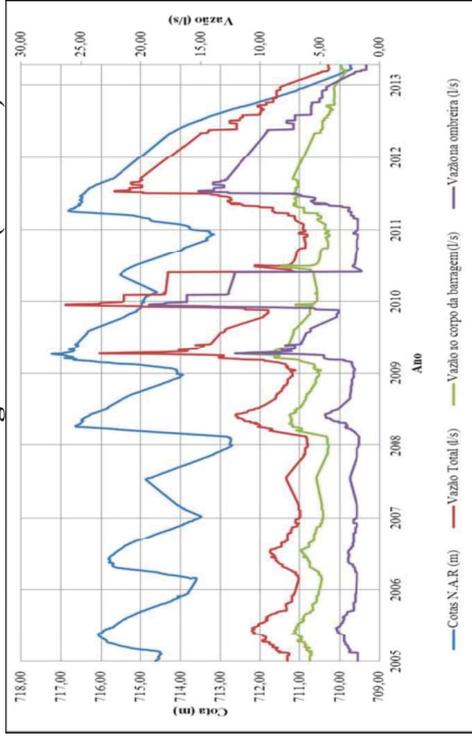
FONTE: Ladeira (2017)

Vazões da barragem BTE123 (Itaúba)



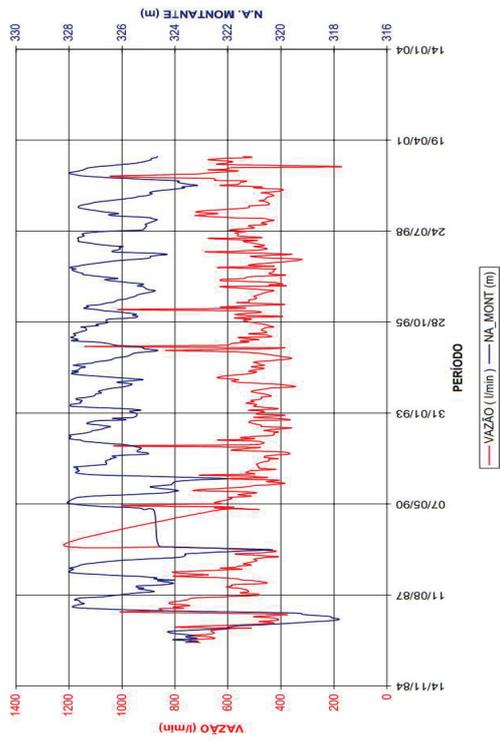
FONTE: Smiderle (2014)

Vazões da barragem BTE124 (Jaburu I)



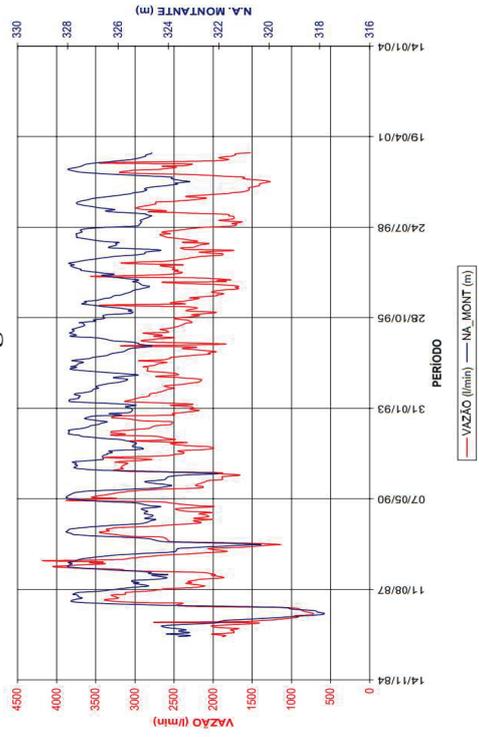
FONTE: Sousa (2014)

Vazões da barragem BTE125



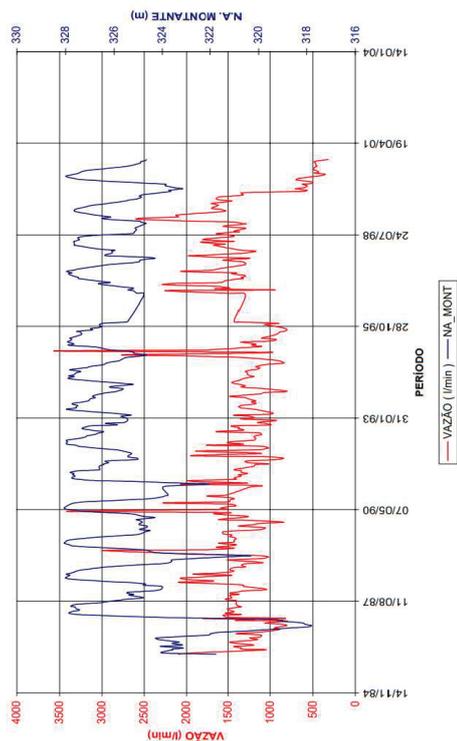
FONTE: Intertechne (2022)
Vazões da barragem BTE125

Vazões da barragem BTE125



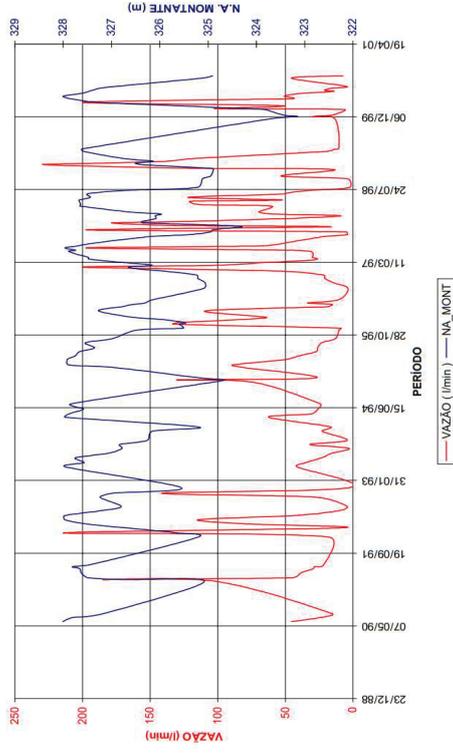
FONTE: Intertechne (2022)

FONTE: Intertechne (2022)
Vazões da barragem BTE125



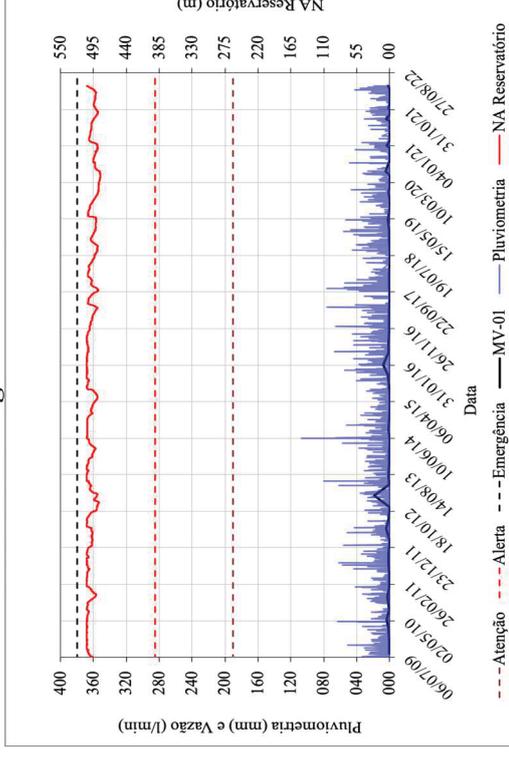
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE125



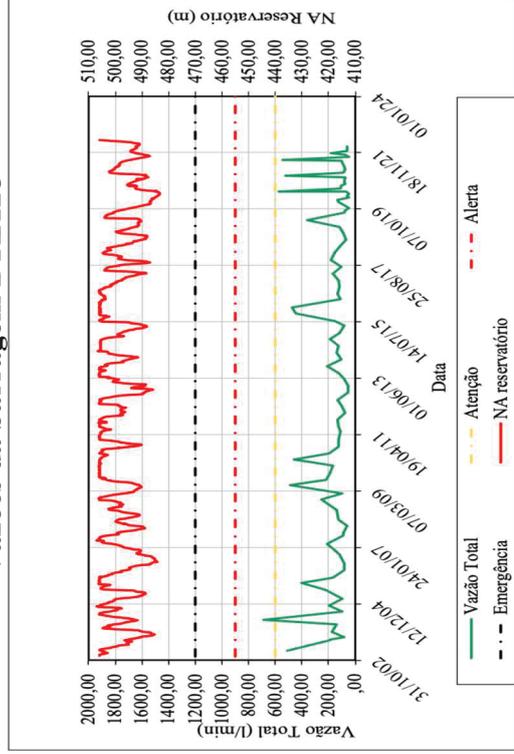
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE129



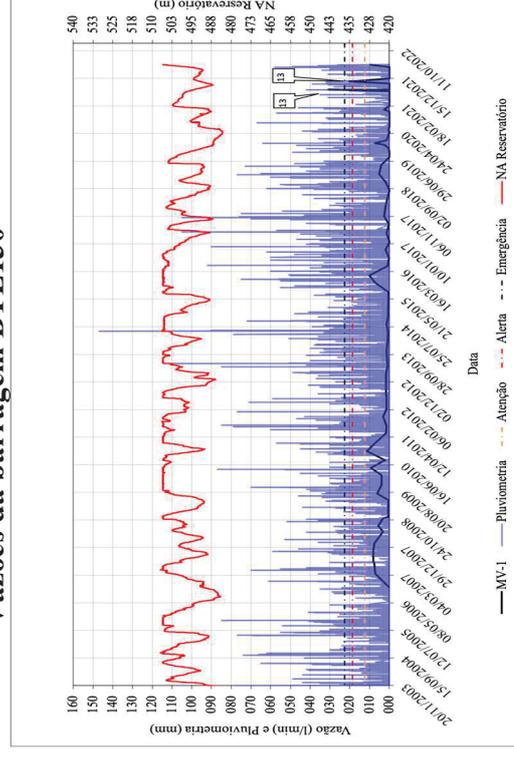
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE128



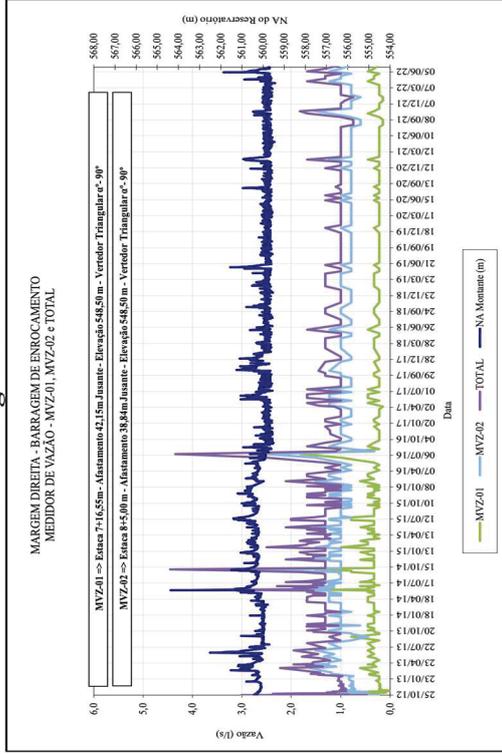
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE130



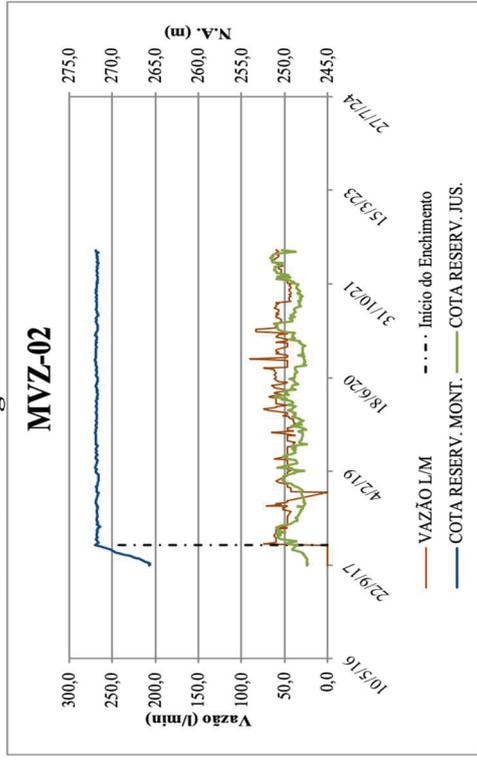
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE131



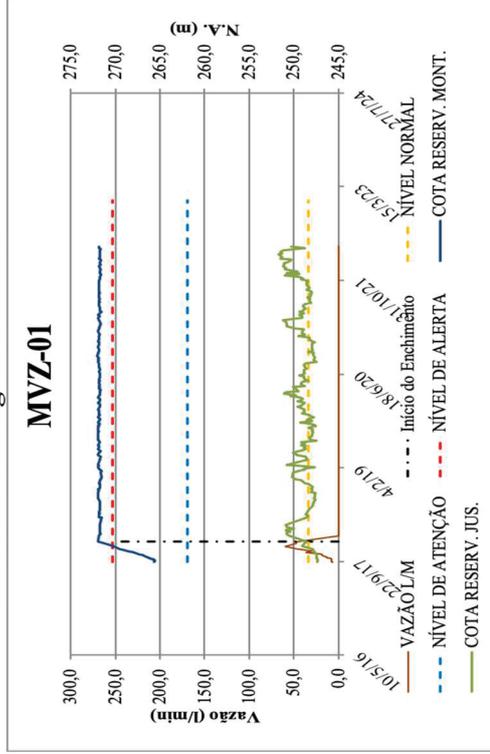
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE132



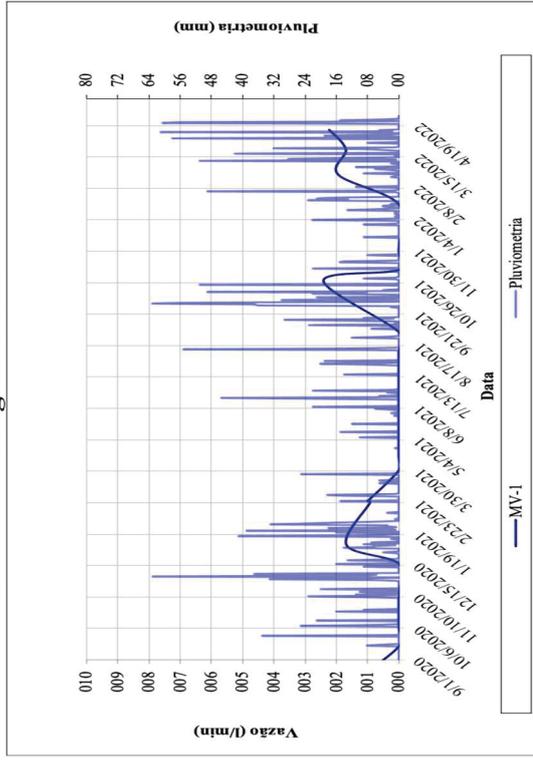
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE132



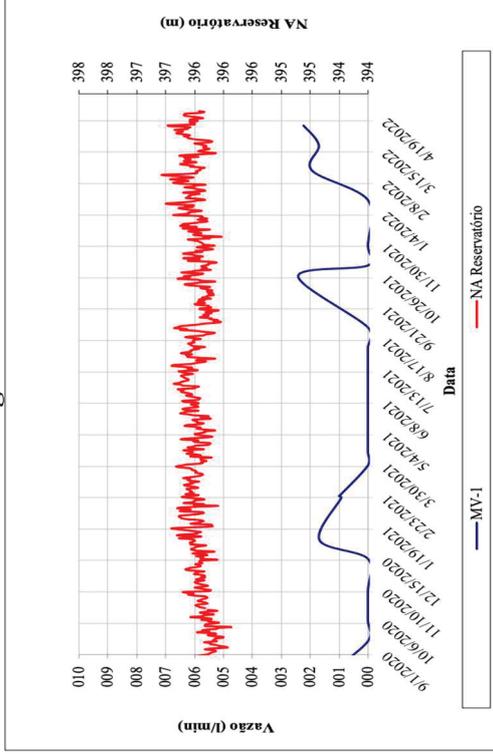
FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE133



FONTE: Intertechne (2022)

Vazões da barragem BTE133



FONTE: Intertechne (2022)