



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. CIVIL (RECURSOS HÍDRICOS)

MANUEL MOREIRA FERNANDES

ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS:
ESTUDO DE CASO DE SEIS BARRAGENS NA ILHA DE SANTIAGO
EM CABO VERDE-ÁFRICA

FORTALEZA

2020

MANUEL MOREIRA FERNANDES

ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS:
ESTUDO DE CASO DE SEIS BARRAGENS NA ILHA DE SANTIAGO
EM CABO VERDE-ÁFRICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Osny Eneas Silva.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F41a Fernandes, Manuel Moreira.
Análise de Risco de Ruptura de Barragens: Estudo de caso de seis barragens na Ilha de Santiago em Cabo Verde, África. / Manuel Moreira Fernandes. – 2020.
429 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Osny Eneas Da Silva.
1. Segurança de barragem. 2. Análise de Risco. 3. Ruptura de barragem. 4. Barragem Gravidade. 5. Plano de Ação de Emergência. I. Título.

CDD 627

MANUEL MOREIRA FERNANDES

ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS:
ESTUDO DE CASO DE SEIS BARRAGENS NA ILHA DE SANTIAGO
EM CABO VERDE-ÁFRICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Osny Enéas da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Samiria Maria Oliveira da Silva (Examinador interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares (Examinador interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Maria Brabo Alves (Examinador externo)
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Prof. Dr. Renato de Oliveira Fernandes (Examinador externo)
Universidade Regional do Cariri (URCA)

Aos Meus Pais, Joaquim e Elvira
(*In Memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil, pelo apoio financeiro, concedido na forma de bolsa.

Ao meu Professor e Orientador, Francisco Osny, pela sua paciência infinita e sua crença absoluta na capacidade de realização a mim atribuídas foram, inquestionavelmente, os elementos motivantes desta tese.

Aos demais Professores, Colegas e Funcionários do Curso de Doutorado em Engenharia Civil da PÓS-DEHA da UFC-CE, Fortaleza.

Agradeço, de forma muito carinhosa, à minha esposa Maria Adelaide Silva e aos meus filhos Adélio, Adélia e Adécio, pela paciência e contínuo apoio em todos estes anos, desde o início. A vossa energia e vossa compreensão foram fundamentais na construção e conclusão deste trabalho.

À OECV, pela parceria no âmbito deste trabalho, que permitiu a deslocação à Cabo Verde dos Professores da UFC-CE, Francisco Osny, Marco Aurélio Holanda, Fábio Capelo e André Bezerra, para ministrarem formação em Segurança de Barragem e análise de risco, Dimensionamento hidráulico, Água e Saneamento e Tratamento de Esgotos, respetivamente, e conhecerem a realidade de Cabo Verde.

Ao Eng. Francisco Leitão e Dr. Éder Fernandes, pela colaboração na modelagem dos softwares QGIS, HEC-HMS e HEC-RAS.

Aos meus Colegas, Eng. Gracelino Semedo-Delegado do MAA em Santa Catarina, Enga. Graciete Silva da ANAS e Enga. Ernestina Veiga da DMAA de Santa Cruz, por compartilharem comigo todo o seu conhecimento e informação sobre barragem, bacia hidrográfica e ocupação de vale a jusante, que ajudaram na materialização deste trabalho.

À MDR, pela informação disponibilizada, e aos Eng. Daniel Horta e Eng. Eugénio Barros (*In Memoriam*).

E a Deus, que me deu forças e iluminou meu espírito, me permitindo aprender muito mais do que a ciência me pôde ensinar.

Muito obrigado!

RESUMO

Cabo Verde se insere no grupo de países do mundo com menos recursos hídricos. A construção de barragens em Cabo Verde é um fato recente, sendo a primeira barragem construída em 2006, ainda na ausência de uma legislação sobre segurança de barragens. A falta de experiência no projeto de barragens pela engenharia nacional, obrigou ao governo a contratar empresas de consultoria internacional para sua elaboração. Paralelamente a esta situação, a ocorrência de acidentes e incidentes com barragens no Brasil e em outros países do mundo, não é uma mera hipótese baseada em um passado remoto. É um fato que exige uma tomada de solução de curto prazo. Acidentes no Brasil e em outros países, em geral, estão associados à forma como a gestão da segurança das barragens é tratada. Outrossim, os riscos associados a ruptura de barragens, traz como consequência a possibilidade de perdas de vidas humanas e a geração de enormes prejuízos materiais, econômicos, sociais e ambientais, implica na necessidade de definição de um quadro normativo prévio no qual devem ser equacionados inúmeros fatores ligados à qualidade dos projetos, aos requisitos de segurança da obra, à observação e inspeção da execução das obras, e a gestão operacional das barragens. Assim, este trabalho apresenta uma proposta de análise de risco de ruptura de seis barragens na Ilha de Santiago em Cabo Verde com estudo de caso das barragens de Faveta, Figueira Gorda, Flamengos, Poilão, Salineiro e Saquinho. A apresentação de estudo sobre o plano de acção emergencial (PAE) no vale a jusante destas barragens e suas respectivas consequências devido à simulação de uma eventual ruptura hipotética das mesmas serão também materializados, com recurso aos programas QGIS (geoprocessamento), HEC-HMS (hidrograma de ruptura no *Dam Break*) e HEC-RAS (simulação de rompimento em 2D). Conforme a resolução da ANA nº 136 (2017), o PAE é exigido para barragens de Classes A e B, e deverá ser elaborado, para barragens novas, antes do início do primeiro enchimento, a partir de quando deverá estar disponível para utilização. Por isso, também, serão classificadas as seis barragens em estudo, em termos de Potencial de Risco (PR), Critério de Risco (CRI) e em termos de Dano Potencial Associado (DPA), com base nos critérios da CNRH de 2012 e na Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens no Brasil - PNSB. Finalmente com base numa extensa pesquisa de legislação sobre gestão de segurança de barragem em vários países e a análise do estado atual de Cabo Verde relacionado com atribuição de competências a nível de gestão de recursos hídricos, gestão e construção de infraestruturas hidráulicas e legislação sobre gestão de segurança de barragem, se elaborou um modelo de sistema de gestão de segurança de barragem, adaptada perfeitamente às condições e realidade destas ilhas, com participação não só, das autoridades e

instituições públicas existentes, mas também das autoridades privadas à semelhança das melhores práticas internacionais.

Palavras-chave: Segurança de barragem. Análise de risco. Ruptura de Barragem. Barragem Gravidade. Plano de Ação de Emergência.

ABSTRACT

Cape Verde is part of the group of countries in the world with less water resources. The construction of dams in Cape Verde is a recent fact, the first dam being built in 2006, still in the absence of legislation on dam safety. The lack of experience in the design of dams by national engineering, forced the government to hire international consulting companies for its elaboration. Parallel to this situation, the occurrence of accidents and incidents with dams in Brazil and other countries in the world, is not a mere hypothesis based on a remote past. It is a fact that requires a short-term solution. These accidents in Brazil and other countries, in general, are associated with the way in which dam safety management is handled. Furthermore, the risks associated with the rupture of dams, resulting in the possibility of loss of human life and the generation of enormous material, economic, social and environmental losses, implies the need to define a previous regulatory framework in which countless must be considered. factors linked to the quality of the projects, the safety requirements of the work, the observation and inspection of the execution of the works, and the operational management of the dams. Thus, this work presents a proposal to analyze the risk of rupture of six dams on the Island of Santiago in Cape Verde with a case study of the dams of Faveta, Figueira Gorda, Flamengos, Poilão, Salineiro and Saquinho. The presentation of a study on the emergency action plan (PAE) in the valley downstream of these dams and their respective consequences due to the simulation of an eventual hypothetical rupture of the dams will also be materialized, using the QGIS (geoprocessing), HEC-HMS (rupture hydrograph at Dam Break) and HEC-RAS (2D breakout simulation) programs. According to ANA Resolution No. 136 (2017), the PAE is required for Class A and B dams, and must be prepared for new dams, before the first filling begins, from when it should be available for use. Therefore, the six dams under study will also be classified, in terms of Risk Potential (PR), Risk Criterion (CRI) and in terms of Potential Associated Damage (DPA), based on CNRH of 2012 and Law No. 12,334 of 20 of September 2010, which establishes the National Dam Safety Policy in Brazil - PNSB. Finally, based on extensive research of legislation on dam safety management in several countries and an analysis of the current state of Cape Verde related to the attribution of competencies in terms of water resource management, management and construction of hydraulic infrastructures and legislation on water management. dam safety, a model of the dam safety management system was elaborated, perfectly adapted to the conditions and reality of these islands, with participation not only from existing public authorities and institutions, but also from private authorities, in line with the best international practices on this matter.

Keywords: Dam safety. Risk analysis. Dam rupture. Gravity Dam. Emergency Action Plan.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Capacidade de armazenamento de água em África e alguns países.....	27
Figura 1.2 – Localização da maior barragem em África	28
Figura 1.3 – Vistas das barragens em estudo.....	30
Figura 1.4 – Barragem de Salineiro durante a construção (à esq.) e concluída (à dir.).....	31
Figura 2.1 – Distribuição de água no Planeta.....	40
Figura 2.2 – Ruptura de barragens em função do tipo construtivo	41
Figura 2.3 – Estatística da distribuição geográfica das rupturas de barragens	42
Figura 2.4 – Barragem de Banqiao e Shimatan (à esq.) e Barragem de Three Gorges (à dir.)	44
Figura 2.5 – Barragem de Poilão – Primeira barragem construída em Cabo Verde	45
Figura 3.1 – Barragem de Banca Furada (à esq.) e Barragem de Canto Cagara (à dir.)	66
Figura 3.2 – Exemplos dos principais tipos de barragem e sua localização ao redor do mundo.	72
Figura 3.3 – Evolução do perfil das barragens gravidade: a) Trapézio curvilíneo, b) Trapézio retilíneo, c) Trapézio inclinado e d) Gravidade aligeirada-seção vazada.....	73
Figura 3.4 – Forças consideradas no dimensionamento das barragens gravidade	75
Figura 3.5 – Mecanismos de escorregamento e derrubamento das barragens gravidade.....	76
Figura 3.6 – Perfil gravidade triangular sujeito às ações do peso próprio e da água (pressão hidrostática e subpressão), para o caso de subpressão nula.....	78
Figura 3.7 – Perfil gravidade triangular, considerando o caso de subpressão total.....	79
Figura 3.8 – Subpressões na base de um perfil gravidade triangular com cortina de impermeabilização e rede de drenagem executadas a partir da galeria geral de drenagem.	84
Figura 3.9 – Diagrama de subpressões na base da barragem no caso de não existir drenagem na fundação.....	94
Figura 3.10 – Diagrama de subpressões na base da barragem existindo drenagem da fundação, no caso em que a soleira da galeria de drenagem se situa a uma cota igual ou inferior à cota da água a jusante.....	95
Figura 3.11 – Diagrama de subpressões na base da barragem existindo drenagem da fundação, no caso em que a soleira da galeria de drenagem se situa a uma cota superior à cota da água a jusante.....	95
Figura 3.12 – Quantificação das pressões hidrodinâmicas na interface estrutura-água	100
Figura 3.13 – Tensões principais máximas no betão: a) Devido ao peso próprio; b) Devido ações da água: pressão hidrostática e subpressões; e c) peso próprio e ações da água	102

Figura 3.14 – Principais cenários de acidente (%) em barragem de betão e alvenaria (excluídas as estruturas hidráulicas)	107
Figura 3.15 – Exemplos de rupturas de barragem: Algodões (à esq.) e Savano-Shushenskaya (à dir.)	108
Figura 3.16 – Causas de rompimento de barragens.....	114
Figura 3.17 – Sub-causas de rompimento de barragens	115
Figura 3.18 – Condições de fluxo unidirecional.....	120
Figura 3.19 – Percolação, infiltração, repasses e ressurgências: a) Ombreiras, corpo da barragem, fundações e encostas, b) percolação e infiltração nas paredes interiores de galeria de injeção e drenagem, c) repasses no paramento jusante e d) ressurgências na fundação.	122
Figura 4.1 – Editor do programa HEC-HMS	127
Figura 4.2 – Hietograma de projeto para o período de retorno de 1.000 anos para barragens de Saquinho e Flamengos.....	132
Figura 4.3 – Hietograma de projeto para o período de retorno de 1.000 anos para barragens de Faveta	133
Figura 4.4 – Hietograma de projeto para o período de retorno de 1.000 anos para barragem de F. Gorda e Poilão	133
Figura 4.5 – Hietograma de projeto para período de retorno de 1000 anos para barragem de Salineiro.....	134
Figura 4.6 – Hietograma e hidrograma resultantes de um evento de chuva simulado no HEC-HMS	135
Figura 4.7 – Representação genérica de Hietograma e hidrograma resultantes de um evento de chuva, com identificação das partes componentes	136
Figura 4.8 – Altimetria de bacia hidrográfica georreferenciada em sistema de projeção local (arquivo do tipo .prj), usada na criação do MDT 2D	141
Figura 4.9 – <i>Upload</i> do arquivo do tipo .prj na criação do MDT 2D.....	141
Figura 4.10 – <i>Upload</i> do arquivo do tipo .tif (raster) da bacia	142
Figura 4.11 – Criação do novo terreno	142
Figura 4.12 – Modelo digital do novo terreno.....	143
Figura 4.13 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Faveta.....	143
Figura 4.14 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Flamengos	144
Figura 4.15 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Figueira Gorda	144
Figura 4.16 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Poilão	145
Figura 4.17 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Saquinho	145

Figura 4.18 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Salineiro	146
Figura 4.19 – Conexão entre Albufeira-Barragem-Área de inundação a jusante (SA-Dam-2D Flow Area).....	150
Figura 4.20 – Delimitação da área de inundação – 2D Flow Area.....	150
Figura 4.21 – Definição e criação da malha (<i>mesh</i>)	151
Figura 4.22 – Definição das condições de contorno a montante: Barragem (hidrograph).....	151
Figura 4.23 – Definição das condições de contorno a jusante: Mar.....	152
Figura 4.24 – Introdução das condições de contorno no editor geométrico.....	152
Figura 4.25 – Cálculo e análise de dados	153
Figura 4.26 – Cálculo final.....	153
Figura 4.27 – Relações entre perigo, risco e vulnerabilidade.....	156
Figura 5.1 – Gestão operacional da segurança integrada Barragem/Vale.....	180
Figura 5.2 – Níveis de água de interesse para o planeamento da Proteção Civil	187
Figura 6.1 – Fluxograma da Metodologia	194
Figura 6.2 – Esquema para criação e execução de simulação da mancha inundação com o programa HEC-RAS.....	199
Figura 7.1 – Média anual de precipitações por Ilhas.....	203
Figura 7.2 – Localização geográfica de barragens em Cabo Verde	204
Figura 7.3 – Localização geográfica de Cabo Verde.....	205
Figura 7.4 – Características das principais bacias hidrográficas na Ilha de Santiago	210
Figura 7.5 – Amostra do solo (tarolos) extraída durante o ensaio de fundação	213
Figura 7.6 – Localização geográfica de barragem de Faveta e bacia hidrográfica de Ribeira de Picos	216
Figura 7.7 – Corte transversal da barragem de Faveta	219
Figura 7.8 – Localização geográfica da barragem e bacia hidrográfica de Figueira Gorda...	220
Figura 7.9 – Corte transversal da barragem da barragem de Figueira Gorda.....	223
Figura 7.10 – Corte transversal da barragem de Flamengos	225
Figura 7.11 – Corte transversal da barragem de Salineiro	229
Figura 7.12 – Localização geográfica de barragem de Saquinho e bacia de Charco	231
Figura 7.13 – Barragem de Saquinho vertendo	232
Figura 7.14 – Corte transversal pela superfície de referência da barragem de Saquinho.....	233
Figura 7.15 – Localização da barragem de Poilão e bacia hidrográfica da Ribeira Seca.....	234
Figura 7.16 – Barragem de Poilão – vista de jusante (à esq.) e vista de montante e albufeira (à dir.)	235

Figura 8.1 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Faveta	244
Figura 8.2 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Figueira Gorda.....	244
Figura 8.3 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Flamengos.....	245
Figura 8.4 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Poilão	245
Figura 8.5 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Salineiro.....	246
Figura 8.6 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Saquinho	246
Figura 8.7 – Barragem de Faveta - Tempo de Chegada (2.1 horas).....	247
Figura 8.8 – Barragem de Faveta - Velocidade (10.1 m/s).....	248
Figura 8.9 – Barragem de Figueira Gorda - Tempo de Chegada (1 hora).....	249
Figura 8.10 – Barragem de Figueira Gorda - Velocidade (8.9 m/s).....	250
Figura 8.11 – Barragem de Flamengos - Tempo de Chegada (1.7 horas).....	251
Figura 8.12 – Barragem de Flamengos - Velocidade (9 m/s).....	252
Figura 8.13 – Barragem de Poilão - Tempo de Chegada (7 horas)	253
Figura 8.14 – Barragem de Poilão - Velocidade (5.1 m/s)	254
Figura 8.15 – Barragem de Salineiro - Tempo de Chegada (0,35 horas)	255
Figura 8.16 – Barragem de Salineiro - Velocidade (14,5 m/s).....	256
Figura 8.17 – Barragem de Saquinho - Tempo de Chegada (0,71 horas)	257
Figura 8.18 – Barragem de Saquinho - Velocidade (11,44 m/s)	258
Figura 8.19 – Perfil transversal tipo de barragem gravidade.....	266
Figura 8.20 – Descarregador de cheias e tipo de Vertedouro (perfil Creager).....	268
Figura 8.21 – Descarga de Fundo	269
Figura 8.22 – Tomada de água	270
Figura 8.23 – Câmara de Válvula.....	271
Figura 8.24 – Legenda de equipamentos	272
Figura 8.25 – Estação Elevatória e Equipamentos	273
Figura 8.26 – Legenda da Estação Elevatória e Equipamentos.....	273
Figura 8.27 – Seção transversal típico da Galeria de Injeção e Drenagem	275

Figura 8.28 – Localização e Acesso às Barragens de Faveta, F. Gorda, Flamengos, Poilão e Saquinho	276
Figura 8.29 – Localização e Acesso à Barragem de Salineiro	277
Figura 8.30 – Fluxograma de Notificação	283
Figura 8.31 – Mapa de inundação da Barragem de Faveta	288
Figura 8.32 – Mapa de inundação da Barragem de Figueira Gorda.....	289
Figura 8.33 – Mapa de inundação da Barragem de Flamengos.....	290
Figura 8.34 – Mapa de inundação da Barragem de Poilão	291
Figura 8.35 – Mapa de inundação da Barragem de Salineiro.....	292
Figura 8.36 – Mapa da inundação da Barragem de Saquinho	293
Figura 8.37 – Fluxograma de Comunicações para divulgação de informações ao público ...	309
Figura 8.38 – Fluxograma do modelo de gestão proposto	328

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Distribuição de 61 casos de falhas por idade e tipo de barragem.....	41
Tabela 2.2 – Dados históricos da evolução de barragens	43
Tabela 2.3 – Classificação do dano Potencial em Função do valor do Índice de Dano Potencial (Idp)	50
Tabela 3.1 – Classes das barragens em função da ocupação humana e dos bens e ambiente no vale a jusante do barramento	67
Tabela 3.2 – Valores de ângulo de atrito na condição do coeficiente de segurança ser de 1,5 para o coeficiente de atrito.....	79
Tabela 3.3 – Valores de ângulo de atrito na condição do coeficiente de segurança ser de 1,5 para o coeficiente de atrito.....	80
Tabela 3.4 – Combinações de solicitações a considerar na verificação de seguranças para cenários correntes e de ruptura	105
Tabela 3.5 – Condições de verificação da segurança ao deslizamento na interface betão-rocha para cenários correntes e de ruptura	106
Tabela 3.6 – Causas da ruptura de barragens	109
Tabela 3.7 – Causas da ruptura de barragens no mundo	110
Tabela 3.8 – Classificação de acordo com categoria de dano	117
Tabela 4.1 – Estudos hidrológicos a desenvolver em função do porte da barragem.....	124
Tabela 4.2 – Elementos da modelagem usando o HEC-HMS.....	126
Tabela 4.3 – Média dos quocientes de repartição PD/P24 (coeficiente de repartição)	130
Tabela 4.4 – Coeficiente de Rugosidade da Fórmula de Manning para Arroios e Rios	148
Tabela 4.5 – Número esperado de vítimas em função de tempo de alerta	157
Tabela 5.1 – Níveis de perigo e os pesos respectivos.....	162
Tabela 5.2 – Peso da quantidade de NP em cada nível	163
Tabela 5.3 – Exemplo de Quadro utilizado para o cálculo da pontuação total do NPB.....	163
Tabela 5.4 – Classificação da Barragem adotada a partir do NPB.....	164
Tabela 5.5 – Periculosidade (P).....	164
Tabela 5.6 – Critérios de avaliação de vulnerabilidade (V)	165
Tabela 5.7 – Importância Estratégica (I)	166
Tabela 5.8 – Classificação quanto à classe de risco da barragem baseada no valor do PR....	166
Tabela 5.9 – Características Técnicas (CT).....	169
Tabela 5.10 – Estado de Conservação (EC)	169

Tabela 5.11 – Plano de Segurança da Barragem (PS)	170
Tabela 5.12 – Dano Potencial Associado (DPA)	171
Tabela 5.13 – Classificação das barragens segundo a metodologia do CNRH.....	172
Tabela 5.14 – Matriz de classificação de barragens	176
Tabela 5.15 – Conteúdo Mínimo e Nível de Detalhamento do Plano de Segurança de Barragem	176
Tabela 5.16 – Caracterização genérica de cenários que acionam os diversos níveis de alerta	185
Tabela 5.17 – Características do vale a jusante das barragens	192
Tabela 7.1 – Localização dos postos pluviométricos	209
Tabela 7.2 – Principais características das barragens em estudo	214
Tabela 7.3 – Principais características da bacia de Ribeira dos Picos.....	216
Tabela 7.4 – Principais características da bacia de Santa Cruz	220
Tabela 7.5 – Principais características da barragem de Flamengos	224
Tabela 7.6 – Principais características da bacia de Flamengos	225
Tabela 7.7 – Características da bacia hidrográfica dominada pela barragem do Salineiro	226
Tabela 7.8 – Principais características da bacia hidrográfica de Charco.....	230
Tabela 8.1 – Pontuação NPB das Barragens	237
Tabela 8.2 – Periculosidade (P) das barragens em estudo.....	237
Tabela 8.3 – Vulnerabilidade (V) das barragens em estudo.....	238
Tabela 8.4 – Importância Estratégica (I) das barragens em estudo	239
Tabela 8.5 – Classificação quanto à classe de risco baseada no valor de Potencial de Risco (PR) das barragens em estudo	239
Tabela 8.6 – Características Técnicas (CT) das barragens em estudo.....	240
Tabela 8.7 – Estado de Conservação (EC) das barragens em estudo	240
Tabela 8.8 – Plano de Segurança (PS) das barragens em estudo	240
Tabela 8.9 – Dano Potencial Associado (DPA) das barragens em estudo	241
Tabela 8.10 – Classificação das barragens segundo a metodologia do CNRH, Brasil	241
Tabela 8.11 – Matriz Categoria de Risco e Dano Potencial Associado	242
Tabela 8.12 – Resultados de simulação dos Hidrogramas de ruptura com o HEC-HMS	243
Tabela 8.13 – Tempos de chega e velocidades de onda de ruptura.....	259
Tabela 8.14 – Localização e Acessos às Barragens.....	276
Tabela 8.15 – Caracterização dos Níveis de Segurança	279

Tabela 8.16 – Definição de nível de alerta para ocorrências excepcionais ou circunstâncias anômalas	280
Tabela 8.17 – Telefones de Emergência.....	282
Tabela 8.18 – Procedimentos de Ação para situação de Prevenção Rigorosa (Amarelo).....	284
Tabela 8.19 – Procedimentos de Ação para situação de Alerta (Laranja).....	285
Tabela 8.20 – Procedimentos de Ação para situação de Emergência (Vermelho).....	286
Tabela 8.21 – Comportamento de Ondas de Cheia	287
Tabela 8.22 – Plano de Ação se notificada uma situação de ALERTA	306
Tabela 8.23 – Plano de Ação para situação de EMERGÊNCIA	307
Tabela 8.24 – Características do vale a jusante das barragens	314

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Associação de Agricultores
ABRHidro	Associação Brasileira de Recursos Hídrico
ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACRH	Associação Caboverdeana de Recursos Hídricos
ANM	Associação Nacional de Município
ANPC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
ANPCB	Autoridade Nacional de Proteção Civil e Bombeiro
ANSB	Autoridade Nacional de Segurança de Barragem
APRH	Associação Portuguesa de Recursos Hídrico
ANA	Agência Nacional de Águas
ANAS	Agência Nacional de Água e Saneamento
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CBGB	Comitê Brasileiro de Grandes Barragens
CHINCOLD	<i>Chinese National Committee on Large Dams</i>
CCSB	Comissão Consultiva de Segurança de Barragem
CMP	Cheia Máxima Provável (<i>Probable Maximum Flood</i>)
CSB	Comissão de Segurança de Barragem
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CM	Câmara Municipal
CMB	Comissão Moçambicana de Barragem
CMB	Comissão Mundial de Barragem
CNAS	Conselho Nacional de Água e Saneamento
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídrico

CNPGB	Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens
CRI	Critério de Risco
CSOPT	Conselho Superior de Obras Públicas e Transportes
COEDC	Centro de Operações de Emergência da Defesa Civil
COMDEC	Coordenadoria Municipal de Defesa Civil
COPAM	Conselho de Política Ambiental
COS	Centro de Operação do Sistema
CPLP	Cidades Capitais de Língua Oficial Portuguesa
CRED	<i>Centre for Research on the Epidemiology of Disaster</i>
CRPPHA	Comissão de Pilotagem de Programa Hidrológico para África
DAMSAFETY	Grupo de Discussão Virtual sobre Segurança de Barragens
DEFRA	<i>Department for Environment, Food & Rural Affairs</i>
DGAA	Direcção Geral de Agricultura e Ambiente
DMAA	Delegação do Ministério de Agricultura e Ambiente
DNA	Direcção Nacional de Ambiente
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DOE	<i>Department of Ecology</i>
DWAF	<i>Department of Water Affairs and Forestry</i>
DPA	Dano Potential Associado
DSO	<i>Dam Safety Office</i>
DSR	<i>Dam Safety Regulations</i>
EMA	<i>Emergency Management Australia</i>
EAP	<i>Emergency Action Plan</i>
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FEMA	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i>

IBC	Instituto Brasileiro de Concreto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD	<i>International Commission of Large Dams</i>
INAG	Instituto Nacional da Água de Portugal
INE	Instituto Nacional de Estatística
INMG	Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica
LEC	Laboratório de Engenharia Civil de Cabo Verde
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MAA	Ministério de Agricultura e Ambiente
MDR	Ministério de Desenvolvimento Rural
MDT	Modelo Digital do Terreno
MI	Ministério da Integração Nacional
NMC	Nível de Máxima Cheia
NME	Nível Máxima de Exploração
NPA	Nível de Pleno Armazenamento
NPB	Norma Portuguesa de Barragem
NRM	<i>Department of Natural Resources and Mines</i>
NWS	<i>National Weather Service</i>
ODM	Objectivo do Desenvolvimento do Milénio
ODS	Objectivo do Desenvolvimento Sustentável
PAE	Plano de Ações Emergenciais
PEB	Plano de Emergência de Barragens
PEE	Plano de Emergência Externo
PMF	<i>Probable Maximum Flood</i>
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PHI	Programa Hidrológico Internacional (sigla inglesa – HIP)

RSB	Regulamento de Segurança de Barragem
SANCOLD	<i>South African National Committee on Large Dams</i>
SBP	Sismo de Base de Projeto
SEDEC	Secretaria Nacional de Defesa Civil
SIG	Sistema de Informações Geográficas (QGIS – Quantum GIS ou SIG)
SINDEC	Sistema Nacional de Defesa Civil
SMP	Sismo Máximo de Projeto
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SNPCB	Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros
SMPC	Serviço Municipal de Proteção Civil
SRB	Subcomissão de Regulamento de Barragem
UN	<i>United Nations</i>
UNDRO	<i>United Nations Disaster Relief Organization</i>
USACE	<i>United States Army Corp of Engineers</i>
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
USCOLD	<i>United States Committee On Large Dams</i>
WASAG	<i>The Global Framework on Water Scarcity in Agriculture</i>
WCD	<i>World Commission on Dams</i>
ZAS	Zona de Auto Salvamento
ZEE	Zona Econômica Exclusiva
ZIP	Zona de Intervenção Principal
ZIS	Zona de Intervenção Secundária

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	26
1.1. Antecedentes.....	30
1.2. Objetivos.....	34
1.2.1. Objetivos específicos.....	34
1.3. Organização da Tese.....	35
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	38
2.1. Situação atual de Cabo Verde e uma visão internacional.....	38
2.1.1. Aspectos gerais.....	38
2.1.2. Contexto Histórico.....	42
2.2. Legislação sobre a segurança de barragem.....	44
2.2.1. Regulamento sobre a segurança de barragem de Cabo Verde.....	44
2.2.2. Legislação para a segurança de barragem no Brasil.....	51
2.2.3. Legislação para a segurança de barragem de Portugal.....	54
2.2.4. Legislação para a segurança de barragem de África do Sul.....	58
2.3. Comissão de Barragem.....	61
2.3.1. Comissão Internacional de Grandes Barragens.....	61
2.3.2. Comissão Moçambicana de Barragens.....	62
2.3.3. Comissão Mundial de Barragens (CMB).....	63
3. SEGURANÇA DE BARRAGEM DE GRAVIDADE.....	65
3.1. Aspectos gerais.....	65
3.2. Tipos Estruturais e Características de Barragem Gravidade.....	70
3.3. Forças atuantes e condições de estabilidade.....	74
3.4. Quantificação das Ações.....	84
3.4.1. Ações Gravíticas.....	85
3.4.2. Ações Térmicas.....	86

3.4.3. Ações Estáticas da água.....	88
3.4.3.1. Subpressões	88
3.4.4. Impulsos de Terras e de Sedimentos	96
3.5. Ações sísmicas	97
3.6. Verificação da Segurança.....	101
3.6.1. Verificação da segurança ao deslizamento e ao derrubamento	105
3.7. Ruptura de Barragens de Gravidade.....	106
4. MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA	123
4.1. Aspectos Básicos.....	123
4.2. Estudos Hidrológicos	124
4.2.1. Hietograma de Projeto	130
4.2.2. Hidrograma de cheia	134
4.2.3. Análise de risco hidrológico	137
4.2.4. Modelagem Hidráulica	140
4.2.5. Mapas de Inundação.....	154
4.2.5.1. Classificação de Mapa de Inundação	156
4.2.5.2. Formatação de Mapas de Inundação	157
4.2.5.3. Cenários de ruptura	159
4.2.5.4. Parâmetros da Brecha	160
5. GESTÃO DE RISCO E PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA	162
5.1. Análise, Avaliação e Gestão de Risco em Barragens	162
5.2. Plano de Ação de Emergência (PAE) - Mitigação de Risco em Barragem.....	172
5.2.1. Plano de Emergência Interno (PEI)	183
5.2.1.1. Detecção: Sistema de Identificação das Ocorrências Excepcionais e das Circunstâncias Anômalas	183
5.2.1.2. Tomada de Decisão	184
5.2.1.3. Notificação	186

5.2.2. <i>Plano de Emergência Externo (PEE)</i>	187
5.2.2.1. <i>Aviso</i>	188
5.2.2.2. <i>Evacuação</i>	188
5.2.3. <i>Estimativa de impacto no vale a jusante</i>	189
6. MATERIAIS E MÉTODOS	194
6.1. Revisão da legislação sobre Gestão de Segurança, Risco e Emergência de Barragem	195
6.2. Modelagem hidrológica no HEC-HMS	196
6.3. Modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS	198
6.4. Metodologia para elaboração do PAE	199
6.5. Sistema de Gestão de Segurança de Barragem	201
7. ESTUDO DE CASO: SEIS BARRAGENS EM CABO VERDE	202
7.1. Localização e Caracterização da área de estudo	202
7.2. Características gerais das barragens estudadas	210
7.3. Barragem de Faveta	215
7.4. Barragem de Figueira Gorda	219
7.5. Barragem de Flamengos	223
7.6. Barragem de Salineiro	226
7.7. Barragem de Saquinho	229
7.8. Barragem de Poilão	233
8. RESULTADOS E DISCUSSÃO	236
8.1. Classificação das Barragens em termos Potencial de Risco (PR), Critério de Risco (CRI) e de Dano Potencial Associado (DPA)	236
8.2. Hidrogramas de ruptura das barragens	242
8.3. Tempos de chegada e Velocidades de onda de inundação simulados no HEC-RAS	247
8.4. Plano de Ação de Emergência – PAE	259
8.4.1. Plano de Emergência da Barragem - PEB	260

8.4.2. <i>Plano de Emergência Externo (PEE)</i>	299
8.5. Proposta de um Sistema de Gestão de Segurança de Barragens para Cabo Verde com base na experiência internacional	315
8.5.1. <i>Introdução</i>	315
8.5.2. <i>Sistema de Gestão de Segurança de Barragens para Cabo Verde</i>	323
8.5.3. <i>Validação do modelo proposto</i>	329
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	330
9.1. Recomendações para desenvolvimentos futuros	334
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	338
APÊNDICES	350
APÊNDICE A – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NO HEC-HMS	351
ANEXOS	357
ANEXO A – EXEMPLO DE PLANO DE EVACUAÇÃO E ROTAS DE FUGA	358
ANEXO B1- MODELO DE MENSAGEM NOTIFICAÇÃO	366
ANEXO B2 – MODELO DE RELATÓRIO DE FINAL DE EMERGÊNCIA	367
ANEXO C – DIVULGAÇÃO, TREINAMENTO E ATUALIZAÇÃO DO PEB	369
ANEXO D – RESPOSTA A POSSÍVEIS CONDIÇÕES EMERGENCIAIS	370
ANEXO E – PERFIS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DE FUNDAÇÃO DAS BARRAGENS	373
ANEXO F – CORTES LONGITUDINAIS DAS BARRAGENS	377

1. INTRODUÇÃO

Os fenômenos extremos, como as secas e as cheias, tem impactos negativos sobre as civilizações e afetam diretamente as economias e os ecossistemas, desde a escala local, as escalas regionais e internacional. Para enfrentar aqueles fenômenos, prevenindo a degradação dos ecossistemas e os impactos dos desastres naturais, a sociedade foi dando resposta, desenvolvendo medidas de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Conforme a Organização das Nações Unidas (ONU) na sua agenda 2030, a Organização para o Desenvolvimento Sustentável (ODS6, 2030), assegura que até 2030 deve-se implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis, inclusive via cooperação transfronteiriça, conforme apropriado, ampliar a cooperação internacional e o apoio à capacitação para os países em desenvolvimento em atividades e desenvolver programas relacionados à água e saneamento, incluindo a coleta de água, a dessalinização, a eficiência no uso da água, o tratamento de efluentes, a reciclagem e as tecnologias de reuso e apoiar e fortalecer a participação das comunidades locais, para melhorar a gestão da água e do saneamento.

Em 2019, Cabo Verde foi sede de três eventos internacionais em matéria da gestão de recursos hídricos. As discussões durante o 1º Fórum Internacional da WASAG sobre Escassez de Água na Agricultura, em Março, concluíram que a gestão sustentável, equitativa e eficaz da água para a agricultura, bem como a importância de ecossistemas saudáveis e dos seus serviços para sistemas agrícolas sustentáveis, são fatores essenciais para a realização da Agenda 2030 e do Acordo de Paris.

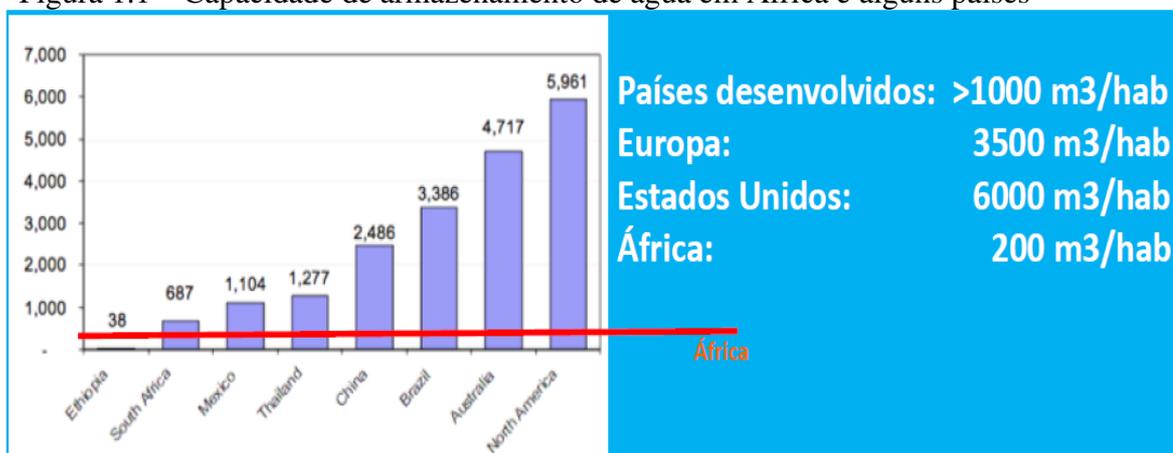
Em Setembro, a Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), a Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro), a Associação Caboverdiana de Recursos Hídricos (ACRH), a Associação Aquashare Moçambique, em colaboração com uma Comissão Organizadora Local de Angola e representantes dos Estados membros da CPLP, co-organizaram o 14º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa que teve como objetivo: Promover o avanço do conhecimento, intercâmbio de ideias e de experiência nos domínios da Hidráulica e dos Recursos Hídricos e estimular ações de formação, de investigação e de desenvolvimento de interesse comum.

Em Outubro, foi a vez de VII reunião do Comité Regional de Pilotagem do Programa Hidrológico para a África, que decorreu durante três dias, na cidade da Praia, com o

objetivo de debater os principais desafios do sector dos recursos hídricos no continente Africano. As conclusões e recomendações saídas destes eventos são para cumprir e atingir ODS agenda 2030, em especial o objetivo do ODS6.

Os princípios da Governança da água da OCDE e na Comunidade dos Países de Língua Portuguesa (CPLP), refere que a segurança hídrica requer um desenvolvimento inteligente e conjunto de infraestruturas e instituições, porque as infraestruturas garantem a segurança hídrica que é indispensável para um desenvolvimento económico e social inclusivo e equitativo (Correia e Varela, 2019). Referiu ainda, que a capacidade de armazenamento de água através destas infraestruturas é fundamental para garantir a segurança hídrica, conforme ilustrada na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Capacidade de armazenamento de água em África e alguns países



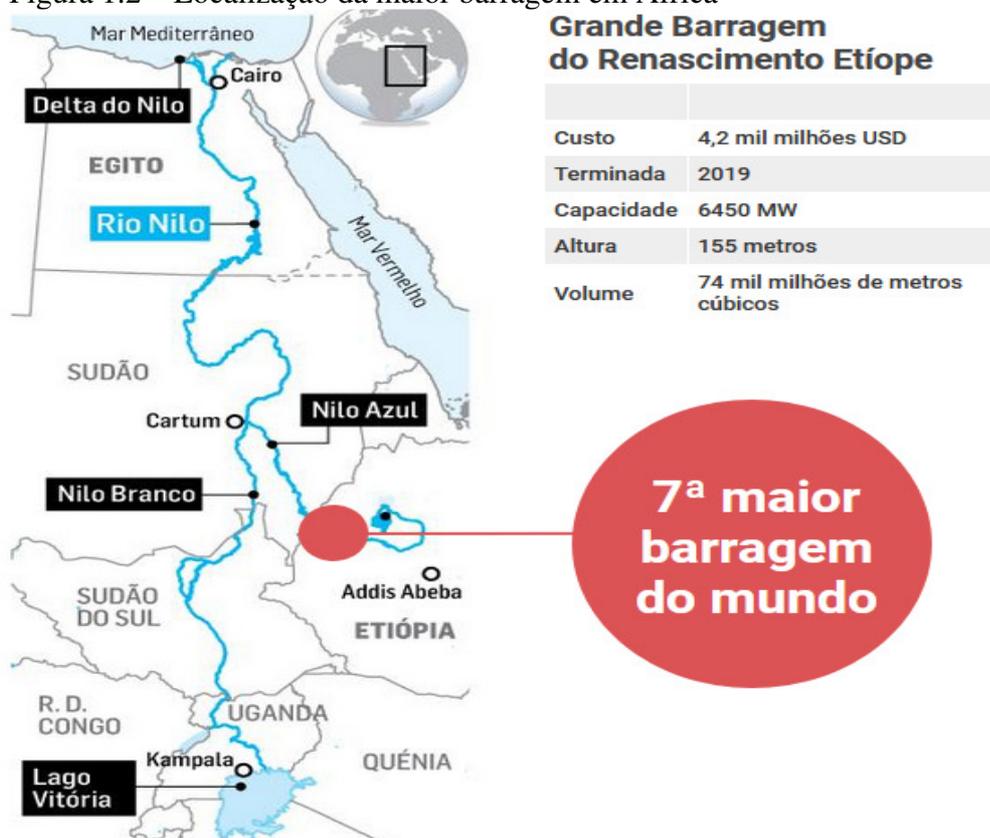
Fonte: Adaptado de Correia e Varela (2019).

A seca que devastou a região do Sahel na década de 1970 alertou a comunidade internacional para os problemas relacionados com os recursos hídricos na África Ocidental, originando a que se levassem a cabo iniciativas para assegurar que a informação hidrológica aí existente estivesse disponível. Até então, a importância dessa informação era subestimada e os organismos responsáveis pela sua coleta trabalhavam com orçamentos irrealistas e recursos inadequados. Como resultados, organizaram-se missões de cooperação internacional e regional com objetivo de recolher e gerir dados hidrológicos e promover o planeamento dos recursos hídricos (UN-Water/Africa, 2006).

Para aumentar a disponibilidade hídrica, a Etiópia tem hoje a maior barragem de África, que é a sétima maior barragem do mundo, que irá beneficiar os países da região, como Sudão, Eritreia, Djibuti e Quênia. Esta enorme e grande barragem hidroelétrica, construída no

principal afluente do rio Nilo, o Nilo Azul, tem um volume de 74 mil milhões de metros cúbicos, uma altura de 155 metros, uma albufeira de 1572 km² e uma capacidade de produção de 6450 MW de energia, cuja localização se encontra ilustrada na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Localização da maior barragem em África



Fonte: Morais (2018).

Os últimos anos têm sido marcados pela ocorrência de eventos hidrológicos extremos cada vez mais intensos, com secas e enchentes mais frequentes, que têm atingido vários países, incluindo Cabo Verde. A escassez de água tem atingido mais de 40 por cento de população no mundo, um número que irá crescer com aumento de temperatura.

Este fenómeno, a mudança dos padrões climáticos, é um dos maiores desafios do nosso tempo, pois ameaçam a produção de alimentos e aumenta o risco de inundações catastróficas em escala global e sem precedentes. (IPCC/OMM/UN).

Na literatura especializada no tema de barragens, não se encontrou um trabalho com um tema igual ou semelhante feito específico para barragens em Cabo Verde. Portanto trata-se de um trabalho com poucas publicações académicas no nosso país e inédito, e de um tema com bastante relevância científica para o nosso país, poderá auxiliar e orientar os operadores e as

autoridades ligadas à gestão de barragens na tomada de decisão, sobretudo em termos de termo de referência, estudos e elaboração de projetos, classificação das barragens em termos de Potencial de Risco (PR), Classe de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) e elaboração de Planos de Ação de Emergência (PAE) e o seus impactos no vale a jusante. Além do mais, não existe uma legislação sobre segurança de barragens em Cabo Verde e nem normas técnicas com suficiente clareza e detalhe sobre a concessão dos projetos, a observação e inspeção e a segurança relativas às barragens.

Considerando também, que se verifica uma grande falta de coordenação entre os diversos intervenientes com poderes em matéria gestão de recursos hídricos e de infraestruturas hidráulicas, com sobreposição de competências nessas matérias, e com ausência de sistema de coleta e compartilhamento de informações relevantes que permitam uma visão global e uma gestão integrada sobre esta matéria.

Não existe também (não de forma objetiva e clara) um organismo público que seja responsável pela segurança das obras hidráulicas em Cabo Verde, valor essencial, particularmente quando se trata de grandes obras. Este trabalho irá preencher esta lacuna existente e contribuir para orientar a engenharia nacional sobre a gestão e segurança de barragens e que pode contribuir de uma forma decisiva para aprovação da Lei sobre Segurança de Barragens, cuja proposta se encontra elaborada e apresentada ao Ministério de Agricultura e Ambiente que é representante oficial do Governo pela questões que envolvem segurança barragens.

Os métodos desenvolvidos e propostos neste trabalho, tanto no âmbito das próprias barragens quanto no âmbito dos vales a jusante, integra-se em um tema que tem a sua importância cada vez mais reconhecida em Cabo Verde, a nível nacional, mas também a nível do Brasil e outros países do mundo, não só pelo interesse científico, já que envolve inúmeros domínios de conhecimento tais como geotecnia, hidrologia, hidráulica, comunicação social, engenharia civil e de estruturas e proteção civil, mas também pela contribuição ao planeamento relativo à segurança dos vales a jusante de barragens. Por outro lado, as recentes rupturas de barragens ocorridas no Brasil e no mundo têm despertado autoridades e opinião pública que exigem maior comprometimento dos responsáveis pela segurança dessas estruturas e dos vales a jusante.

1.1. Antecedentes

Consciente dos problemas naturais e de carência hídrica e, como Cabo Verde se insere no grupo dos países do mundo com menos recursos hídricos, o Governo de Cabo Verde negociou o financiamento dentro de um programa de médio e longo prazo para elaboração dos estudos e projetos de possíveis obras de barragens em vinte e um locais pré-selecionados de quatro ilhas com potencial agrícola, para, seguidamente, selecionar dez destes locais, para os quais serão então elaborados estudos mais detalhados com vista a construção das respetivas barragens. A Figura 1.3 apresenta as barragens construídas na Ilha de Santiago usadas como caso de estudo.

Figura 1.3 – Vistas das barragens em estudo



Fonte: Acervo pessoal do Autor.

Com esse programa do Governo, a Ilha de Santiago tem hoje sete barragens (Barragem de Poilão, Barragem de Salineiro, Barragem de Faveta, Barragem de Figueira Gorda, Barragem de Saquinho, Barragem de Flamengos e barragem de Principal) construídas, bem como as Ilhas de Santo Antão (Barragem de Canto Cagara) e de São Nicolau (Barragem de

Banca Furada) que contam também com uma barragem cada, já construídas, sendo a primeira barragem, a de Poilão, na Ilha de Santiago cujos estudos, projetos, construção e fiscalização foram financiados pelos Chineses, no ano de 2006.

A elaboração do Plano de Ação Nacional para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos, designada por PAGIRE, inscreve-se no âmbito dos compromissos internacionais assumidos pelo Estado de Cabo Verde no decurso da Cimeira sobre o Desenvolvimento Sustentável de 2004, realizada em Joanesburgo, em que a Comunidade Internacional se engajou a ajudar os países do Sul na elaboração dos seus Planos Nacionais de Gestão dos Recursos Hídricos como condição necessária para implementação das ações conducentes à consecução dos Objetivos do Desenvolvimento do Milénio (ODM).

Na sequência de um processo participativo iniciado em 2006 sob a liderança do Instituto Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (INGRH), foi posto em execução um projecto cujo objectivo mais importante é a elaboração desse documento estratégico e orientador da política de água para os próximos dez anos e que agora é apresentado ao Conselho Nacional de Águas – CNAG - para análise e aprovação (PAGIRE, 2010).

Na Figura 1.4, se ilustra a barragem de Salineiro, uma das sete barragens construídas na Ilha de Santiago em Cabo Verde.

Figura 1.4 – Barragem de Salineiro durante a construção (à esq.) e concluída (à dir.)



Fonte: Acervo pessoal do Autor.

Ainda em 2010, no âmbito do plano de construção das barragens em Cabo Verde e dentro de Convénio de Cooperação entre o LEC, INGRH (atualmente ANAS) e o LNEC com apoio da Cooperação Portuguesa através do IPAD, realizou o primeiro curso sobre segurança de barragens cujo objetivo fundamental era a troca de experiência entre Engenheiros Cabo-

Verdianos e Engenheiros portugueses do LNEC que já detinham uma vasta experiência nacional e internacional nesta área.

A estruturação do curso e forma de apresentação das matérias decorre inevitavelmente da experiência portuguesa no projeto, construção e exploração de barragens e do papel que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal tem desempenhado neste âmbito. O curso têm o objetivo básico de trazer aos técnicos caboverdeanos a problemática da engenharia de barragens, particularmente do controlo de segurança destas obras, no momento em que Cabo Verde se prepara para iniciar um ambicioso plano de construção de barragens (Ramos *et al.*, 2010).

Com a elaboração do Plano Diretor dos Recursos Hídricos, PAGIRE e mais tarde complementada com Plano Estratégico de Água e Saneamento (PLENAS), o Governo de Cabo Verde criou estratégia para resolução de questões determinantes que não podem ser songadas em que o caminho deve ser o da enorme melhoria da forma de aproveitamento dos recursos hídricos, com a consciência de que a água potável se tornará no nosso século um bem escasso.

Devido ao desenvolvimento urbano e o crescimento das necessidades em água para consumo, irrigação, turismo, indústrias e outras necessidades provocaram situações de carência e necessidade hídrica neste país arquipelágico, com tendência para o seu agravamento no espaço e no tempo. A água é um recurso, tanto pela sua quantidade como pela sua qualidade, condicionante do desenvolvimento económico e do bem-estar social de Cabo Verde.

As questões ligadas à utilização dos recursos hídricos do país, por serem muito escassos e importantes, desde muito cedo foram consideradas prioritárias, a fim de se conseguir construir o novo quadro de gestão deste recurso natural.

A construção de barragens a nível nacional para assegurar o armazenamento de água durante o período das chuvas em que serão utilizados em outros períodos, sobretudo nos da insuficiência e carência hídrica, cria uma sustentabilidade da água para agricultura e uso doméstico e contribui grandemente para o desenvolvimento económico do país.

Como, apesar de que Cabo Verde teve a sua primeira barragem construída em 2006 por uma empresa chinesa, até 2011 ainda não havia experiência de construção de barragens por Engenheiros e empresas caboverdeanas. Por isso os projetos, a construção e o controle de segurança destas obras obedeceram às normas mais recentes da engenharia de barragens, objeto de legislação específica em muitos países, entre os quais Brasil, Portugal e outros países mais desenvolvidos.

Mas, o mais importante naquele período, é que as grandes barragens construídas na ausência de leis e regulamentos próprios de Cabo Verde tenham em conta as condições específicas do clima, da orografia, da geologia, da geotecnia, dos materiais de Cabo Verde.

Questões como o regime pluviométrico, a grande erodibilidade dos solos e consequentemente o eventual assoreamento rápido das albufeiras, ou a dificuldade da obtenção de areias adequadas, ou ainda o uso nos concretos de agregados que possam exigir medidas preventivas para evitar reações químicas adversas e, certamente, todos os aspetos que tenham a ver com o criterioso estudo das fundações e com o seu tratamento, se necessário, devem ser levadas em conta desde a fase de projeto.

Julga-se, portanto, importante estabelecer uma análise de risco de ruptura das barragens em Cabo Verde (pioneira, específica e plenamente aplicável às barragens destas Ilhas, um país caracterizado pela insegurança e carência de recursos hídricos) para a priorização de um conjunto de barragens a partir de inspeções periódicas visando à eliminação do perigo a um nível de risco aceitável pela sociedade levando em conta critérios de eficiência financeira e econômica com base no risco, bem como propiciar uma apresentação objetiva para a tomada de decisão pelos proprietários.

As barragens induzem riscos e, em caso de acidente, podem gerar efeitos e consequências graves. Quando tais situações ocorrem, é necessário atenuar as consequências, sendo fundamental socorrer as pessoas e proteger os bens em perigo.

Conforme ANA (2016), no Brasil, a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e a CNRH de 2012, estipulam, como um dos instrumentos desta política, o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de classificação de barragens.

Para as barragens classificadas como de dano potencial associado (DPA) médio e alto, este documento legal obriga os empreendedores a avaliar as consequências adversas no caso de ruptura ou falha operacional da barragem, aspecto que obriga à modelação de cheias induzidas e ao mapeamento das zonas de risco a jusante e estipula, como um dos instrumentos desta política, a elaboração do Plano de Segurança da Barragem, que deve em determinados casos, conter o PAE.

Assim, a Entidade Fiscalizadora poderá determinar a elaboração do PAE em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem, devendo exigi-lo sempre para

a barragem classificada como de dano potencial associado alto, em observância ao Art. 11 da Lei nº 12.334/2010.

O PAE é um documento que deve ser adaptado à fase de vida da obra, às circunstâncias de operação e às suas condições de segurança. É, por isso, um documento datado que deve ser periodicamente revisado, nomeadamente, sempre que haja lugar a alterações dos dados dos intervenientes e, ainda, na sequência da realização de exercícios de teste ou da ocorrência de situações de emergência, que justifiquem alterações ao plano. A revisão e atualização do PAE é da responsabilidade do Empreendedor e deve ser atualizado, de preferência anualmente, sendo incluídas as novas informações e removidos os dados desatualizados e/ou incorretos. As folhas corrigidas deverão ser anotadas adequadamente em seu rodapé e suas cópias serão distribuídas para todas as entidades que participem do PAE e tenham em seu poder uma cópia para uso.

1.2. Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo geral propor um Modelo de Gestão de Segurança de Barragem incluindo as diretrizes básicas para elaboração de um Plano de Ação Emergencial (PAE) para Ilha de Santiago, Cabo Verde.

1.2.1. *Objetivos específicos*

Como objetivos específicos deste trabalho podem ser citados:

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente que permita o entendimento das etapas inerentes à análise, gestão e mitigação de risco de ruptura de barragens de concreto e gravidade;
- Realizar a modelagem hidrológica e hidráulica das seis barragens selecionadas para aplicação da metodologia na Ilha de Santiago, Cabo Verde;
- Apresentar aspetos gerais da legislação sobre segurança de barragens: Situação atual de Cabo Verde e uma visão internacional;

- Apresentar aspetos gerais de legislação sobre risco de ruptura das barragens em Cabo Verde (RSBCV) e compará-la com legislação de outros países (Brasil, Portugal, África do Sul e ICOLD);
- Classificar as barragens por categoria de risco e dano potencial associado;
- Elaborar um mapa de inundação de vale a jusante e plano de ação de emergência (PAE) das seis barragens em estudo;
- Avaliar os riscos do rompimento das barragens para a população de jusante; e
- Apresentar uma proposta de gestão de segurança de barragens para Cabo Verde com base na experiência internacional.

1.3. Organização da Tese

Este trabalho está estruturado em nove capítulos. O capítulo um, se refere à **Introdução**, onde se descreve o conteúdo da pesquisa, os antecedentes, a justificativa para o trabalho realizado, objetivos geral e específico que orientaram a realização e programação deste trabalho, assim como a forma como está organizado o texto.

No capítulo dois, **Revisão Bibliográfica**, é apresentada uma extensa pesquisa bibliográfica sobre aspetos e casos históricos de segurança de barragem com gestão de emergência nos vales a jusante. Apresentou-se neste capítulo ainda, uma proposta de legislação de segurança de barragem em Cabo Verde, ainda não aprovada e legislação e outros países com experiência na gestão e segurança de barragem, tais como Brasil, Portugal, África do Sul e outros.

No capítulo três, **Segurança de Barragem de Gravidade**, foi desenvolvido os critérios de dimensionamento estrutural e segurança de barragem gravidade. Foi também, descrito os aspetos relevantes de estabilidade e verificação de segurança das barragens gravidade, incluindo as ações consideradas no dimensionamento, modos de ruptura, as subpressões nas fundações de barragem gravidade.

No capítulo quatro, **Análise hidrológica e Hidráulica**, foi descrito e apresentado os parâmetros e elementos considerados nas duas análises, sobretudo o recurso ao software HEC-HMS e HEC-RAS. As situações tais como período de retorno, tempo concentração, características de bacias hidrográficas e outros parâmetros do projeto que serviram de base a análise hidrológica e hidráulica.

No Capítulo cinco, **Gestão de Risco e Plano de Ação de Emergência**, foram discutidos os conceitos sobre avaliação e gestão de riscos e de emergências e como foi a sua evolução nos países pesquisados. Esse capítulo trata ainda de aspectos da legislação pertinente ao tema. A ênfase é sobre a classificação de barragens e do risco, as responsabilidades por cada fase do processo e pela segurança das barragens e do vale. Ainda é feita uma breve introdução aos Planos de Atendimento a Emergências onde se justifica a necessidade de dividi-los em Plano de Emergência da Barragem e Plano de Emergência Externo (à barragem). A revisão dos elementos que compõem cada plano foi estruturada em tópicos previamente definidos.

No Capítulo seis, **Materiais e Métodos**, são apresentados os métodos utilizados para realizar a revisão bibliográfica e consolidar as informações obtidas a fim de compor a base metodológica para elaboração de planos de emergências de barragens e vales a jusante. Em seguida são propostos passos a serem seguidos na elaboração dos respectivos planos. Esse capítulo trata ainda dos métodos de classificação das barragens em estudo com base na CNRH de 2012 e na lei 12.334/2010 e aplicação dessas metodologias para um sistema de gestão de segurança de barragem proposta aplicado à Cabo Verde com base na experiência Internacional.

No capítulo sete, **Estudo de caso das seis barragens em Cabo Verde**, foram apresentadas características técnicas específicas das seis barragens que tem a ver com bacias hidrográficas, critérios do projeto, dados técnicos da estrutura, albufeira descrevendo as principais órgãos hidráulicos e estruturas associadas. Aqui foram descritas ainda estudos relevantes como a precipitação, hidrogeologia, aspetos geológico-geotécnicos e de morfologia.

No capítulo oito, **Resultados e Discussão**, os métodos são efetivamente aplicados. São apresentados a classificação das seis barragens em termos Perigo de Risco (PR), Critérios de Risco (CRI) e de Dano Potencial Associado (DPA), são apresentados os Planos de Ação de Emergência (PAE), cujo desenvolvimento e aplicação são através de Plano de Emergência da Barragem (PEB) e Plano de Emergência Externo (PEE), com caracterização dos vales a jusante apresentando o número de vítimas mortais. Seguidamente são apresentados um modelo de sistema de gestão de segurança de barragem, que pode ser aplicado às barragens em Cabo Verde, com base em experiência internacional.

No Capítulo nove, **Considerações Finais**, são apresentadas as conclusões deste trabalho e algumas recomendações para estudos futuros.

Enfim, nas **Referências Bibliográficas**, são apresentados a relação, em ordem alfabética, dos autores citados ao longo do texto, e mais adiante, apresentados os Anexos deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Situação atual de Cabo Verde e uma visão internacional

2.1.1. Aspectos gerais

As barragens e as albufeiras continuam a ter um papel fundamental no aproveitamento de recursos hídricos e conseqüentemente na qualidade de vida humana. Como muitas outras construções feitas pelo homem no mundo, ambas se tornam parte do ambiente em que se integram, influenciando-o e transformando-o de uma forma e num grau que varia com a dimensão e a natureza de cada projeto.

Por outro lado, as barragens, ao mesmo tempo em que desempenham o papel de regularizar os rios, amortecer ondas de cheias, armazenar água para abastecimento humano e propiciar o uso de água na agricultura e na geração de energia hidrelétrica, devem ser capazes de suportar condições adversas, sem potencializar os efeitos das enchentes.

De acordo com ICOLD (1997) muitas vezes aparentemente em oposição, barragens e ambiente interagem de forma complexa. A solução deve ser procurada no equilíbrio entre objetivos muitas vezes divergentes, por vezes contraditórios, mas não necessariamente irreconciliáveis. Para além dos três requisitos clássicos – exequibilidade técnica, econômica e financeira, os projetos de barragens devem responder hoje a um quarto requisito, a sua aceitação social e política. Hoje, o fator decisivo para esta aceitação social e política é a sua compatibilidade com o ambiente.

Na realidade, entre as diversas formas que o ser humano tem utilizado para o necessário aproveitamento dos recursos hídricos, as barragens e particularmente as grandes barragens (obras com mais de 15 m de altura, ou com uma albufeira de volume superior a 1×10^6 m³ - ICOLD) são das que causam maiores impactos ambientais, havendo muitos rios, designadamente nos países mais industrializados, que hoje não são mais que um conjunto de canais a ligar reservatórios.

Entre os impactos ambientais mais graves conta-se a profunda modificação dos ecossistemas, essenciais à vida de muitas espécies aquáticas e terrestres, a liberação natural de dióxido de carbono e de metano para a atmosfera, contribuindo assim para o efeito estufa, embora de forma limitada, e a retenção de sedimentos, impedindo o seu caminho até às zonas costeiras, com a conseqüente redução, por vezes muito significativa, de recursos agrícolas e piscícolas (RAMOS *et al.*, 2010).

Estas questões são incontornáveis e devem ser tidas em conta quer no planeamento de todos os novos aproveitamentos, quer na exploração e manutenção dos existentes, havendo, frequentemente, medidas de minimização dos impactos ambientais que podem e devem ser implementadas (FONSECA, 2009).

Por outro lado, é também incontornável a enorme importância que as barragens têm na qualidade da vida humana, constituindo a principal fonte de água doce armazenada. As barragens servem, mais que tudo, para armazenar água em períodos chuvosos, para que possa ser fornecida em período de escassez. Em muitos casos, o abastecimento de água a grandes cidades, depende hoje quase exclusivamente da água armazenada em albufeiras.

De uma forma aproximada sabemos que a população mundial consome atualmente 3.500 km³ de água por ano. Deste volume, 8% são gastos no uso doméstico, enquanto a irrigação gasta 69% e a indústria (produção de energia), 23%.

Cerca de 35% da população mundial tem uma reserva de água potável entre baixa ou extremamente baixa, mais de um bilião de seres humanos não dispõe de água salubre e 25 mil pessoas morrem diariamente devido à má qualidade da água que usam.

Nove países dividem entre si cerca de 60% das fontes renováveis de água doce do mundo (FIGURA 2.1). Segundo Ramos *et al.* (2010), são, em ordem decrescente de quantidade hídrica: Brasil (6.220 km³), Rússia (4.059 km³), Estados Unidos (3.760 km³), Canadá (3.290 km³), China (2.800 km³), Indonésia (2.530 km³), Índia (1.850 km³), Colômbia (1.200 km³), e Peru (1.100 km³).

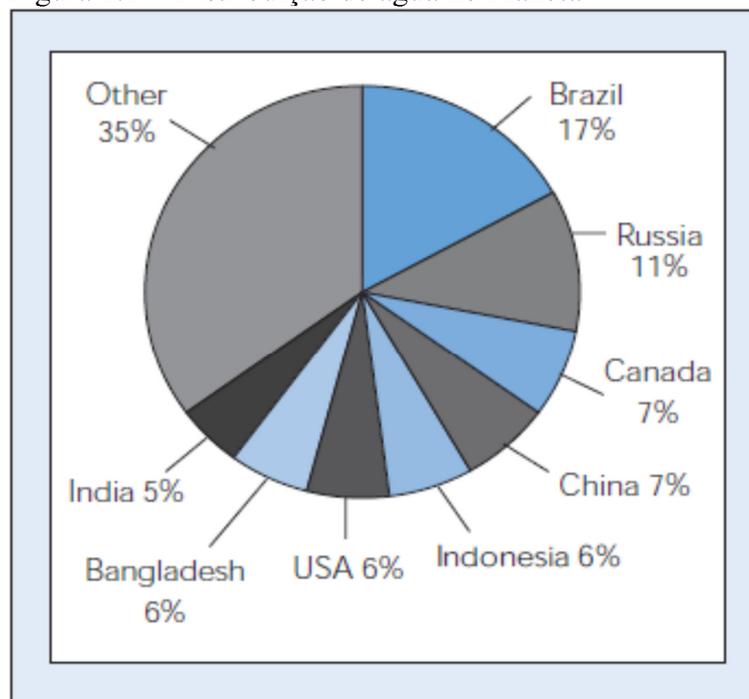
Os grandes consumidores de água (somando todos seus usos) em km³ por ano são: Índia (552), China (500), Estados Unidos (467), União Europeia (245), Paquistão (242) e Rússia (136). Estes números globais não traduzem o consumo por cidadão em cada país, que é muito maior nos Estados Unidos.

Do outro lado, estão os países em situação muito precária como: Kuwait e Bahrain (quase sem recursos), Malta, Gaza, Emirados Árabes Unidos, Líbia, Singapura, Jordânia, Israel e Chipre e muitos outros países como Cabo Verde, onde embora os recursos existam, seu aproveitamento adequado é muito limitado.

Estas são questões determinantes que não podem ser songadas e o caminho deve ser o da enorme melhoria da forma de aproveitamento dos recursos hídricos, com a consciência de que a água potável se tornará no nosso século um bem escasso (RAMOS *et al.*, 2010). Estes países vulneráveis (Oriente Médio e grupo dos países Africanos que fazem parte do deserto do Saara), já sentem os efeitos do aquecimento global. Não há mais chuvas e os termômetros

registram altas recordes de temperatura, que afetam a produção de alimentos e deixam sedenta a população (IPCC/OMM/UN).

Figura 2.1 – Distribuição de água no Planeta

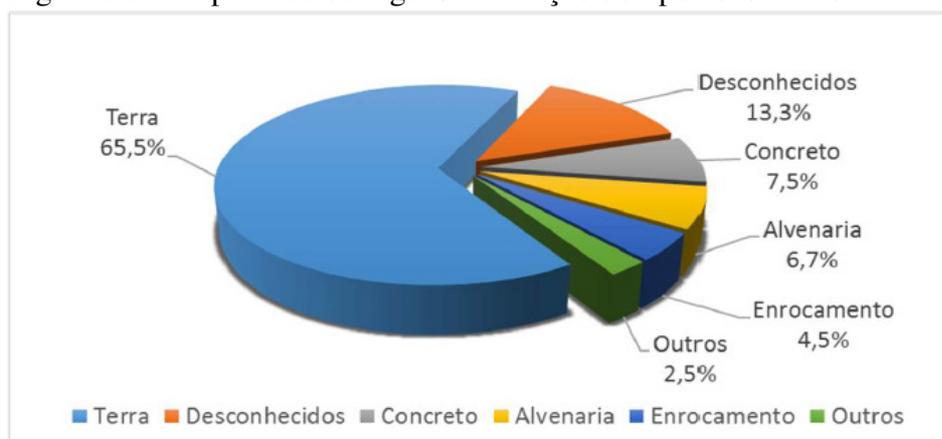


Fonte: WCD (2000).

Segundo JAUHARI (1999), que se apoia nos estudos estatístico da Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD), 2,2% de todas as barragens construídas até 1950 e 0,5% das construídas após este ano, terão atingido à ruptura. Em outras palavras, o risco atual de ruptura de uma grande barragem a cada ano, admitindo a existência de cerca de 50.000 destas obras (conforme ilustrado na figura 2,2 a seguir), com um período médio de vida útil de 50 anos, é de cerca de 1 por 10.000, ou seja, cinco barragens por ano.

Infere-se dos dados de recorte estatístico que a probabilidade de ruptura tem diminuído, em consequência de grandes melhorias no projeto, construção e controlo de segurança das obras, mas também se infere que continuam a romper grandes barragens, causando enormes perdas de vidas humanas e de bens. A Figura 2.2 apresenta as estatísticas de ruptura de barragens em função do tipo construtivo e na Tabela 2.1 eatão ilustradas a distribuição de 61 casos de falhas por idade e tipo de barragem.

Figura 2.2 – Ruptura de barragens em função do tipo construtivo



Fonte: Adaptado de ISGSR (2007).

Tabela 2.1 – Distribuição de 61 casos de falhas por idade e tipo de barragem

Tipo de Barragem	Durante a construção	Primeiros cinco anos	Depois de cinco anos	Total
De todos os tipos	13 (21,3%)	13 (21,3%)	35 (57,4%)	61 (100%)
Terra/Enrocamento	11	9	23	43 (70,5%)
Concreto Gravidade/Arco	2	2	11	18 (29,5%)
Contrafortes/Arcos múltiplos	0	2	1	0 (0,0%)

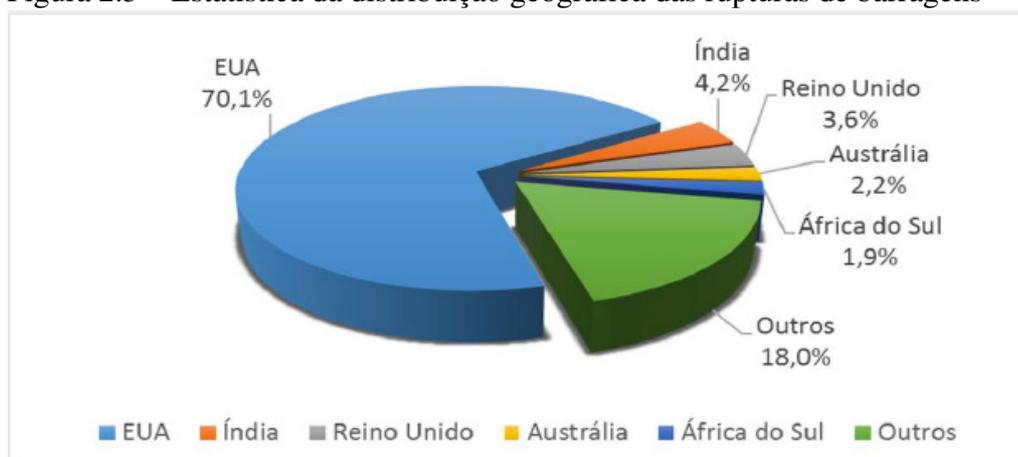
Fonte: Adaptado de Serafim e Cavilhas (1984).

A consciência da importância destes factos, aliada aos acidentes e incidentes verificados (USCOLD, 1988), e por serem as barragens obras cuja construção e equipamentos instalados requerem sempre elevados investimentos e que exigem, em regra, face às condições ambientais particulares, frequentes ações de manutenção ao longo da sua vida útil, tem levado os organismos internacionais que atuam nesta área, designadamente a ICOLD, à elaboração de recomendações que referem frequentemente a necessidade dos países e os governos criarem capacidade institucional na área do controlo de segurança de barragens.

Estas recomendações têm tido reflexo em muitos países na elaboração de regulamentação apropriada e na criação de estruturas competentes votadas ao controlo da segurança e avaliação de condições de funcionalidade das grandes barragens.

A experiência mundial mostra que os custos necessários à garantia da segurança de uma barragem são pequenos, se comparados com aqueles que se seguem em caso de ruptura. (MENESCAL, 2009). Na Figura 2.3, é apresentada a estatística de distribuição geográfica de ruptura de barragens.

Figura 2.3 – Estatística da distribuição geográfica das rupturas de barragens



Fonte: Adaptado de ISGSR (2007).

2.1.2. Contexto Histórico

A construção de barragens pelos humanos para aproveitamento dos recursos hídricos começou há vários milhares de anos, havendo registos de obras construídas há 4.000 anos em diversos países do mundo, entre os quais o Egito, a China e a Mesopotâmia.

Conforme Ramos *et al.* (2010), a barragem mais antiga de que se tem conhecimento é a barragem de Jawa, na Jordânia, situada a cerca de 100 km de Aman, que terá sido construída cerca de 3000 a.C. Outra das barragens mais antigas de que há notícia é a barragem de Sadd Al-Kafara, no Egito, construída há cerca de 4.000 anos.

Tratou-se certamente de um feito de engenharia, mas também de uma história de desastre. Datando de antes da construção das Pirâmides, teria 10 a 15 m de altura e foi destruída por uma cheia, devida a precipitação intensa, imediatamente após a sua construção. A experiência foi tão traumática que os egípcios levaram muito tempo até decidirem construir uma nova barragem.

A barragem mais antiga ainda operacional, deverá ser a barragem de Quatinath, na moderna Síria, tendo sido construída cerca de 1300 a.C. e, posteriormente, alteada primeiro no período de ocupação romana e mais recentemente, entre 1934 e 1938. Ainda abastece de água a cidade de Homs. Os romanos foram grandes construtores de barragens, com muitas obras sobrevivendo quase intactas até hoje, como é o caso da barragem de Mérida, em Espanha.

Desde a construção das primeiras barragens, há portanto, cerca de 5.000 anos, o seu número nunca parou de aumentar, havendo hoje em todo o mundo cerca de 50.000 grandes barragens (mais de 15 m ou mais de 1 milhão de m³ de volume da albufeira) e cerca de 1.600

barragens em construção. Na Tabela 2.2, são apresentados alguns dados históricos da evolução de barragens ao redor do mundo.

As barragens de terra eram homogêneas, sendo que o material era transportado manualmente e compactado por pisoteamento de homens ou animais. Com o decorrer do tempo e com a evolução da tecnologia foram introduzidos núcleos de argila para garantir a estanqueidade das barragens, iniciou-se o uso de enrocamento na construção de barragens e no século XX foi introduzida à compactação mecânica (JANSEN, 1983; MASSAD, 2010).

O número de obras em construção tem aumentado significativamente em especial na Ásia e Médio Oriente. A Turquia, China, Japão, Iraque (antes da invasão americana), Irão, Grécia, Roménia, e Espanha, bem como as bacias do rio Paraná na América do Sul, do rio Yangtze na China (38 barragens em construção em 2000), dos rios Tigre e Eufrates no Médio Oriente (19 obras em construção no final de 2000) e do rio Danúbio na Europa (11 obras em construção em 2000), eram, há poucos anos, as zonas do mundo com maior número e maiores obras em construção.

Tabela 2.2 – Dados históricos da evolução de barragens

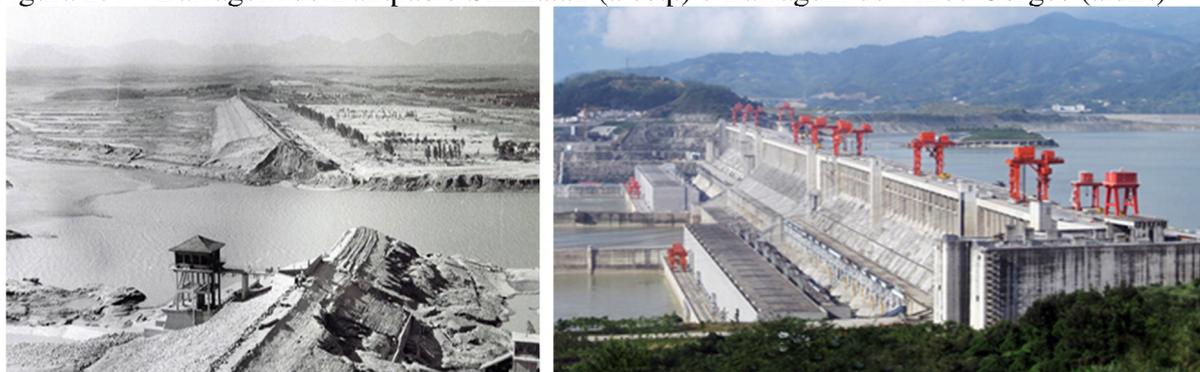
Ano	Registro ou Ocorrência	Local
4800 a.C.	Barragem de Sadd – El-Katara, Altura de 12 m, destruída por transbordamento	Egito
500 a.C.	Barragem de terra, Altura de 12 a 27 m, 13 milhões de m ³ de material	Sri Lanka
100 a.C.	Barragens romanas em arcos	Norte da Itália Sul da França
1200 d.C.	Barragem Madduk-Masur, Altura de 90 m, destruída por transbordamento	Índia
1789	Barragem de Estrecho de Rientes, Altura de 46 m, destruída logo após o primeiro enchimento	Espanha
1820	Telford introduz o uso de núcleos argilosos em barragens de terra e enrocamento	Inglaterra
Final do Séc. XIX	Barragem de Fort Peck, Altura de 76 m, 100 milhões de m ³ de material	EUA
1856	Experiências de Darcy com velocidade de percolação da água	França
1859	Patente do primeiro rolo compactador a vapor	Inglaterra
1904	Surgimento do primeiro rolo compactador do tipo pé de carneiro	EUA
1930-40	Mecânica dos Solos consolida-se como ciência aplicada	EUA
	Rolos compactadores vibratórios.	
Hoje	Barragem de Nurek (URSS), Altura de 312 m. Barragens com membranas, barragens em terra armada, dentre outras.	EUA, URSS, Brasil e outros

Fonte: Adaptado de Mota (2017).

De acordo com estatística recente, pelo menos 60 desastres com barragens foram registrados no mundo nos últimos 50 anos. Entre os mais devastadores estão os de Mariana, em 2015, e o de Brumadinho, em 2019. Barragens sem manutenção, mal projetadas e que acabam invariavelmente causando impactos sociais, ambientais e econômico.

O complexo de barragens de Banqiao e Shimatan, na China (FIGURA 2.4), desmoronou em 1975, provocando a maior inundação da história da China e do mundo, com 6 milhões de casas destruídas, 26 mil pessoas morreram afogadas e outras 145 mil morreram de fome e epidemias decorrentes da inundação, oficialmente. O número, porém, pode ter chegado a 230 mil. Mas apesar deste acidente a China tem hoje a maior barragem do Mundo, Barragem da Three Gorges (FIGURA 2.4).

Figura 2.4 – Barragem de Banqiao e Shimatan (à esq.) e Barragem de Three Gorges (à dir.)



Fonte: LEC/LNEC (2018).

2.2. Legislação sobre a segurança de barragem

2.2.1. Regulamento sobre a segurança de barragem de Cabo Verde

À semelhança de alguns países, Cabo Verde teve a sua primeira grande barragem construída em 2006, Barragem de Poilão (FIGURA 2.5), através da cooperação com o Governo Chinês, na ausência de uma legislação específica e própria sobre a construção de barragens. Por isso, nessa data, considerou-se racional e fundamental que na ausência da legislação e experiência sobre a construção de grandes obras como por exemplo as grandes barragens, que os projetos, a construção e o controlo de segurança e observação destas obras, obedecam às normas mais recente de engenharia de barragens, objeto de legislação específica em muitos países e que sejam seguidas as recomendações da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD).

Figura 2.5 – Barragem de Poilão – Primeira barragem construída em Cabo Verde



Fonte: Acervo pessoal do Autor.

No quadro dos objetivos estratégicos de desenvolvimento do país, o Governo de Cabo Verde adotou um conjunto de medidas que no domínio da preservação do ambiente e aproveitamento dos recursos naturais, envolvendo neste particular a construção de infraestruturas de base destinada à captação das águas superficiais para irrigação e conseqüente incremento da atividade de agrícola.

Assim, no ano de 2006, o Governo deu início à construção das primeiras barragens, assente na especial circunstância de Cabo Verde ser um país de clima semiárido, onde não há cursos de água permanentes e onde as chuvas, por vezes intensas, ocorrem num curto período de tempo, originando escorrências torrenciais, pelo que a construção de barragens, nesse contexto, pode revestir-se de uma grande importância econômica, social e ambiental.

A primeira barragem construída foi a de Poilão, cuja obra terminou em 2006, sendo já visíveis os benefícios que ela trouxe ao país em termos de produtividade agrícola. Até à presente data encontram-se já construídas sete barragens, estando uma em construção e outra em fase de projeto.

Trata-se de grandes barragens no conceito da Comissão Internacional das Grandes Barragens (CIGB), com alturas e volume, de valores máximos de 48 m e 29hm^3 respetivamente.

As obras já construídas foram realizadas com meios escassos e na ausência de normas e legislação específica no domínio da engenharia de barragens em Cabo Verde, que definam critérios e regras para o seu projeto, construção, exploração e controlo de segurança, tanto mais necessárias quanto são específicas as características geológico-geotécnicas e orográficas dos maciços onde foram construídas e de erodibilidade dos solos das bacias que drenam, ausência que urge corrigir para acautelar, no futuro, problemas de vária ordem, entre os quais os relativos à funcionalidade e à segurança das obras, embora foram seguidas as recomendações da Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), conforme referido anteriormente.

Segundo Ramos (2010), pode-se facilmente concluir que no domínio das chamadas obras hidráulicas, a grande maioria das leis foi aprovada na década de 80, sendo certo que nos últimos anos o mundo passou por transformações profundas no domínio do conhecimento e das tecnologias, pelo que essa circunstância por si só recomendaria uma alteração. Para além do mais, existe uma grande profusão legislativa, o que, por um lado, dificulta a interpretação e aplicação das soluções normativas que leis sobre as obras hidráulicas impõem, e, por outro lado, facilita a desarticulação e a incongruência entre as múltiplas disposições legais e regulamentares da matéria.

O certo, porém, é que, no conjunto de todos os textos normativos, a única lei com uma ténue incidência sobre as barragens é o Decreto nº 165/87, de 31 de Dezembro, que regulamenta aspetos relacionados com a execução e gestão das obras hidráulicas. Ou seja, no meio de uma grande variedade de textos normativos sobre os recursos hídricos de uma forma geral, é quase nula a referência direta à matéria do presente regulamento. Pode-se, pois, dizer que não existe um único texto normativo que regulamente de forma clara e direta a segurança das barragens, incluindo com normas relativas ao projeto e à observação e inspeção.

Salta à vista que o regime jurídico geral das obras hidráulicas não se adequa às exigências de construção, segurança e inspeção de barragens, pois que concebido para todas as obras hidráulicas, especialmente as de pequeno e médio porte, exatamente pela circunstância de a construção de barragens não estar inscrita, na ocasião, nos programas de investimentos públicos.

Para além do mais, o quadro legislativo vigente, numa matéria tão essencial, permite, com prejuízo pela eficiência, uma pluralidade de intervenção de entidades na promoção, no licenciamento, na construção e na fiscalização das obras hidráulicas.

Mas também se pode concluir o regime jurídico vigente relativo às obras hidráulicas centra no Conselho Nacional de Água (CNAG), atualmente CNAS (Conselho Nacional de Água e Saneamento), o conjunto mais significativo de competências em matéria de gestão de recursos hídricos e de licenciamento e fiscalização de obras hidráulicas, organismo hoje extinto.

Em seu lugar, foi criado o Conselho Nacional de Água e Saneamento, mas com mudança significativa de concessão, pois que a entidade está estruturada como um serviço de natureza eminentemente consultiva. Verifica-se, ainda, que uma parte das competências da antiga CNAG foi transferida para a CNAS/ANAS, mas resulta claro que existe uma parte essencial – exatamente aquela que respeita às obras hidráulicas – que praticamente não mereceu qualquer tratamento normativo, existindo, por isso, uma grande lacuna nessa matéria.

Também se verifica uma grande falta de coordenação entre os diversos intervenientes com poderes em matéria gestão de recursos hídricos e de infraestruturas hidráulicas, com sobreposição de competências nessas matérias, e com ausência de sistema de coleta e partilha de informações relevantes que permitam uma visão global e uma gestão integrada.

E não existe, de forma objetiva e clara, um organismo público que seja responsável pela segurança das obras hidráulicas em Cabo Verde, valor essencial, particularmente quando se trata de grandes obras.

Assim, e em resumo:

(a) Existe em Cabo Verde legislação sobre a construção civil de uma forma geral, constituída basicamente pela Lei nº 60/VIII/2014, de 23 de Abril, que regula as operações urbanísticas, desde o loteamento, urbanização, licenciamento da construção, fiscalização e regime sancionatório, e pelo Decreto-lei nº 18/2011, de 28 de Fevereiro, que aprova o regime jurídico da edificação, ou seja, que institui as normas técnicas que devem ser observadas nas edificações;

(b) Em matéria de barragens, tanto no que respeita aos projetos, licenciamento, construção, fiscalização e segurança, não existe legislação específica, sendo aplicável a lei relativa às obras hidráulicas, Decreto-Lei que não só se encontra desatualizado, como também não terá sido concebida pensando nas barragens, infraestruturas que não estavam inscritas nos planos de investimentos públicos;

(c) Não existe na legislação vigente em Cabo Verde conjunto de normas técnicas com suficiente clareza e detalhe sobre a concessão dos projetos, a observação e inspeção e a segurança relativas às barragens;

(d) Existem vários estudos técnicos que suportam políticas de gestão integrada de recursos hídricos, mas não existem textos normativos que, de forma consistente e eficaz, vinculem pessoas e entidades a normas e procedimentos a esse modelo de gestão integrada; e

(e) Não existe, de forma objetiva e clara, um organismo público que seja responsável pela segurança das obras hidráulicas em Cabo Verde.

A segurança de barragens é, pois, uma preocupação constante do meio técnico e científico internacional, bem como dos governos, tendo em consideração as enormes consequências que eventuais acidentes e incidentes que envolvem estas infraestruturas podem representar, tanto em termos de perda de vidas humanas, como também de prejuízos ambientais, sociais e económicos.

Neste contexto, e à semelhança de muitos outros países que têm adotado legislação específica no domínio da segurança de barragens (legislação que, em regra, observa as recomendações da Comissão Internacional da Grandes Barragens-ICOLD/CIGB, relativas ao projeto, construção e exploração), o Governo de Cabo Verde decidiu promover e com caráter de urgência um quadro normativo que responda às necessidades do setor, elaborando Regulamento para a Segurança de Barragem em Cabo Verde - RSBCV (proposta), pondo fim à lacuna existente e introduzindo exigências que possam acautelar os riscos potenciais que tais infraestruturas, não obstante a sua enorme utilidade, normalmente se inserem.

Em complemento das normas do Regulamento de Segurança propriamente dito, são ainda exigidas outras normas, que são complementares, e que dizem respeito à observação e inspeção das e aos projetos de barragens. Trata-se, pois, de um quadro normativo que tem como preocupação de fundo a segurança, a qualidade e a operacionalidade das barragens.

A presente proposta de Regulamento para a Segurança de Barragens em Cabo Verde, RSBCV (ainda não publicado), no seu art.º 4º classifica as barragens em função de índice de vulnerabilidade, dano potencial e classe de risco, da seguinte forma:

1. No presente Regulamento, as barragens classificam-se nas classes de risco I e II, em função da sua vulnerabilidade e dos danos potenciais a elas associados.
2. Em termos de vulnerabilidade determinam-se índices de vulnerabilidade parciais associados às características técnicas da barragem, ao seu estado de conservação e à implementação de medidas de segurança.
3. Na determinação do índice de vulnerabilidade parcial associado às características técnicas consideram-se os seguintes descritores:
 - a) Altura da barragem;
 - b) Tipo de barragem, em termos dos materiais de construção;
 - c) Condições de fundação, avaliadas em função da adequação do maciço à obra e do tratamento a que foi sujeito;
 - d) Idade da barragem;
 - e) Período de retorno da cheia de dimensionamento considerada para o dimensionamento dos órgãos de segurança.

4. Na determinação do índice de vulnerabilidade parcial associado ao estado de conservação consideram-se os seguintes descritores:

- a) Confiabilidade dos órgãos de segurança, onde se incluem os descarregadores de cheias, as estruturas de dissipação, as descargas de fundo e os respetivos equipamentos;
- b) Confiabilidade das estruturas de adução, onde se incluem as tomadas de água;
- c) Ocorrência de anomalias relativas às condições percolação pelo corpo da barragem ou pela sua fundação e de infiltrações e ressurgências;
- d) Ocorrência de anomalias no corpo da obra, designadamente abatimentos, deformações, assentamentos, deslizamentos de juntas, fissuração estrutural, fendilhação e reações químicas adversas;
- e) Ocorrência de deteriorações no coroamento e nos paramentos;
- f) Possibilidade de deslizamento global de taludes.

5. Na determinação do índice de vulnerabilidade parcial associado à implementação de medidas de controlo de segurança consideram-se os seguintes descritores:

- a) Existência de um Diretor de Exploração, de designação aprovada pela Autoridade Nacional de Segurança de Barragens;
- b) Existência do Arquivo Técnico da Obra, bem como do Livro Técnico da Obra;
- c) Existência e cumprimento das Regras de Exploração;
- d) Existência e cumprimento do Plano de Observação, nomeadamente no que se refere:
 - i. Aos sistemas de observação e respetivas campanhas de leituras; e
 - ii. Às inspeções de segurança;
- e) Elaboração de relatórios com a análise do comportamento da barragem e de segurança ambiental, de acordo com o disposto no presente regulamento.

6. O Índice de Vulnerabilidade é determinado através de uma regra de agregação dos índices parciais, sendo as barragens classificadas em função deste índice nas seguintes categorias, conforme apresentado na Tabela 2.3.

- a) Baixa vulnerabilidade;
- b) Média vulnerabilidade;
- c) Alta vulnerabilidade.

Tabela 2.3 – Classificação do dano Potencial em Função do valor do Índice de Dano Potencial (Idp)

Índice de Dano Potencial	Dano Potencial
$Idp < 16$	Baixo
$16 < Idp < 256$	Médio
$Idp > 256$	Alto

Fonte: elaborada pelo autor.

7. A classificação em termos de dano potencial terá em conta:

- a) A capacidade total da albufeira; e
- b) As perdas e danos associados à ruptura da barragem e à onda de inundação correspondente ao cenário de acidente mais desfavorável, nomeadamente:
 - i. Perdas de vidas humanas;
 - ii. Danos no património natural e construído; e
 - iii. Impacto socioeconómico nas populações;
- c) A existência e implementação do Plano de Emergência; e
- d) A existência e implementação do Plano de Segurança Ambiental.

8. Em função do Índice de Dano Potencial, as barragens serão classificadas nas seguintes categorias:

- a) Baixo dano potencial;
- b) Médio dano potencial; e
- c) Alto dano potencial.

9. As barragens serão classificadas em termos de classe de risco, mediante o cruzamento das classificações relativas à vulnerabilidade e ao dano potencial, de acordo com o indicado na Tabela 2.3.

Este regulamento (RSB Cap. II art.º 5º – Organização e controlo de segurança) ainda estabelece as regras e define as entidades envolvidas no Controlo de Segurança de Barragens que são, para além da Autoridade Nacional de Segurança de Barragens (ANSB), a Direção Nacional do Ambiente (DNA), do Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território (MAOT), o Laboratório de Engenharia de Cabo Verde (LEC - E.P.E.), o Serviço Nacional da

Proteção Civil e Bombeiros (SNPCB), o Dono de Obra e a Comissão Consultiva de Segurança de Barragens (CCSB):

- a) A DNA, na qualidade de responsável nacional por questões ambientais;
- b) O SNPCB como organismo a quem compete a planificação de emergência e a gestão de recursos humanos, técnicos e financeiros, para uma intervenção rápida em caso de calamidade ou acidente;
- c) O LEC - E.P.E., como consultor oficial da ANSB;
- d) O Dono de Obra, entidade pública ou privada, responsável direto pela exploração da barragem perante a Autoridade; e
- e) A CCSB, como Fórum nacional de representantes de entidades públicas e privadas, para promoção, divulgação e debate das questões ligadas à engenharia de barragens, que acompanhará a aplicação do presente Regulamento.

2.2.2. Legislação para a segurança de barragem no Brasil

Os acidentes, incidentes e rupturas com barragens em vários países do mundo, muitas vezes levando a situações catastróficas com perdas não só de vidas humanas, mas também com danos e prejuízos a nível social e ambiental, sobretudo nos países mais desenvolvidos e com um histórico enorme em matéria de construção de barragens, serviram de motivação para que se desenvolvessem leis, normas e regulamentações destinadas a garantir a segurança não apenas da estrutura, mas também do todo o vale a jusante.

Além disso, fatores como o envelhecimento de algumas barragens e o desenvolvimento de tecnologias relacionadas com seu projeto, construção e operação também serviram de estímulo para o estabelecimento de leis que contemplem sua segurança (MENESCAL, 2009).

No Brasil, em 2010, foi sancionada a Lei nº 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

De acordo com o Art. 1º, esta Lei aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- I – altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);

- II – capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);
- III – reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; e
- IV – categoria de dano potencial associado, médio ou alto, termos econômicos, sociais ou ambientais ou perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.

A classificação quanto ao dano potencial associado foi feita a partir da publicação da Resolução nº 143, de Julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que em seu Art. 5º definiu os critérios gerais a serem utilizados para a classificação como sendo:

- I – existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;
- II – existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários;
- III – existência de infraestrutura ou serviços;
- IV - existência de equipamentos de serviços públicos essenciais;
- V – existência de áreas protegidas definidas em legislação;
- VI – natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados; e
- VII – volume.

A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo é feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem (PSB).

Ainda o mesmo regulamento aponta que as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), e que a classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

De acordo com o mesmo Decreto-Lei, no seu art.º 3, Capítulo II, define os objetivos fundamentais da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) nos seguintes critérios:

- I - Garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências;
- II - regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional;

- III - promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;
- IV - criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;
- V - Coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos;
- VI - estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público;
- VII - fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

O Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBDB), através do Núcleo Regional de São Paulo, criou, em outubro de 1996, a Comissão Regional de Segurança de Barragens, que estabeleceu entre suas metas prioritárias o levantamento da situação da segurança de barragens no Estado de São Paulo e a elaboração do Guia Básico de Segurança de Barragens.

No XXII Seminário Nacional de Grandes Barragens, foram publicados e apresentados os resultados da pesquisa sobre a situação atual da segurança de barragem no Estado de São Paulo, mostrando dados que revelam uma situação no mínimo preocupante.

Com a publicação deste guia, considera-se vencida mais uma etapa das iniciadas, já trabalhada em outras épocas, que possibilita aos profissionais atuantes nesta atividade, acesso às informações mais recentes e, principalmente, procura definir requisitos e recomendações mínimas a serem seguidos em estudos relativos a segurança de barragens, segundo critérios uniformes e coerentes com o atual estágio do conhecimento.

Especificamente no Estado de São Paulo, logo após os acidentes ocorridos com as barragens de Euclides da Cunha e Armando de Salles Oliveira, em 1977, foi emitido o Decreto nº 10752, dispondo sobre segurança das barragens no Estado e recomendando auditorias técnicas permanentes. Por falta de regulamentação este decreto nunca foi implementado.

O Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB), seguindo a tendência mundial da década de 70, editou em 1979 e 1983 as “Diretrizes para a Inspeção e Avaliação da Segurança de Barragens em Operação”. Posteriormente, em 1986, editou as “Recomendações para a Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos de Segurança de Barragens”, em 1995 o “Cadastro Brasileiro de Deterioração de Barragens e Reservatórios” e, em 1996, “Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil”. Estas publicações, elaboradas por comissões do CBGB, tem servido para balizar os procedimentos de segurança adotados por algumas organizações brasileiras.

O Ministério de Minas e Energia, através da Portaria nº 739, de 1988, criou um grupo de trabalho com o objetivo de normalizar procedimentos preventivos e de manutenção voltados à segurança das diversas barragens existentes. Coordenado pela Eletrobrás o grupo concluiu, em 1989, um relatório que abordou entre outros aspectos importantes: estabelecimento de mecanismos de monitoração e da instrumentação; definição da periodicidade de inspeção; procedimento gerais a serem seguidos em casos de acidentes; definição das responsabilidades pela execução das ações.

Segundo a Comissão Temporária da Política Nacional de Segurança de Barragens (designada abreviadamente por CTPNSB – Brasília, 25 de maio de 2016), no seu relatório final, a Lei 12.334, de 2010, é uma lei moderna e representa um grande avanço para a promoção da segurança de barragens no Brasil, em especial por ter sido a primeira a se dedicar exclusivamente ao tema. Como é uma lei relativamente nova, já encontrou um enorme estoque de barragens construídas, muitas delas há décadas. Além disso, os órgãos fiscalizadores ainda estão se estruturando para exercer plenamente suas atribuições. Dessa forma, a implantação da PNSB está se fazendo com grande dificuldade.

Em que pesem os inegáveis méritos da Lei nº 12.334, de 2010, é possível fazer alguns ajustes para aumentar sua efetividade. Contudo, infelizmente, nem a melhor lei do mundo pode garantir que não ocorrerão desastres com barragens. Sobretudo porque empreendedores e órgãos fiscalizadores também têm que cumprir os papéis que lhes cabem para que a implantação da PNSB seja bem-sucedida.

No decorrer dos trabalhos desta Comissão, foi possível verificar o estado de precariedade do Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM. A Autarquia vem há anos sofrendo com cortes orçamentários e com quadros desfalcados e insuficientemente capacitados. Essa situação, de fato, enfraquece a fiscalização e potencializa os riscos de acidentes com barragens de rejeitos de mineração, mormente neste período de queda das cotações das commodities minerais, quando as mineradoras, com problemas de queda de receita, podem ser tentadas a reduzir seus gastos em segurança de barragem.

2.2.3. Legislação para a segurança de barragem de Portugal

Em Portugal, o Regulamento de Segurança de Barragem foi aprovado pelo Decreto –Lei 11/1990 de 06 de Janeiro e revisado pelo Decreto-Lei nº 344/2007 de 15 de Outubro.

Segundo Decreto-Lei nº 344/2007, as barragens em Portugal são classificadas em duas categorias. Existem as barragens grandes, que são maiores do que 15m, têm um volume de acumulação maior do que 100 mil m³ ou impõem riscos relevantes para a vida humana e a economia. A segunda categoria consiste de barragens pequenas e inclui todas as barragens que não são classificadas na primeira categoria. Segundo ICOLD, existem em Portugal cerca de 150 grandes barragens.

Em 1968 foi estabelecido um primeiro Regulamento de Pequenas Barragens de Terra, consubstanciado nos Decretos Nos. 48.373 e 48.643, respectivamente, de 8 de maio de 1968 e de 23 de outubro de 1968, substituído, entretanto, em 1993, pelo Regulamento de Pequenas Barragens, anexo ao Decreto-Lei nº 409/93, de 14 de dezembro.

As exigências legais de controlo de segurança foram estendidas às grandes barragens com a publicação do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), anexo ao Decreto-Lei nº 11/90, de 6 de Janeiro.

Para boa execução do RSB foram estabelecidas Normas de Projeto de Barragens e Normas de Observação e Inspeção de Barragens, nos termos das Portarias nos 846/93 e 847/93, de 10 de setembro, assim como Normas de Construção de Barragens, nos termos da Portaria nº 246/98, de 21 de abril.

O Regulamento de Segurança de Barragens prevê a respetiva revisão no prazo de cinco anos após a sua entrada em vigor. No entanto, à data, a experiência de aplicação do regime estabelecido, nomeadamente para um conjunto numeroso de barragens de relativamente pequenas dimensões, foi considerada insuficiente pelas entidades competentes, tendo-se, então, decidido prolongar aquele prazo.

Neste contexto, o despacho 19 016/2003, de 17 de Setembro, publicado no Diário da República, 2.ª série, n.º 229, de 3 de Outubro de 2003, culminou as diligências com vista a dotar a Subcomissão dos Regulamentos de Barragens (SRB) – criada em 22 de Fevereiro de 1960, e integrada na Comissão de Revisão e Instituição dos Regulamentos Técnicos a funcionar junto do Conselho Superior de Obras Públicas e Transportes – dos recursos humanos e valências técnicas necessárias à revisão da legislação relativa à segurança das barragens.

A SRB elaborou uma profunda e detalhada revisão das disposições do RSB em vigor desde 1990, tendo presentes os comentários e sugestões de alteração que, desde então, foram propostos por diversas entidades, bem como as características das barragens abrangidas pelo seu âmbito de aplicação, que podem ser classificadas nos dois grupos seguintes:

- a) grandes barragens, de altura igual ou superior a 15m, ou barragens de altura igual ou superior a 10m cujo reservatório tenha capacidade superior a 1 milhão de m³;

- b) barragens de altura inferior a 15 m que não estejam incluídas no grupo anterior e cujo reservatório tenha capacidade superior a 100.000 m³.

Mais tarde, a revisão do RSB foi formalizada pelo Decreto-Lei n^o 344/2007, de 2007, que substituiu o Decreto-Lei 11/90, de 1990. As regulamentações complementares das 3 Portarias que definem todos os requerimentos e padrões relacionados ao projeto, construção, operação, observação e inspeção de barragens ainda continuam válidas no que não diverge do RSB.

Na revisão efetuada, foram mantidas as entidades envolvidas na aplicação das disposições regulamentares e, de um modo geral, o modelo de organização das atividades de controlo de segurança desenvolvido no País ao longo da segunda metade do século XX e integrado no Regulamento de Segurança de Barragens em vigor.

Procurou-se, no entanto, melhorar a eficácia e simplificar os procedimentos de modo a facilitar a aplicação do Regulamento ao longo da vida das obras, quer para os donos de obra quer para as outras entidades envolvidas. Procurou-se também articular convenientemente as intervenções destas diferentes entidades, tendo em vista facilitar a cooperação entre elas e utilizar da melhor forma as suas capacidades.

Um aspecto importante da revisão efetuada consiste numa graduação das exigências de controlo de segurança e de protecção civil de algumas disposições regulamentares, em função da gravidade dos danos potenciais associados com a construção e exploração das barragens. Assim, considerou-se que algumas disposições relativas ao controlo de segurança nas fases de projeto, construção e exploração podem ser menos exigentes no caso de obras a que se associem danos potenciais de menor grau e que as intervenções do Laboratório Nacional de Engenharia Civil no controlo de segurança das barragens e do Sistema de Protecção Civil, nas medidas de protecção civil, deverão limitar-se às obras a que se associam danos potenciais elevados.

Fazendo uma análise comparativa dos dois decretos-lei, pode-se concluir que continuou a atribuir-se uma importância fundamental ao controle de segurança das barragens, nos aspectos estruturais, hidráulico-operacionais e ambientais, tendo em vista a detecção de eventuais processos de deterioração na fase inicial do seu desenvolvimento, de modo a possibilitar que sejam adotadas as medidas corretivas adequadas a tempo.

Procurou-se, ainda, integrar, na revisão das medidas de controle de segurança e de proteção civil, os desenvolvimentos científicos e técnicos verificados nos últimos anos.

Nas três portarias que complementam a regulamentação, as barragens são classificadas em três grupos, com base no Índice de Risco Global. Esse Índice leva em conta três

fatores: condições externas ambientais, condição e confiabilidade da barragem e perigos humanos e econômicos. Cada um desses fatores contém uns números de componentes que são avaliados na inspeção da barragem. Baseado nesse índice as barragens são classificadas em três classes de acordo com suas características de desempenho e perigo. Os valores do Índice de Risco Global são utilizados para a determinação de prioridades no tratamento da segurança das barragens.

O Decreto-Lei nº 344/2007, secção I, artº. 3, classifica as barragens em função dos danos potenciais a elas associados, em três classes (I, II e III), por ordem decrescente da gravidade dos danos. A referida classificação deve ter em conta as vidas humanas, bens e ambiente, de acordo com as regras constantes do anexo ao presente Regulamento e que dele faz parte integrante.

Segundo RSB (2007), quatro instituições governamentais estão envolvidas com regulação de segurança de barragens em Portugal. São o INAG, no Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente (MCOTA), o LNEC, o Departamento Nacional de Defesa Civil e a Comissão de Segurança de Barragens (CSB).

O INAG é responsável pela aprovação e supervisão da construção e operação de barragens. Entretanto, ele não precisa aprovar os engenheiros responsáveis pelos projetos das barragens. Quando necessário, ele irá consultar o LNEC. O LNEC também desenvolve estudos para os proprietários dessas barragens.

O Departamento Nacional de Defesa Civil é responsável pelos planos emergenciais. A CSB funciona junto do CSOPT, prepara padrões e dá opiniões em questões atendendo às solicitações do INAG.

Segundo Menescal (2009), os vários regulamentos em Portugal estipulam padrões gerais que tratam de aspetos específico das estruturas das barragens, tais como: fundação e vertedouros. Entretanto, ele não inclui normas precisas desses dispositivos. As regulamentações estipulam quais informações precisam ser incluídas nos estudos submetidos ao INAG para aprovação do projeto.

Segundo a regulamentação, o INAG deve aprovar o projeto final da barragem e as modificações durante a construção. Ele também tem o poder para aceitar o projeto no final da construção e deve aprovar o plano para o primeiro enchimento do reservatório. Ao final do enchimento o INAG desenvolve inspeção da detalhada na barragem. Durante esse período, o LNEC elaborará um relatório final acerca do comportamento da barragem.

Durante a operação da barragem o INAG, atuando com o apoio do LNEC, deve aprovar o sistema de monitoramento. O sistema de monitoramento deve ser desenvolvido de

acordo com as regulamentações na Norma de Monitoramento e Auscultação de Barragem. As regulamentações fornecem três níveis de auscultação: contínuo, especial ou excepcional. O INAG em colaboração com o LNEC, e na presença do proprietário, efetua inspeções periódicas da barragem.

Cada barragem deve ter um plano de emergência que é sujeito à avaliações periódicas. As regulamentações requerem que todas as barragens importantes tenham um sistema permanente de comunicação que conecte a barragem, a estação de geração e o centro de operação da barragem. A barragem deve também ter um sistema de alarme pago pelo proprietário. No caso de emergência, o proprietário deve contactar imediatamente o centro de defesa civil.

No caso de Barragens de Classe I, é obrigatória a elaboração dos Planos de Emergência (Interno, da responsabilidade do Dono da Obra, e Externo, da responsabilidade da Autoridade Competente de Proteção Civil) para a Ruptura da Barragem. Deverá ser estabelecido um programa de informação à população sobre o projeto, riscos associados e respectivas medidas de prevenção e proteção.

Ainda paralelamente aos Decreto – Leis acima citados existem a Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens (CNPGB) que é a representante em Portugal de ICOLD (Comissão Internacional de Grandes Barragens), cuja composição está estabelecida no Despacho n° 6012/2004 (2.ª série), de março de 2004, do Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente.

Existe ainda a Comissão de Gestão de Albufeiras (CGA), criada pelo Decreto-lei 21/98, de 1998, presidida pelo presidente do INAG. Cabe à CGA estabelecer um regulamento técnico com as regras de elaboração dos programas de exploração de reservatórios, que serão apresentados pelas entidades responsáveis pela exploração.

2.2.4. Legislação para a segurança de barragem de África do Sul

A água na África do Sul é governada pela Lei dos Serviços de Água de 1997 e pela Lei Nacional de Águas de 1998. Estas Leis complementam-se e fornecem um quadro de gestão sustentável dos recursos hídricos e uma prestação de serviços melhorada e mais alargada.

A Lei Nacional de Águas de 1998 baseia-se no princípio de que todas as formas de água fazem parte de um ciclo de sistema unitário e interdependente e que deveriam ser regidas por normas consistentes. A lei contém disposições exaustivas para a protecção, uso, desenvolvimento, conservação, gestão e controlo dos recursos hídricos da África do Sul. Os objetivos

estratégicos são estipulados pela Estratégia Nacional de Recursos Hídricos (NWRS; DWAF, 2004).

A mudança das leis relacionadas com a água e instituições tem sido regida pelo Livro Branco da Política Nacional da Água de 1997. Este documento estipula uma abordagem de distribuição de benefícios dos recursos hídricos nacionais, de acordo com as regras de Helsínquia. Favorece o trabalho de gestão regional da água, para permitir que todas as partes envolvidas possam participar e resolver os requisitos do “Integrated Water Resource Management”-IWRM. Não obstante, é atribuída ao governo nacional a “responsabilidade central” pelos recursos hídricos, implicando a precedência do nível nacional sobre o regional.

De igual modo, as questões transfronteiriças podem ter prioridade: a Política Nacional da Água diz que o governo “terá o direito de alocar a água a países a jusante preferindo-os em relação às alocações locais e às bacias hidrográficas transfronteiriças, “toda a sub-bacia partilhada será a base para a tomada de decisões, particularmente onde estejam envolvidos mais de dois países”.

Segundo Menescal (2009 *apud* DWAF, 2008), as chamadas *Dam Safety Regulations* (DSR), publicadas em 25 de julho de 1986, entraram em efetividade em Janeiro de 1987 e ainda são consideradas válidas pelo *National Water Act* (NWA), de 1998. Somente barragens com risco, ou seja, barragens com altura máxima acima de 5m e com volume armazenado acima de 50 mil m³, ou outras barragens declaradas como de risco, estão sujeitas às DSR.

A missão do *Dam Safety Office* (DSO), é promover a segurança de barragens novas e existentes com a segurança adequada de forma a reduzir os danos potenciais para o público, prejuízos às propriedades e qualidade do meio ambiente.

As funções do DSO são basicamente:

- (a) desenvolver, implementar e administrar a legislação e as políticas de segurança barragens;
- (b) gerenciar o programa de segurança de barragem;
- (c) obrigar/apoiar o atendimento da legislação de segurança de barragens pelos proprietários;
- (d) efetuar análise técnica dos relatórios de avaliação de segurança de barragem e das várias solicitações de licença para construção de novas barragens e reforma e ampliação das existentes. Isto inclui a análise técnica dos relatórios de projeto, desenhos, acompanhamento da construção e relatórios de conclusão, manuais de operação e manutenção e planos de ações emergenciais;
- (e) auditar e monitorar o progresso feito com programa de segurança de barragem.

A nível de segurança de barragens o DSO traz um conjunto de procedimentos traduzidos em três requerimentos legais que devem ser atendidos antes que se possa construir/reparar/alterar uma barragem.

Para novas barragens, alteração em barragens existentes ou reparos de barragens rompidas, a primeira etapa é solicitar a classificação de barragem. O DSO informa o interessado sobre a classificação da barragem e os procedimentos seguintes. Se a barragem é classificada na categoria 1, o interessado submete uma solicitação específica para construção e entrega o projeto construtivo.

A construção somente pode começar depois da licença de construção ter sido emitida. Se a barragem é classificada nas categorias 2 e 3, os serviços de um profissional habilitado devem ser contratados. O profissional habilitado deve obter uma licença para construir em benefício do proprietário, isso envolve a submissão de um formulário, projeto, desenhos e especificações construtivas. A construção somente pode começar depois da licença de construção ter sido emitida. O profissional habilitado, deve também garantir um adequado controle de qualidade durante a construção.

Antes do primeiro enchimento, o profissional habilitado deve solicitar uma licença, isso envolve o encaminhamento do manual de operação e manutenção e dos planos de ação emergencial junto com outros documentos. Depois da conclusão de todo trabalho construtivo, o profissional habilitado deve submeter o relatório de conclusão, os desenhos como executado e o certificado de conclusão atestando que o trabalho foi completado de acordo com as suas especificações.

Para barragens existentes, todas as barragens consideradas com risco devem ser registradas. O DSO deve ser notificado sobre mudanças, sobre o proprietário e o responsável técnico. A barragem deve ser operada e mantida de uma maneira adequada. Basicamente o DSO requer que o proprietário ou a pessoa indicada por ele visite e inspecione a barragem com regularidade. Os trabalhos de manutenção devem ser feitos regularmente.

No caso de condições críticas de emergências, medidas de procedimentos de segurança devem ser adotados e o DSO informado. O proprietário da barragem deve providenciar para que a execução de uma inspeção formal de segurança seja feita, quando solicitado pelo DSO, em intervalos entre cinco e dez anos. No caso de barragem de categoria 2 e 3, a inspeção deve ser feita por um profissional habilitado. No caso de barragem de categoria 1, não é especificado por quem as inspeções devem ser feitas, mas é do interesse do proprietário indicar um

profissional experiente para efetuar-las. Se necessário, o relatório de inspeção indicará quais serviços devem ser feitos para colocar a barragem nos padrões de segurança adequados.

O SANCOLD, o Comitê Nacional Sul-Africano de Grandes Barragens, é o órgão oficial que tem sido tradicionalmente envolvido no desenvolvimento e promoção de barragens na África do Sul, por meio de sua participação desde 1965 na ICOLD, a Comissão Internacional de Grandes Barragens, reestruturou sua constituição para alinhar com a prática internacional. Neste novo formato, o SANCOLD será constituído para ser inclusivo, amplamente abrangente e democraticamente representativo da comunidade de barragens na África do Sul.

A nova missão do SANCOLD será promover a ciência e a arte do planejamento, projeto, construção, operação, gerenciamento, manutenção, reabilitação e demolição de barragens, para desenvolver os recursos hídricos da África do Sul de forma segura, financeiramente sólida, ecologicamente e socialmente sustentável. O novo SANCOLD está, assim, empenhado em promover a excelência técnica e boas práticas em todos esses aspectos da indústria de barragens.

2.3. Comissão de Barragem

2.3.1. Comissão Internacional de Grandes Barragens

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, na sigla inglesa), é a organização profissional líder mundial na área de barragens, promovendo a tecnologia de engenharia de barragens e apoiando o desenvolvimento e a gestão social e ambientalmente responsáveis dos recursos hídricos para suprir a demanda mundial, bem como exerce liderança estabelecendo padrões e diretrizes para garantir que as barragens sejam construídas de maneira segura, econômica e ambiental e socialmente sustentáveis.

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB) mantém um Registro Mundial de Barragens. Para uma barragem ser considerada grande e ser incluída no registro ela deve ter altura de 15 metros ou 10 a 15 metros e armazenar mais de 3 milhões de metros cúbicos de água em seu reservatório. A altura de uma barragem é determinada do ponto mais baixo da fundação principal até a crista, conforme critério do Registro Mundial de Barragens (RMB); são consideradas, portanto incluíveis no RMB as barragens que possuam altura de 15 metros (independentemente do volume de água armazenável em seu reservatório) ou também as que

possuam altura variável entre 10 e 15 metros, desde que tenham capacidade de armazenar mais de 3 milhões de metros cúbicos de água em seu reservatório.

2.3.2. Comissão Moçambicana de Barragens

A Comissão Moçambicana de Barragens (CMB) é uma associação da sociedade civil, sem fins lucrativos, de carácter técnico-científico dotada de autonomia administrativa, financeira e patrimonial.

Sua criação foi impulsionada por um grupo de técnicos alguns dos quais do sector de águas e que durante o Curso de Segurança de Barragens realizado em 2009 acabariam amadurecendo as ideias para o efeito.

Tiveram papel importante na sua criação membros fundadores individuais e corporativos: a Hidroeléctrica de Cahora Bassa – HCB, a Electricidade de Moçambique - EDM, e a Administração Regional de Águas - ARA-Sul.

O apoio do Ministro das Obras Públicas e Habitação foi crucial. A CMB foi oficialmente reconhecida como Associação no ano de 2011, tendo como objetivos:

Estabelecer parcerias com instituições nacionais ligadas às barragens e gestão dos recursos hídricos,

- Estabelecer contatos entre especialistas nacionais e estrangeiros, para intercâmbio de experiências sobre a problemática das barragens,
- Organizar e coordenar estudos e pesquisas na área de barragens, tendo em conta os impactos sociais, ambientais e a sua mitigação,
- Proceder à publicação de relatórios, boletins técnicos e outros documentos.

Moçambique é o primeiro país africano de língua portuguesa membro do ICOLD, tendo levado o compromisso de motivar os demais países (Angola, Cabo Verde, Guiné Bissau, São Tomé e Príncipe) em juntarem-se a organização.

A efetivação de Moçambique como membro de pleno direito do ICOLD teve lugar durante na 78ª Reunião Anual do ICOLD no Vietnam (Hanoi) em 2010. E deste então, a CMB se faz presente as reuniões anuais da organização.

Moçambique é também membro do “African Regional Club” do ICOLD (ARC), fórum do ICOLD que permite a troca de experiências e parcerias entre os países africanos membros da Organização.

Desde 2010, a CMB participa na iniciativa do Comité Chinês de Barragens (CHINCOLD), para a promoção da declaração mundial de barragens, “CHINCOLD workshop and technical tour”.

A CMB iniciou contatos com o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), com vista a parcerias futuras que possam contribuir para o bom funcionamento da organização. Espera-se contatos com outros países e comissões nacionais de barragens de países membros do ICOLD.

Através do Decreto n.º 47/2009 de 7 de Outubro, o Governo de Moçambique aprovou o regulamento de pequenas barragens, cujo âmbito é o seguinte:

1. O presente Regulamento aplica-se a todas as pessoas, singulares ou coletivas, públicas ou privadas, nacionais ou estrangeiras, devidamente autorizadas a atuar em território nacional.
2. O presente Regulamento é aplicável ao projeto, construção, exploração, manutenção e observação de barragens com altura igual ou inferior a 15 metros e capacidade de armazenamento inferior a 1000 000 m³ (um milhão de metros cúbicos).

2.3.3. Comissão Mundial de Barragens (CMB)

A Comissão Mundial de Barragens (CMB), é constituído por uma equipa de Especialistas. É um documento muito importante a nível de segurança de barragens que tem uma equipa de investigadores muito experientes relacionado com as barragens de vários países que também, são membros de ICOLD tais como Estados Unidos, Austrália, África do Sul, Brasil, Índia, Alemanha, Filipinas e Suécia. Os membros dessa comissão foram escolhidos de tal modo que refletissem a diversidade regional, uma variada gama de conhecimentos e as diferentes expectativas das partes envolvidas.

Em abril de 1997, com apoio do Banco Mundial e da IUCN – União Para Conservação Mundial – grupos representando diversos interesses reuniram-se em Gland, Suíça, por ocasião da publicação de um recente relatório do Banco Mundial, para discutirem questões altamente controversas envolvendo as grandes barragens.

Uma das propostas resultantes do encontro foi que todas as partes trabalhassem juntas para estabelecer a Comissão Mundial de Barragens (CMB) com mandato para: examinar a eficácia da construção de grandes barragens e estudar alternativas para o desenvolvimento de recursos hídricos e energéticos; e elaborar critérios, diretrizes e padrões internacionalmente

aceitáveis para o planejamento, projeto, avaliação, construção, operação, monitoramento e descomissionamento de barragens.

O relatório final da Comissão Mundial de Barragens, Barragens e Desenvolvimento: Um Novo Modelo para Tomada de Decisões, foi publicado em novembro de 2000.

O relatório da CMB é um marco na evolução das barragens como opção de desenvolvimento. O debate sobre barragens diz respeito ao próprio significado e propósito do desenvolvimento e aos caminhos para promovê-lo. Em seu Estudo Global do desempenho das barragens, a Comissão apresenta uma avaliação integrada de quando, como e por que as barragens conseguem ou não atingir os objetivos de desenvolvimento, oferecendo uma base racional para introduzir mudanças fundamentais na forma de avaliar opções e nos ciclos de planejamento e projeto de aproveitamentos de recursos hídricos e energéticos.

O estudo também examinou fatores relacionados à sustentabilidade física das grandes barragens e seus benefícios, confirmando o seguinte:

A segurança das barragens irá exigir cada vez mais atenção e investimentos, pois as barragens estão envelhecendo e os custos de manutenção aumentando. Mudanças climáticas também podem possivelmente alterar os regimes hidrológicos que basearam os projetos dos vertedouros das barragens.

A sedimentação e a conseqüente redução no longo prazo da capacidade de armazenamento é uma grave preocupação em todo o mundo, cujos efeitos serão sentidos particularmente nas bacias com taxas elevadas de erosão de origem geológica ou humana, em barragens construídas nas extensões a jusante dos rios e em barragens com reservatórios de menor capacidade.

Alagamento e salinização afetam um quinto das terras irrigadas do mundo – incluindo terras irrigadas por grandes barragens – e apresentam graves impactos de longo prazo, muitas vezes permanentes, sobre a terra, a agricultura e a subsistência da população se não forem empreendidos esforços de reabilitação ambiental.

A Comissão constatou que, das represas estudadas por cientistas até o momento, todas emitem gases que contribuem para o efeito estufa, como ocorre com os lagos naturais, devido à decomposição de vegetação e ao influxo de carbono na captação.

3. SEGURANÇA DE BARRAGEM DE GRAVIDADE

3.1. Aspectos gerais

As barragens, compreendendo o barramento, as estruturas associadas e o reservatório, são obras necessárias para uma adequada gestão dos recursos hídricos e contenção de rejeitos de mineração ou de resíduos industriais. Sua construção e operação podem, no entanto, envolver danos potenciais para as populações e os bens materiais e ambientais existentes no entorno.

A segurança de barragens é um aspecto fundamental para todas as entidades envolvidas, como as autoridades legais e os empreendedores, bem como os agentes que lhes dão apoio técnico nas atividades, relativas à concepção, ao projeto, à construção, ao comissionamento, à operação e, por fim, ao descomissionamento (desativação), as quais devem ser proporcionais ao tipo, dimensão e risco envolvido.

Para garantir as necessárias condições de segurança das barragens ao longo da sua vida útil, devem ser adotadas medidas de prevenção e controle dessas condições. Essas medidas, se devidamente implementadas, asseguram uma probabilidade de ocorrência de acidente reduzida ou praticamente nula, mas devem, apesar disso, ser complementadas com medidas de defesa civil para minorar as consequências de uma possível ocorrência de acidente, especialmente em casos em que se associam danos potenciais mais altos.

As condições de segurança das barragens devem ser periodicamente revisadas, levando em consideração eventuais alterações resultantes do envelhecimento e deterioração das estruturas ou de outros fatores, como o aumento da ocupação nos vales a jusante (ANA, 2016).

De uma forma geral, como em qualquer outra obra de engenharia, as barragens não são isentas de falhas e a sua segurança absoluta não é totalmente garantida, portanto, acidentes ou até mesmo rupturas podem ocorrer. Destes incidentes pode resultar a liberação descontrolada do volume armazenado, com consequências que podem variar da simples perda deste volume até catástrofes envolvendo perda de vidas humanas e o comprometimento total da região atingida. A esta combinação entre a chance ou a probabilidade de ocorrência de falhas e a gravidade de suas consequências que se denomina de risco.

Apesar do estado da arte da engenharia atual permitir que o projeto, construção, manutenção e operação de barragens sejam realizados de forma eficaz e garantir que os níveis de segurança previstos nos diversos regulamentos, para o empreendimento, sejam atingidos,

pode-se afirmar que sempre haverá a possibilidade, mesmo que remota, de que uma determinada combinação de fatores adversos ocorra e que o desempenho da estrutura frente a esta seja insatisfatório. A sociedade moderna reconhece a existência de riscos e a impossibilidade de se eliminar todas as ameaças existentes e, diante da necessidade de certos benefícios, acaba por tolerá-los, porém, não mais aceita que estes não recebem o tratamento adequado.

Os constantes processos de tomada de decisão inerentes a qualquer fase de uma obra de engenharia (estudos e projeto, construção, operação, intervenção ou descomissionamento), não basta mais apenas a busca pelo entendimento aos critérios normalizados, como valores mínimos de resistência e de fator de segurança etc., mas cabe ao engenheiro considerar outros métodos de avaliação e análise que consigam mensurar as aversões da sociedade, os quais variam da percepção que esta tem de um determinado risco num determinado momento da história. Os motivos que levam a considerá-los é que eles impactam diretamente a atividade das barragens.

A Figura 3.1 mostra exemplos de barragens de gravidade em alvenaria argamassada, a saber: a Barragem de Banca Furada, Ilha de S. Nicolau, e a Barragem de Canto Cagara, Ilha de Santo Antão.

Figura 3.1 – Barragem de Banca Furada (à esq.) e Barragem de Canto Cagara (à dir.)



Fonte: Acervo pessoal do Autor.

A Lei, brasileira, nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, conhecida como Lei de Segurança de Barragens, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), considerando os aspectos referidos, além de outros, e definiu atribuições e formas de controle necessárias para assegurar as condições de segurança das barragens.

O regulamento de segurança de barragens de Portugal (RSB, 2007), em vigor, aplica-se as designadas grandes barragens, que por sua vez são agrupadas em classes em função da gravidade dos danos potenciais no vale a jusante, associados á eventual ruptura da obra.

O RSB aplica-se: (a) a todas as barragens de altura igual ou superior a 15m, medida desde a cota mais baixa da superfície geral das fundações até à cota do coroamento, ou a barragens de altura igual ou superior a 10m cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 1 hm³, no presente regulamento designadas por grandes barragens; e (b) às barragens de altura inferior a 15m que não estejam incluídas na alínea anterior e cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 100.000 m³.

No entanto, estarão ainda sujeitas as disposições do RSB “...outras barragens que, em resultado da aprovação de projeto ou de estudo de avaliação de segurança, sejam incluídas na classe...”. A classe da barragem é definida em função da ocupação humana, expressa pelo número de residentes, e dos bens e ambientais existentes no vale a jusante, de acordo com o que mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classes das barragens em função da ocupação humana e dos bens e ambiente no vale a jusante do barramento

Classe	Ocupação humana, bens e ambiente a jusante
I	Residentes em números iguais ou superiores a 25
II	Residentes em números inferiores a 25; ou infraestruturas e instalações importantes ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis; ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas
III	As demais barragens

Fonte: Adaptado de RSB (2007).

A utilização do betão e alvenaria de pedra argamassada ou não como materiais de construção das barragens e de outras obras de engenharia hidráulica e recursos hídricos datam de mais de uma centena de anos, razão pela qual permite a obtenção de um banco de dados confiável sobre o comportamento deste tipo de materiais e obras.

Em termos gerais o projeto das barragens de concreto e de alvenaria é multidisciplinar, envolvendo diversas áreas: a hidrologia, a hidráulica, a mecânica das rochas (aspectos geológico-geotécnicos), a engenharia de estruturas bem como a engenharia de matérias e outras áreas específicas.

De acordo com Marques Filho (2005), as barragens de concreto adotam cinco tipos de soluções básicas: barragens de concreto a gravidade, a gravidade aliviada, arco-gravidade, em arco e em contrafortes. Nas barragens de concreto a gravidade, grosseiramente, as ações geradas pelo reservatório têm como fator estabilizante o peso próprio da estrutura, utilizando como critério de resistência as envoltórias de Mohr-Coulomb em modelos cujo comportamento

predominante pode ser caracterizado grosseiramente pela seção transversal em balanço. As barragens são estruturas assimétricas e tridimensionais, construídas a partir de materiais complexos com propriedades físicas não uniformes e anisotrópicas. Isto reflete na interação da barragem com a sua base e na resposta aos esforços estruturais.

Em todas estas soluções estão associados volumes expressivos de concreto, gerando preocupações quanto a fissuração gerada pelos fenômenos termogênicos da hidratação do cimento, cujos malefícios são potencializados na presença da água do reservatório.

Na evolução do concreto para utilização em estruturas de grande porte, surgiu o conceito de concreto massa, que exige medidas para controlar a geração de calor e a variação de volume decorrente, a fim de minimizar a sua fissuração. Estruturas onde há altas gerações de calor estão suscetíveis a criarem um panorama de tensões devido oscilações volumétricas, com isso fissurações podem ocorrer levando em risco a segurança da barragem assim como sua durabilidade (CBDB, 1989).

As barragens à gravidade têm sua estabilidade garantida principalmente pelos esforços de gravidade, ou seja, seu peso próprio. Sendo assim o perfil de uma barragem à gravidade é essencialmente triangular, para assegurar a estabilidade e a fim de evitar a sobrecarga da barragem ou a sua fundação.

Algumas barragens de gravidade são suavemente curvas no plano por razões estéticas ou por necessidades hidráulicas ou econômicas, e sem colocar qualquer desconfiança em sua estabilidade. Com isso, sabendo de sua complexibilidade e multidisciplinaridade, o perfil transversal deverá satisfazer a duas principais condições: as tensões atuantes devem estar dentro de limites pré-estabelecidos e proporcionar estabilidade para o corpo da barragem, suportando o deslizamento na fundação, paralelamente às essas observações deve-se buscar uma seção ótima para garantir a estabilidade e um menor gasto de concreto possível (MARQUES *et al.*, 2011).

Das várias investigações efetuadas concluiu-se que há interação permanente entre projeto e métodos construtivos, devendo ser utilizado com muito cuidado os equipamentos e materiais, assim como o clima também interfere bastante na construção e planejamento. A estrutura de uma barragem é maciça, sendo assim o peso próprio e a termogênese do concreto são bastante importantes no projeto. Pelos grandes volumes existentes, há uma dificuldade de execução, bem como devem ser tomados cuidados com as reações deletérias.

O controle de qualidade precisa ser muito rigoroso, pois, além de prazos apertados correlacionados com custo altíssimos, deve-se focar na segurança do processo. Tal controle também é fundamental, pois em barragens de concreto os modelos são complexos, as normas

para edificações com difícil aplicação, as análises de segurança são bastante sofisticadas assim como a geologia do local interfere com as formas.

Deste modo, uma extensa campanha de sondagens e investigações geotécnicas é fundamental na fase de projeto. Devem ser executados furos, trincheiras, galerias e investigações geofísicas, de modo a caracterizar o mais amplamente possível o subsolo e as ombreiras. As estruturas devem ser sempre assentadas em rochas com adequadas características mecânicas para suportar a carga vertical e conferir estabilidade contra esforços de cisalhamento e deslizamento.

As barragens de gravidade são classificadas, em termos estatísticos, levando em conta suas alturas estruturais. Define-se altura estrutural como a diferença, em elevação, entre a crista da barragem (a elevação da pista de rolamento ou do passeio, caso não exista pista) e o ponto mais baixo da fundação, excluindo-se eventuais zonas de falhas. Desse modo, considera-se o seguinte critério, segundo o *U.S. Bureau of Reclamation*: (i) Barragens baixas: de até 30 m de altura; (ii) Barragens médias: de 30 a 90 m de altura; e (iii) Barragens altas: acima de 90 m de altura.

A escolha da solução de barramento não é nenhum pouco simples, implicando a interatividade de diversas áreas e análise muito criteriosa. A escolha envolve a mitigação dos riscos, capacidade executiva minimização da interferência ambiental, avaliação econômico-financeira holística, levando em conta o arranjo físico geral e o cronograma de obras com possíveis antecipações de receita. Todos esses aspectos precisam ser satisfeitos simultaneamente, por isso diversos arranjos são estudados para se chegar à solução ideal.

A integridade estrutural de uma barragem deve ser mantida em toda a gama de circunstâncias ou acontecimentos que podem surgir em serviço. O arranjo é, portanto, determinado através da análise conjunta de todas as condições de carregamento, e portanto, a estabilidade da barragem e fundação deve ser assegurada em todas as circunstâncias.

As barragens de gravidade (em francês, *barrages poids*, traduzindo o nome do seu princípio de funcionamento), em betão ou alvenaria, são concebidas e calculadas para resistir, apenas pelo seu peso próprio ao impulso da água que retêm, sendo a relação entre a largura da base e a altura definida de forma a verificar esta condição.

A secção transversal de uma barragem de gravidade típica é aproximadamente triangular e a largura da base raras vezes inferior a 80% da altura. O traçado em planta é reto (para barragens de alvenaria) ou com uma ligeira curvatura (para barragens em betão). Inicialmente, a secção transversal de uma barragem gravidade em alvenaria, era um trapézio curvilíneo, em

que a curvatura era continua ou aproximada por um poligonal. Posteriormente esta forma evoluiu para trapézio retilíneo, em que o paramento de montante começou por ser inclinado e mais tarde vertical.

Já com as barragens em concreto armado, surgiram as de gravidade aligeirada de secção vazada. Esta evolução decorreu essencialmente do conhecimento que se foi adquirindo e da consequente confiança em concessões mais arrojadas, bem como da descoberta do cimento Portland. No entanto, também foi motivada por razões de ordem econômica, uma vez que é muito mais simples e, portanto, menos dispendioso construir superfícies retilíneas.

Evoluções recentes das barragens de gravidade são as barragens descarregadoras e as barragens móveis. As barragens descarregadoras são basicamente constituídas por soleiras descarregadoras que podem ou não estar associadas a pilares, os quais, por sua vez, suportam as comportas quando existem.

As barragens descarregadoras dizem-se móveis quando a área total controlada por comportas é uma fração significativa da seção transversal do vale, e, portanto, quando é pequena a sobrelevação do nível da água provocada pela barragem durante a passagem de cheias importantes.

3.2. Tipos Estruturais e Características de Barragem Gravidade

De acordo com ICOLD-CIGB (2008), historicamente, as barragens têm permitido que as pessoas coletassem e armazenassem água em períodos chuvosos para que pudessem usá-la nos períodos de seca, sendo assim, elas têm sido essenciais para o estabelecimento e o sustento de cidades e fazendas, e para o abastecimento de alimentos por meio da irrigação de plantações.

A criação de reservatórios artificiais gerou a concepção de vários tipos de barragens, que geram naturalmente desníveis consideráveis de água nos aproveitamentos hidráulicos. As barragens são definidas como barreiras ou estruturas que cortam córregos, rios ou canais para controlar o fluxo da água, podendo variar desde pequenos maciços de terra até enormes estruturas de concreto.

A escolha do tipo de barragem dependerá, principalmente, da existência de material qualificado para sua construção, dos aspectos geológicos e geotécnicos, e da conformação topográfica do local da obra. Além desses fatores outros também são de extrema importância: a

disponibilidade de solo ou rocha com qualidade e quantidades adequadas; a natureza das fundações; as condições climáticas que podem dificultar a construção de determinados tipos.

As principais alternativas de barragens são as de gravidade, as em arco e as de aterro. Cabe destacar que as barragens de aterro podem ser compostas por mais de um material, e que geralmente recebem uma camada ou núcleo para evitar a percolação de água.

Outros tipos de barragens utilizados no mundo: alvenaria; enrocamento com face de concreto; enrocamento com face de asfalto; enrocamento com núcleo de asfalto; arcos múltiplos; arcos de dupla curvatura; gravidade aliviada; e de contrafortes. A Figura 3.2 mostra seis dos principais tipos de barragens encontradas ao redor do mundo.

Para Marques, Rodolfo e Mello (2007), para um empreendimento hidráulico, além da escolha do tipo de barragem que é importantíssima, é necessário que o local onde a obra será implantada seja muito estudado, pois ele desempenha um papel fundamental na capacidade do empreendimento, nos impactos gerados e também na definição do tipo de barragem.

Cada local escolhido para uma barragem é único, com condições topográficas, geológicas e hidrológicas particulares, sendo assim nenhum local é igual a qualquer outro, a concessão de um determinado detalhe do projeto, normalmente resultado de um processo iterativo, onde várias opções são concebidas, dimensionadas e orçadas para chegar a melhor solução.

Por definição, o melhor arranjo para um determinado aproveitamento hidrelétrico é aquele que consegue posicionar todos os elementos do empreendimento de maneira a combinar a segurança requerida pelo projeto e as facilidades de operação e manutenção com o custo global mais baixo.

Como as barragens são parte crítica e essencial de nossa infraestrutura, elas devem cumprir certos requisitos técnicos e administrativos para garantir sua operação segura, eficaz e econômica.

Segundo o ICOLD/CIGB (2008), alguns desses requisitos são: as barragens, suas fundações e seus encontros devem ser estáveis sob todas as condições de carga (níveis dos reservatórios e terremotos); as barragens e suas fundações devem ser suficientemente vedadas e ter procedimentos adequados de controle de percolação e vazamentos para garantir a operação segura e para manter a capacidade de armazenamento; as barragens devem ter borda livre suficiente para evitar transbordamento de ondas e, no caso de barragens de terra devem incluir uma margem para recalque da fundação e do maciço; as barragens devem ter capacidade suficiente de vertimento da vazão para evitar transbordamento dos reservatórios em casos de enchentes manual de operação e manutenção; é necessária uma instrumentação adequada para monitora-

mento de desempenho; é preciso que haja um plano de monitoramento e observação das barragens e demais estruturas; é necessário um plano de ação emergencial; importante o apoio ao meio ambiente natural; cronograma de inspeções periódicas; revisões abrangentes, avaliações e modificações, conforme seja apropriado.

Figura 3.2 – Exemplos dos principais tipos de barragem e sua localização ao redor do mundo.

(a) Concreto-gravidade: Saquinho, em Cabo Verde,



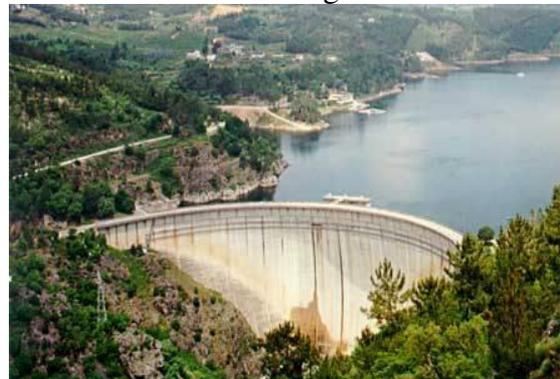
(b) Alvenaria-gravidade: Figueira Gorda, em Cabo Verde



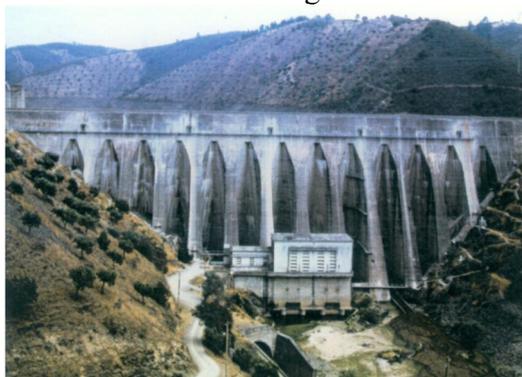
(c) Barragem de aterro: Oroville, nos EUA



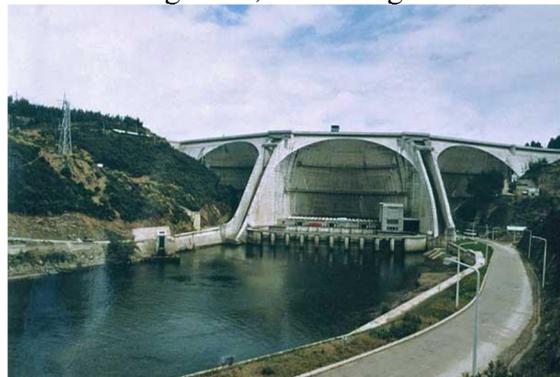
(d) Barragem de abóboda: Cabril, em Portugal



(e) Barragem de contraforte: Pracana, em Portugal



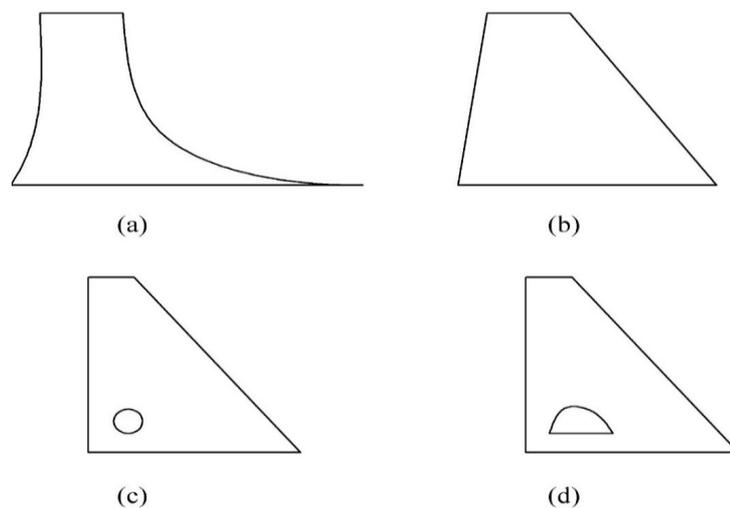
(f) Barragem abóboda e abóbodas múltiplas: Agueira, em Portugal



Fonte: Acervo pessoal do Autor.

Ramos *et al.* (2010) afirma que há essencialmente três tipos de barragens de betão: Barragens gravidade, barragens abóbada e barragens de contrafortes, sendo as barragens de abóbadas múltiplas consideradas uma evolução das barragens de contrafortes. A Figura 3.3 apresenta a evolução do perfil de barragens de gravidade: trapézio curvilíneo, trapézio retilíneo, trapézio inclinado, e gravidade aligeirada-seção vazada.

Figura 3.3 – Evolução do perfil das barragens gravidade: a) Trapézio curvilíneo, b) Trapézio retilíneo, c) Trapézio inclinado e d) Gravidade aligeirada-seção vazada.



Fonte: Ramos *et al.* (2010).

Inicialmente, a seção transversal das barragens gravidade constituídas com alvenaria, era um “trapézio curvilíneo” (FIGURA 3.3a), em que curvatura era contínua, ou aproximada por uma poligonal.

Posteriormente, esta forma evoluiu para um “trapézio retilíneo” (FIGURA 3.3b), em que o parâmetro de montante começou por ser inclinado e, mais tarde, vertical (FIGURA 3.3c), já no “tempo do betão de cimento” surgiram as barragens de gravidade aligeirada, de secção vazada (FIGURA 4.3d), mas este tipo de solução só é viável em obras de altura considerável, para que o vazamento tenha dimensões que justifiquem a sua execução.

Esta evolução do perfil das barragens gravidade decorreu essencialmente do conhecimento técnico e científico que se foi adquirido e da consequente confiança em concepções mais arrojadas, bem como da descoberta do cimento Portland. No entanto, também foi motivada por razões econômicas, uma vez que é muito mais simples e, portanto, menos dispendioso, construir paramentos planos.

As barragens de betão sucederam as barragens de alvenaria, com muitos exemplos em Portugal, com construção na primeira metade do século XX (Ramos *et al.*, 2000). Tem em geral, perfil gravidade e altura limitada a cerca de 50m. devido a condições particulares de alguns países africanos, verifica-se atualmente um incremento na construção de barragens de alvenaria, muitas delas de pequenas alturas, integradas em sistema de abastecimento de água e de regadio.

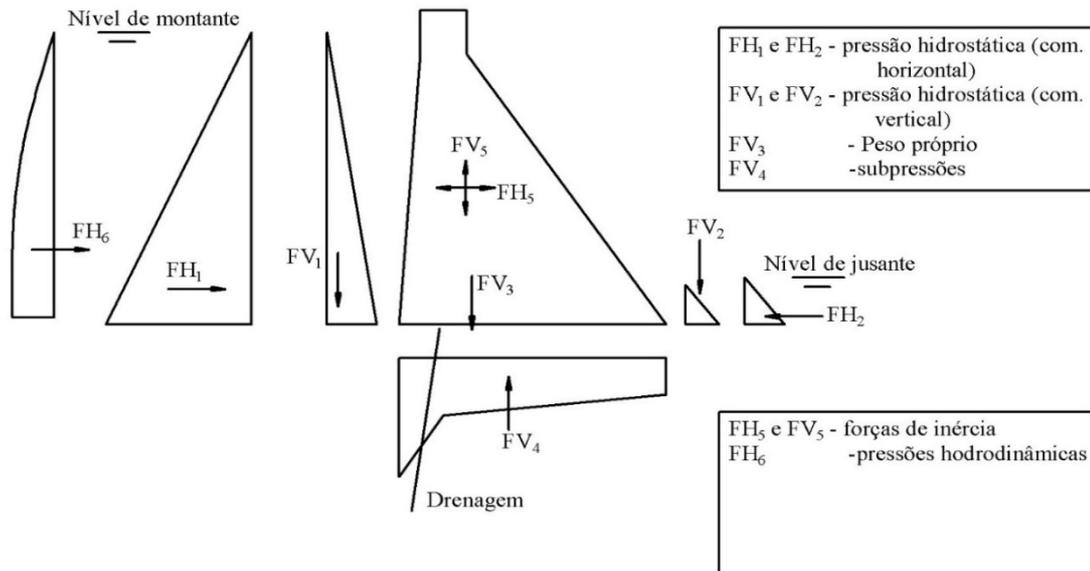
A concessão e as formas das barragens são muito dependentes das condições topográficas, geológicos-geotécnicos, hidrológicos, hidráulicos e ambientais. A opção por um perfil gravidade, de betão ou de alvenaria, deve ser, para além de vantajosa, devidamente fundamentada.

3.3. Forças atuantes e condições de estabilidade

Nos perfis gravidade das barragens de betão e de alvenaria desenvolvem-se tensões internas relativamente baixas, sendo a segurança condicionada pela estabilidade global da estrutura como corpo rígido (deslizamento e tombamento) e pelas tensões transmitidas á fundação.

As forças a considerar no dimensionamento das barragens da gravidade são (FIGURA 3.4) as resultantes das pressões hidrostáticas no paramento (FH1, FV1, FH2, FV2); a resultante do peso próprio (FV3); a resultante das pressões da água na base da barragem, designadas por supressões (FV4); as forças de inércia do corpo da barragem e as pressões hidrodinâmicas no paramento de montante devidas a ações sísmicas (FH5, FV5, FH6).

Figura 3.4 – Forças consideradas no dimensionamento das barragens gravidade



Fonte: LEC/LNEC (2018).

Para além destas forças importa ainda considerar, em certos casos, as devidas aos impulsos de sedimentos e do gelo e ao impacto de detritos e da ondulação. No dimensionamento, é ainda da maior importância a consideração das deformações impostas por variações térmicas, quer as devidas à libertação do calor da hidratação do cimento durante a construção, quer as ambientais ou induzidas pelo enchimento da albufeira, quer, ainda, as deformações impostas por eventuais movimentos da fundação.

O dimensionamento das barragens gravidade baseia-se na estabilidade e equilíbrio de elementos verticais isolados, os blocos da barragem, separados uns dos outros por juntas de contração, sendo o limite da segurança, em princípio, independente da resistência mecânica do betão ou da alvenaria utilizados na construção e das tensões no corpo das estruturas embora se exija que estas tensões não excedem limites admissíveis.

As tensões de compressão nas barragens gravidade são sempre muito baixas quando comparadas com a resistência à compressão, situando-se muito aquém do limite de linearidade da relação tensões-deformações. Já o mesmo se não passa com as tensões de tração que, localmente, podem ocorrer. Será mesmo aceitável a existência de fissuração, desde que localize e não evolutiva.

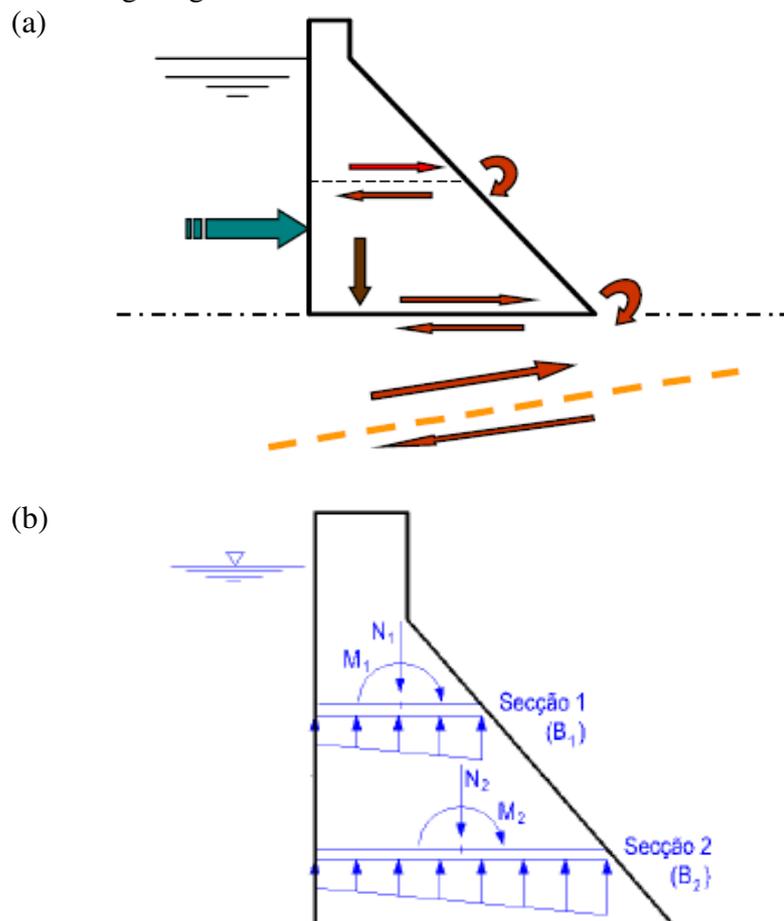
Conforme RAMOS *et al.* (2010), o efeito de arco, que se verifica em barragens gravidade de eixo retilíneo em vales apertados, contribui para a estabilidade global da estrutura, mas não é considerado, em geral, na análise estrutural das obras de pequena a média dimensões.

A estabilidade estrutural das barragens gravidade deve ser, assim, verificada, para hipotéticos mecanismos de deslizamento e tombamento.

A Figura 3.5 mostra os mecanismos de escorregamento e derrubamento das barragens gravidade. O dimensionamento destas baseia-se na verificação da estabilidade de cada um dos blocos da obra, segundo descrito abaixo:

- Segurança ao deslizamento, segundo qualquer superfície horizontal ou sub-horizontal na fundação ou no corpo da barragem (em regra condicionante), como mostra a Figura 3.5a;
- Segurança ao tombamento, em torno de charneiras a jusante (não é condicionante quando não há tensões de tração a montante), como mostra a Figura 3.5a; e
- Tensões no corpo da barragem e na fundação, como mostra a Figura 3.5b.

Figura 3.5 – Mecanismos de escorregamento e derrubamento das barragens gravidade



Fonte: Adaptado de LEC/LNEC (2018).

O deslizamento pode dar-se por planos horizontais no corpo da barragem, correspondente às juntas de betonagem, pelo contacto barragem- fundação ou ao longo de superfícies de descontinuidade existentes na fundação.

Deve verificar-se, em todas as superfícies potenciais de deslizamento, a condição expressa pela Equação (3.1), em que F_R é a resultante das forças resistentes e F_S , a resultante das forças solicitantes que tendem a provocar o deslizamento. A razão entre F_R e F_S usualmente designada por fator de segurança ao deslizamento.

$$F_R \geq F_S ; F_R - F_S \geq 0 \quad (3.1)$$

As forças resistentes são devidas à coesão e ao atrito interno nas superfícies potenciais de deslizamento e aos impulsos hidrostáticos e passivos que se geram a jusante, contrariando a cinemática do movimento. As forças que potencilizam o deslizamento são os impulsos hidrostáticos e de sedimentos a montante, bem como os efeitos dos sismos, nas massas do corpo da barragem e da água do reservatório.

A resultante das tensões tangencias resistentes (V), geradas na interface de contato barragem-fundação ou ao longo de superfícies de descontinuidade existentes na fundação, deve atender ao critério de Mohr-Coulomb, conforme mostra a Equação (3.2), em que B é a largura da base da barragem, N é o esforço normal efetivo na superfície, e c e φ são a coesão e o ângulo de atrito interno da interface, respectivamente.

$$V = cB + Ntg\varphi \quad (3.2)$$

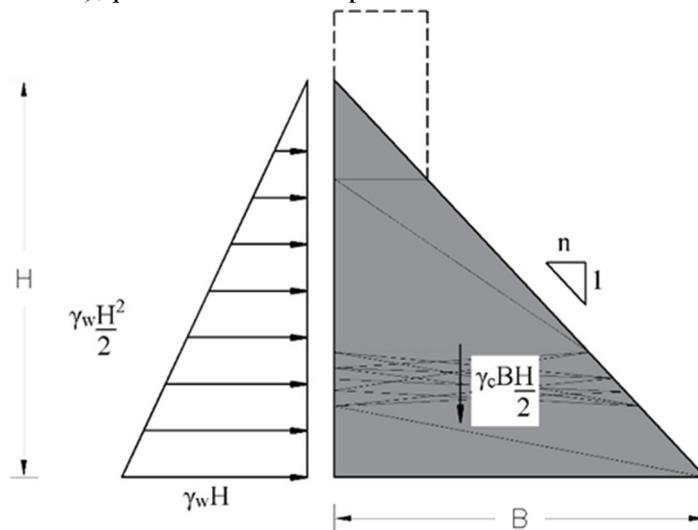
Considerando nula a coesão da interface de contacto, apresenta-se na figura 4.6, o cálculo da relação mínima entre a largura da base e a altura de um perfil triangular, a ser verificada em função do ângulo de atrito da superfície de contacto da resultante das subpressões nulas e as subpressões com diagrama triangular com valor máximo igual ao da pressão hidrostática no pé de montante.

No caso de subpressão total, considerando um ângulo de atrito de 45° na interface (em superfícies devidamente preparadas dos maciços rochosos podem considerar-se valores desta ordem de grandeza) e um coeficiente de segurança da tangente do ângulo de atrito (coeficiente de atrito), $\gamma_\varphi = 1,5$, a estabilidade ao deslizamento só é garantida se a base do perfil tiver uma dimensão semelhante à sua altura ou se o perfil tiver entrega na fundação que permita mobilizar um impulso passivo considerável a jusante (considerou-se o peso específico da água

como $\gamma_w=10 \text{ kN/m}^3$ e o peso específico do betão como $\gamma_c=24 \text{ kN/m}^3$, o que corresponde uma razão entre eles de cerca de 0,4).

A Figura 3.6 mostra um perfil gravidade do tipo triangular sujeito às ações do peso próprio e da água (pressão hidrostática e subpressão), com inclinação do paramento de jusante e ângulo de atrito da interface betão-rocha e coeficiente de segurança de 1,5 para o coeficiente de atrito.

Figura 3.6 – Perfil gravidade triangular sujeito às ações do peso próprio e da água (pressão hidrostática e subpressão), para o caso de subpressão nula.



Fonte: Ramos *et al.* (2010).

As Equações (3.4) a (3.6) apresentam as expressões utilizadas na verificação da estabilidade ao deslizamento da estrutura, e a Tabela 3.2, valores para o ângulo de atrito na condição do coeficiente de segurança ser de 1,5 para o coeficiente de atrito.

$$\gamma_w \frac{H^2}{2} = \gamma_c B \frac{H}{2} \frac{tg\phi}{\gamma_\phi} \quad (3.3)$$

$$tg\phi = \frac{\gamma_w}{\gamma_c} \frac{H}{B} \gamma_\phi \quad (3.4)$$

$$tg\phi = \frac{0,4}{n} \gamma_\phi \quad (3.5)$$

$$\phi = arctg\left(\frac{0,4}{n} \gamma_\phi\right) \quad (3.6)$$

Nas Equações (3.4) a (3.6), γ_w é o peso específico da água, γ_c é o peso específico do betão, γ_ϕ é o coeficiente de segurança da tangente do ângulo de atrito (coeficiente de atrito), B é a largura da base da barragem, H é a altura do diagrama de subpressão, ϕ é o ângulo de atrito interno da interface, e n é a componente da razão que determina a inclinação do paramento de jusante (1:n).

Tabela 3.2 – Valores de ângulo de atrito na condição do coeficiente de segurança ser de 1,5 para o coeficiente de atrito

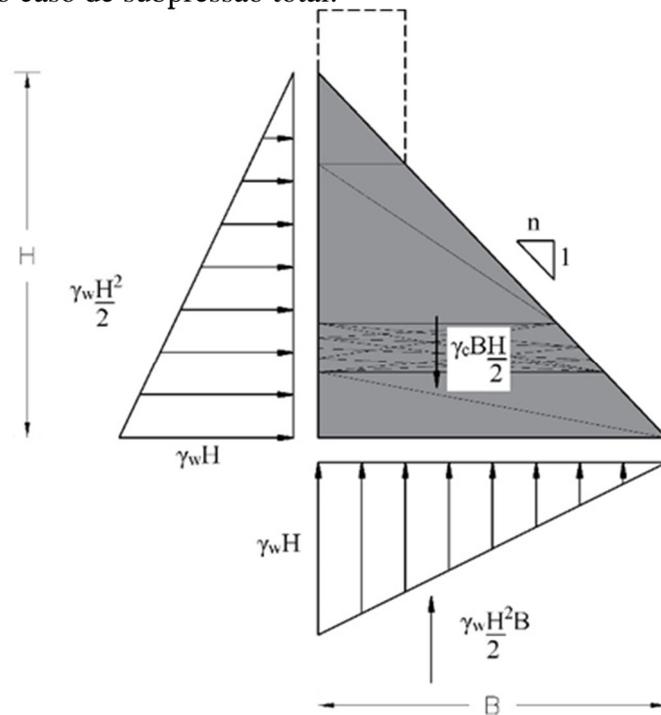
$\gamma_\phi = 1,5$				
$n=0,6$	$n=0,7$	$n=0,8$	$n=0,9$	$n=1,0$
$\phi = 45^\circ$	$\phi = 41^\circ$	$\phi = 37^\circ$	$\phi = 34^\circ$	$\phi = 31^\circ$

Fonte: elaborada pelo autor.

a) Subpressão total (variação linear)

Para a condição de subpressão total (com variação linear do diagrama de pressões), mostrada na Figura 3.7, são válidos as Equações (3.7) a (3.10) e os valores de ângulo de atrito apresentados na Tabela 3.3.

Figura 3.7 – Perfil gravidade triangular, considerando o caso de subpressão total.



Fonte: Ramos *et al.* (2010).

$$\gamma_w \frac{H^2}{2} = \left(\gamma_c B \frac{H}{2} - \gamma_w B \frac{H}{2} \right) \frac{tg\phi}{\gamma_\phi} \quad (3.7)$$

$$tg\phi = \frac{\gamma_w}{(\gamma_c - \gamma_w)} \frac{H}{B} \gamma_\phi \quad (3.8)$$

$$tg\phi = \frac{0,667}{n} \gamma_\phi \quad (3.9)$$

$$\phi = arctg \left(\frac{0,667}{n} \gamma_\phi \right) \quad (3.10)$$

Tabela 3.3 – Valores de ângulo de atrito na condição do coeficiente de segurança ser de 1,5 para o coeficiente de atrito

$\gamma_\phi = 1,5$				
n=0,6	n=0,7	n=0,8	n=0,9	n=1,0
$\phi = 59^\circ$	$\phi = 55^\circ$	$\phi = 51^\circ$	$\phi = 48^\circ$	$\phi = 45^\circ$

Fonte: elaborada pelo autor.

As subpressões instaladas contribuem para a redução das forças normais à superfície potencial de deslizamento, desfavorecendo a segurança. Também a percolação de caudais com velocidade elevadas em superfícies de descontinuidade da fundação, ao promover o eventual arrastamento das matérias de preenchimento dessas fraturas, pode contribuir para a redução de ângulo de atrito e, conseqüentemente, para a diminuição da segurança. A lixiviação química destes materiais pode ter um efeito semelhante.

O derrubamento pode dar-se em torno de eixos de direção perpendicular ao vale, localizados a jusante, no contacto barragem/ fundação ou na extremidade de planos horizontais do próprio corpo da barragem.

Deve verificar-se, relativamente a esses eixos, a condição da Equação (3.11), em que M_R é o momento resistente (estabilizante) e M_S , o momento derrubante. A razão entre M_R e M_S é usualmente designada por fator de segurança ao derrubamento (tombamento). Os momentos estabilizantes são os que contrariam a rotação e os momentos derrubantes são os que a potenciam.

$$M_R \geq M_S ; M_R - M_S \geq 0 \quad (3.11)$$

Relativamente às tensões transmitidas à função, devem ser evitadas as trações no pé de montante. Em regra, quando são garantidas tensões de compressão no pé de montante, o derrubamento não condiciona a segurança dos perfis gravidade, mas a sua verificação deve ser sempre efetuada.

Os maciços rochosos de fundação das barragens de betão são meios fraturados e, na maioria dos casos, heterogêneos e anisotrópicos. Estes maciços rochosos necessitam, em regra, de tratamentos adequados de modo a melhorar as suas características mecânicas e hidráulicas, para que se verifiquem apropriadas condições de estabilidade, deformação e reduzida permeabilidade.

Podem ser adoptados diversas medidas para: (i) aumentar a resistência corte da fundação, a estabilidade dos taludes e a rigidez da fundação; (ii) melhorar o contacto entre o betão da barragem e a fundação; e (iii) reduzir a quantidade de água que circula pela fundação e o valor da subpressão. Os trabalhos de tratamento da fundação são fundamentais para a segurança da obra e dependem muito do tipo e dimensão da barragem.

A camada superficial do maciço rochoso é frequentemente submetida a injeções de consolidação, que conduzem a uma diminuição da deformabilidade na zona adjacente à base da barragem, e assim contribuem para reduzir a deformação do maciço devida à posterior imposição de forças à barragem. Outro importante objetivo das injeções de consolidação é selar algumas das descontinuidades existentes próximo da superfície de contacto betão/maciço que, devido aos trabalhos de escavação, é normalmente uma zona mais permeável do que o maciço localizado a cotas mais baixas.

O controlo do escoamento na fundação das barragens, necessário para evitar subpressões elevadas e a erosão das matérias que preenchem as descontinuidades é normalmente feito com cortinas de impermeabilização e redes de drenagem. A cortina de impermeabilização cria uma zona no maciço através do qual é mais difícil a água passar, e assim reduz a quantidade de água que circula na fundação.

A rede de drenagem é normalmente constituída por uma linha de furos localizados a jusante da cortina de impermeabilização, para recolher e controlar o escoamento e assim reduzir o valor das subpressões. A redução do valor das subpressões aumenta a tensão efetiva e, conseqüentemente, aumenta a segurança da obra.

O processo mais utilizado para reduzir a condutividade hidráulica de uma área do maciço rochoso é com injeções à base de caldas de cimento. A cortina de impermeabilização é usualmente construída através da injeção de uma série de furos alinhados ao longo da inserção da barragem na fundação, com direção normal às principais famílias de descontinuidades. Nas

obras de maior dimensão, pode ser considerado adequado injetar furos dispostos em duas ou mais linhas paralelas.

Nas barragens que dispõem de galeria de drenagem, a cortina de impermeabilização construída a partir desta galeria, com os furos localizados junto ao hasteal de montante. Os primeiros furos injeção de chamados furos primários, estão normalmente afastados de 4 a 10m, por isso a injeção de cada um destes furos não interfere, em geral, com a injeção de furos não interfere, em geral, com a injeção dos furos adjacentes.

A série seguinte de furo injetado, designados por furos secundários, localiza-se a meia distanciados furos primários, e, se for necessário, a série seguinte (furos terciários) a meia distância entre os furos secundários e primário. Antes de proceder á injeção com caldas de cimento são feitos ensaios de permeabilidade tipo Lugeon em cada um dos furos e a decisão sobre a necessidade de injetar mais furos baseia-se usualmente num critério de permeabilidade.

Deste modo é possível construir uma cortina contínua, também designada por bolbo de maciço injetado, e assim reduzir a permeabilidade nessa área do maciço. De salientar que é necessário ter um cuidado especial no valor das pressões de injeção, de modo a não provocar o aumento da abertura das descontinuidades do maciço ou o alargamento de eventuais cavidades existentes na fundação. A profundidade da cortina de impermeabilização costuma variar entre 0,35 e 0,75 H a altura de água na albufeira acima do topo da cortina.

Segundo CALDEIRA (2012), a rede de drenagem é normalmente executada a partir da galeria de drenagem, a jusante da cortina de impermeabilização. Os furos de drenagem só devem ser feitos após a conclusão dos trabalhos de impermeabilização, de modo a minimizar o risco de preenchimento dos furos com caldas de injeção.

O diâmetro usual dos furos de drenagem é 76mm, e estão normalmente afastados de 3m (em Portugal existem barragens com os furos de drenagem afastados entre cerca de 2 a 5 m). Em regra, o comprimento dos furos de drenagem varia entre 20 a 40% do potencial hidráulico, e entre 35 a 70% da profundidade da cortina de impermeabilização.

Os furos de drenagem podem ser não feitos em maciços de boa qualidade, ou revestidos com geotêxtis ou tabus de plásticos perfurados, para garantir que o furo se mantém desobstruído. A drenagem da fundação das obras é sempre relevante, e é particularmente importante em maciços rochosos com descontinuidades de abertura muito reduzida, onde se podem instalar pressões elevadas ao longo do tempo.

Em regras, os requisitos de segurança estrutural só são verificados se for considerado o encaixe do perfil gravidade no maciço rochoso e/ou a redução das subpressões induzida pela construção de uma rede de drenagem na fundação, em geral a partir de uma galeria de

drenagem. Como referido, a galeria de drenagem deve ser posicionada de forma a evitar gradientes hidráulicos e velocidades de escoamento elevados, sendo que a experiência tem mostrado que valores de $\beta=0,3$ conduzem a um bom desempenho.

Nos aspetos hidráulicos da fundação, as Norma Portuguesa de Barragem, NPB recomendam que as permeabilidades sejam inferiores a 1 UL (unidades Lugeon) ao longo de toda a inserção e até profundidade não influenciadas pelo estado de tensão da barragem, mas que possam, em zonas muito localizadas ou para combinações excepcionais de solicitações, atingir valores até 5 UL. Deve referir-se, no entanto, que este critério não é consensual.

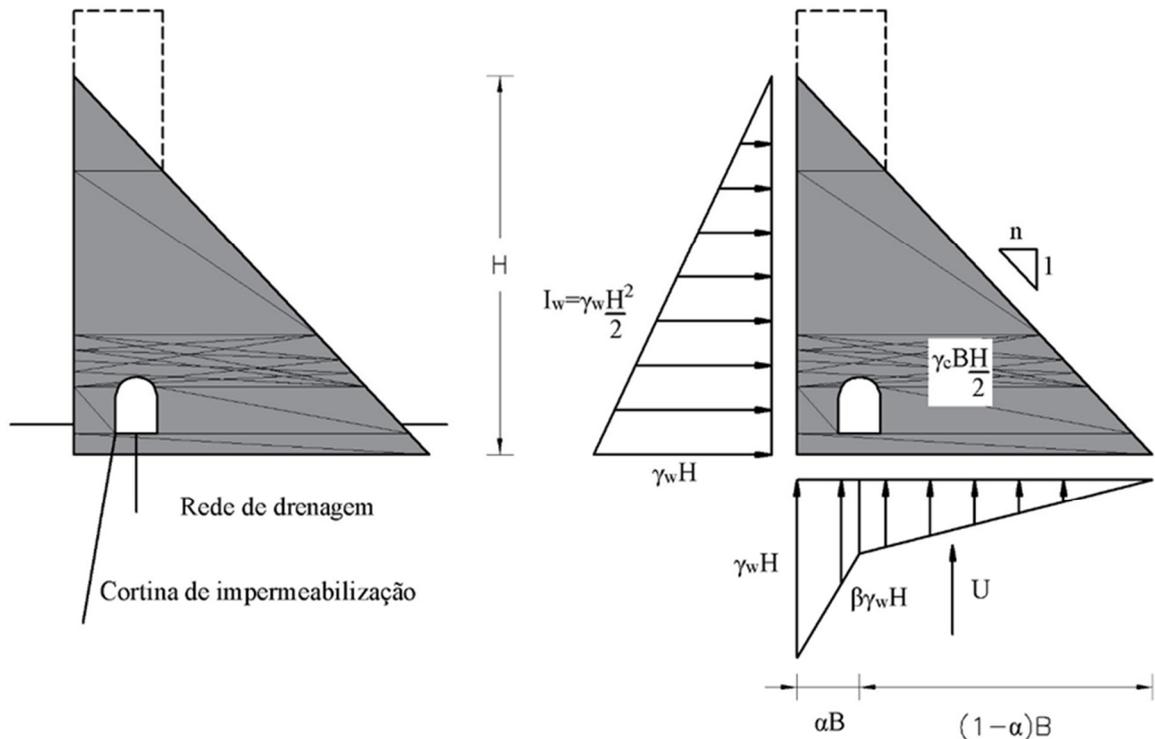
A ICOLD considera inapropriado tentar construir cortinas de impermeabilização que resultem em permeabilidades da ordem de 1 UL, pois este objetivo só pode ser conseguido á custa de programa intenso de injeções, em regra muito dispendioso e só justificável quando é muito elevado o valor da perda de água ou no caso de maciço rochoso muito erodíveis.

Considera-se como boa pratica de engenharia a adoção, nas barragens gravidade com uma altura superior a 12/15m, de galerias ou mesmo de vazamento, que para além de locais ideais para inspeções e para instalação de equipamentos de observação, possibilitam em eficaz tratamento da fundação durante a construção e, se necessário, em outras fases da vida da obra, conforme apresentado na Figura 3.8. Os vazamentos (barragens de gravidade aligeirada) têm ainda a função de serem drenos naturais da fundação.

Em perfis com altura inferior a 12m, em que não é possível inserir galerias, a cortina de impermeabilização deve ser realizada a partir de um pedestal construído no pé de montante, não sendo aconselhável que a consolidação e impermeabilização da fundação sejam feitas por meio de injeções em furos realizados a partir de uma plataforma correspondente a uma junta de betonagem dos blocos, já que isso acarreta, em regra, a formação de uma junta fria de betonagem.

Se esta junta não for convenientemente tratada, podem ocorrer repasses significativos de água e a instalação de pressões consideráveis, o que pode ter consequências nefastas na funcionalidade, segurança e durabilidade das obras. A drenagem do maciço de fundação pode ser feita, nestes casos, com furos inclinados executados a partir das cotas mais baixas do parâmetro de jusante, mas a eficácia deste tipo de solução é reduzida.

Figura 3.8 – Subpressões na base de um perfil gravidade triangular com cortina de impermeabilização e rede de drenagem executadas a partir da galeria geral de drenagem.



Fonte: Ramos *et al.* (2010).

3.4. Quantificação das Ações

As ações nas barragens de betão e suas fundações podem ser agrupadas de acordo com diferentes critérios, nomeadamente: (i) em estáticas e dinâmicas, conforme puderem ou não ser desprezadas, na análise dos respetivos efeitos estruturais, as forças de inércia e de amortecimento; e (ii) de acordo com as solicitações e que dão origem, em ações diretas (traduzidas por forças mássicas ou de superfície atuando na estrutura) e em ações indiretas (traduzidas pela imposição de deslocamento ou deformações).

Além disso, dada a natureza específica das diferentes fases da vida das barragens, podem considerar-se as ações: (i) durante a construção e no período que decorre até ao primeiro enchimento da albufeira; (ii) durante o primeiro enchimento da albufeira; e (iii) ao longo do período de exploração corrente de obra.

Neste contexto, considera-se que as tensões iniciais na barragem são aquelas que estão instaladas no início do primeiro enchimento da albufeira, correspondendo a um estado de referência para as fases futuras da vida da obra.

No período compreendido entre o início da construção e o primeiro enchimento da albufeira, as ações mais importantes resultam de escavações nos maciços rochosos, da colocação dos materiais e das injeções das juntas de contração e das fundações. As ações a considerar são: (i) peso próprio do betão; (ii) variações de temperatura no ar; (iii) variações de temperatura resultantes da libertação do calor de hidratação do betão; (iv) retração; (v) movimentos das fundações durante a construção e durante as injeções para consolidação e impermeabilização; e (vi) injeção das juntas de contração.

Durante o primeiro enchimento da albufeira e ao longo do período de exploração, as ações mais importantes sobre as barragens são as seguintes: (i) ações da água; (ii) variações de temperatura no ar e na água; (iii) ações dinâmicas de origem diversa (sismo naturais e induzidos pela formação do reservatório, ondas de cheias, funcionamento de descarregadores e de outros órgãos hidráulicos etc); (iv) movimentos das fundações resultantes do enchimento da albufeira; e (v) variações de volume do betão.

As ações nunca se exercem sobre as estruturas isoladamente, havendo que considerar as situações correspondentes a combinações plausíveis para cada fase da vida útil da obra. Estas combinações agrupam, de forma criteriosa, várias das ações atrás referidas, pretendendo representar situações relativas à construção ou as condições normais de funcionamento da obra. Estas situações são designadas habitualmente, no caso das barragens, por cenários correntes. As barragens podem ainda estar sujeitas a condições extremas (acidentes) que podem originar o colapso parcial ou total (cenários de ruptura).

As obras deverão estar dimensionadas de modo que seja garantida sua funcionalidade para os cenários correntes e sua segurança para os cenários de ruptura, em qualquer fase da sua vida.

3.4.1. Ações Gravíticas

As ações gravíticas são representadas pelo peso próprio das matérias. A colocação do betão, durante a construção, introduz forças mássicas verticais no volume da estrutura. A intensidade destas forças varia pouco com a composição do betão em massa, podendo adotar-se um valor médio de 24 KN/m³.

As tensões nas barragens de gravidade, devidas ao peso próprio, são pouco condicionadas pelo processo construtivo deste tipo de estruturas. Considera-se assim, com aproximação suficiente, que a distribuição de tensões devidas ao peso próprio pode ser calculada como se esta ações fosse mobilizada, instantaneamente, sobre a estrutura com a sua geometria final.

3.4.2. Ações Térmicas

As variações de temperatura nas barragens constituem uma das ações mais relevantes devido as suas características de permanência e de repetição e aos correspondentes efeitos estruturais e de deterioração dos materiais e das próprias estruturas.

O estado térmico de uma barragem é influenciado por fatores climáticos, pelas propriedades das matérias e, como já se referiu, pelos processos construtivos adotados na obra. Os fatores climáticos permitem-se definir as condições de fronteiras em termos de ação térmica; as propriedades dos materiais que interessa considerar dizem respeito o característico térmico e termomecânicas do betão da barragem e do maciço rochoso de fundação; e os processos construtivos determinam os estados térmicos e de tensão instalados nas obras na altura da sua entrada em serviço.

O calor de hidratação, gerado pela reação dos componentes do cimento com a água a amassadura durante o processo de presa e endurecimento do betão, é uma das mais importantes causas da origem das tensões iniciais nas barragens.

Na hidratação do cimento liberta-se calor, provocando nos volumes de betão uma importante subida de temperatura nos primeiros dias após a betonagem, verificando-se em seguida uma diminuição lenta dessa temperatura.

O equilíbrio com o exterior pode ser conseguido ao fim de alguns meses, antes ou após o primeiro enchimento da albufeira, dependendo das dimensões da barragem e do período de tempo entre o final das betonagens e o início do enchimento. O aumento da temperatura ocorre quando o betão ainda apresenta uma deformabilidade considerável, verificando-se um aumento significativo da sua rigidez no período em que se dá o arrefecimento.

Estes fenômenos têm condicionado o projeto e a construção de barragens, nomeadamente na fixação das dimensões dos blocos e espessura das camadas de betonagem, na escolha do tipo de cimento e da composição dos betões e nos processos e sequências de betonagem.

Para limitar, dentro de valores considerados aceitáveis, as tensões de tração horizontais que se geram na vizinhança das interfaces das diferentes camadas de betonagem (e também para minimizar os efeitos estruturais decorrentes de eventuais assentamento e escorregamento nas fundações), a prática tem aconselhado a limitar a cerca de 20m a máxima dimensão dos blocos.

A fim de reduzir o aumento de temperatura no concreto nos dias seguintes à betonagem, procura-se que: (a) a dosagem de cimento seja a mínima compatível com uma resistência suficiente, utilizando-se frequentemente cinzas ou outro tipo de resíduos para colmatar, na zona dos finos, as curvas granulométricas teóricas; (b) o cimento tenha baixo calor de hidratação, recorrendo-se corretamente a cimentos pozolânicos de alto-forno; e (c) a temperatura de colocação do betão seja a mais baixa possível, utilizando-se muitas vezes a refrigeração artificial durante a amassadura e nas semanas seguintes as betonagens.

Os blocos são betonados por camadas com espessura compreendida, em regra entre 1,5m e 3,0m fazendo-se uma espera mínima de 3 a 4 dias entre camadas, o que possibilita uma dissipação de calor para atmosfera, através da superfície superior do bloco, no período em que se verifica o maior incremento de temperatura.

Em resumo, a quantificação destas variações de temperatura depende, para além da sequência cronológica das betonagens, de diversos fatores como a composição do betão, o tipo de cimento utilizado, a temperatura de colocação, a temperatura ambiente e naturalmente, as propriedades térmicas que influenciam a condução do calor através do betão e regulam as trocas de calor, por convecção e radiação, nas fronteiras (Silveira, 1961).

O primeiro enchimento do reservatório introduz uma variação significativa nas temperaturas no parâmetro de montante, alterando o estado térmico instalado na barragem, especialmente nas cotas mais baixas. Só algum tempo após o primeiro enchimento se atinge no volume da barragem um estado térmico de referência, caracterizado pelo equilíbrio térmico, em termos de temperaturas médias, nas fronteiras em contacto com o ar, a água da albufeira e a fundação.

As temperaturas nas superfícies em contacto com a atmosfera podem ser obtidas, com rigor julgado necessário, a partir das temperaturas medidas no ar, tendo em consideração os efeitos da convecção e da radiação solar, direta e difusa.

A caracterização da temperatura do ar no local de construção de uma barragem não existe, em geral, antes do início dos trabalhos da sua construção. É habitual recorrer-se, na fase de projeto, a medições realizadas em locais próximos com climas semelhantes.

3.4.3. Ações Estáticas da água

A ação mecânica da água sobre um sólido permeável pode considerar-se como a sobreposição da pressão hidrostática sobre as superfícies que constituem o contorno, admitindo que estas são impermeáveis, com as pressões nos interstícios do interior do sólido. Desta forma, as ações mecânicas da água nas barragens de betão e suas fundações induzem, nas zonas imersas: (i) pressões hidrostáticas sobre as superfícies; e (ii) pressões resultantes da percolação nos meios porosos e fraturados.

Nas barragens de betão, dada a pequena permeabilidade do betão em comparação com a do maciço rochoso, considera-se geralmente o corpo da barragem como um meio impermeável, pelo que a ação da água sobre a estrutura de betão se reduz à pressão hidrostática nos parâmetros, as pressões em eventuais fendas ou juntas abertas do corpo da obra e as subpressões nas superfícies de descontinuidade do maciço rochoso e da inserção da estrutura na fundação.

As pressões hidrostáticas sobre o paramento de montante devem ser definidas para o nível de pleno armazenamento (NPA) e o nível máximo de cheia (NMC) da albufeira. No paramento de jusante, devem ser consideradas as pressões hidrostáticas correspondentes aos níveis previsíveis em condições normais de exploração e de máxima cheia.

A pressão hidrostática $P(z)$ varia linearmente com a profundidade z , $p(z) = \gamma_w z$, traduzindo-se, assim, por um diagrama triangular de pressões. A resultante pode ser calculada pela Equação (3.12), em que γ_w é o peso específico da água (igual a 10 kN/m^3) e H , a altura de água a considerar.

$$I_w = \frac{1}{2} \gamma_w H^2 \quad (3.12)$$

3.4.3.1. Subpressões

a) Comportamento hidromecânico de fundações de barragens

A construção da barragem e o posterior enchimento da albufeira conduz à transmissão de forças elevadas à fundação e provoca variações na abertura das descontinuidades por onde a água circula, tanto a montante como a jusante da barragem, modificando os caminhos de percolação. O maciço rochoso de fundação fica submetido a uma significativa diferença de

potencial hidráulico entre as zonas a montante e a jusante da obra (elevado gradiente hidráulico). Para além disso, a variação cíclica do nível da água na albufeira e da temperatura ambiente contribui para uma alteração contínua dos caminhos de percolação (variação na temperatura ambiente provocam alterações na temperatura da estrutura e na zona superficial do maciço da fundação, que podem conduzir a deslocamentos da obra que afetam a deformação da fundação, e, assim, a abertura das descontinuidade através das quais a água circula.)

Nos maciços rochoso de fundação de barragens há uma grande dependência entre os comportamentos mecânicos e hidráulico. A maior parte da percolação dá-se através das descontinuidades do maciço, que se encontram interligadas. De referir que pequenas variações na abertura das descontinuidades podem conduzir a variações significativas da quantidade de água que as percorre.

A percolação da água na fundação influencia o comportamento mecânico, pois as variações de caudal provocam variações nas forças de escoamento e no valor da pressões da água. Estas forças mecânicas alteram o campo de tensões da fundação, provocando deformações no maciço rochoso fraturado. Estas deformações, por sua vez, provocando alterações na permeabilidade e, conseqüentemente, variações nos caudais. Esta interação entre a abertura das descontinuidades do maciço, a permeabilidade, a pressão da água e o campo de tensões no maciço rochoso é designada por comportamento hidromecânico.

b) Condutividade hidráulica dos maciços rochosos de fundações de barragens

A condutividade hidráulica dos maciços rochosos de fundação de barragens de betão é normalmente avaliada recorrendo a ensaios de pressão constante, conhecidos por ensaios tipo Lugeon (Houlsby, 1976). Estes ensaios foram originalmente propostos de modo a estabelecer um critério empírico simples para o dimensionamento da impermeabilização em fundações de barragens (Lugeon, 1932), e têm sido amplamente utilizados para estimar a permeabilidade dos maciços rochosos.

Nas grandes barragens estes ensaios são sistematicamente efetuados: *i*) no decorrer dos estudos geológicos/geotérmico; *ii*) na perfuração dos furos de impermeabilização e drenagem; e *iii*) com a barragem já constituída, durante a abertura dos furos piezométricos. No decorrer dos estudos geológicos os resultados destes ensaios fornecem indicações importantes, que são usados no projeto das medidas de controlo do escoamento. Durante a fase inicial de exploração da barragem, a atuação simultâneo do peso da obra e da pressão hidrostática conduzem a grandes variações de tensão no maciço rochoso, com a conseqüente variação na abertura das descontinuidades condutoras de água e do caudal. A repetição destes ensaios em furos de

drenagem e piezométrico durante o período de exploração da obra pode permitir a detecção de variação na percolação.

O ensaio tipo Lugeon consiste em isolar, com obturadores, um trecho de um ferro, e em injetar nesse trecho água sob pressão até que o caudal para uma dada pressão seja constante. O ensaio era originalmente conduzido à pressão de 1 MPa (10b), e os resultados eram expressos em unidades Lugeon (UL), sendo 1 UL definida como o caudal de 1 L/min por metro de comprimento do trecho ensaiado, a uma pressão efetiva de 1MPa (Houlsby, 1976).

Ao longo dos anos, foram sugeridas diversas modificações para melhorar o ensaio, tal como a adaptação do comprimento do trecho ensaiado ao campo de descontinuidades, a consideração de vários patamares de pressão, e a adaptação dos valores da pressão de ensaio as características do maciço rochoso, à profundidade do ensaio e ao valor máximo das pressões previsto durante o período de vida da obra.

Os ensaios tipo Lugeon indicam valores escalares da condutividade hidráulica. Contudo, a permeabilidade do maciço pode ser muito anisotrópica e as diferenças de permeabilidade em direções diferentes podem ser de várias ordens de grandeza.

Os valores de permeabilidade podem ser indicados em unidades Lugeon e, no sistema internacional, em m/s. É assim possível comparar a permeabilidade de um maciço rochoso heterogéneo e fraturado com a permeabilidade de um meio homogéneo que tinha a mesma absorção de água à pressão de 10 bar. Admite-se usualmente que 1 UL é equivalente a $1,3 \times 10^{-7}$ m/s, ou simplifadamente, igual a $1,0 \times 10^{-7}$ m/s.

c) Valores das subpressões

As pressões da água na base da barragem podem ser medidas com piezómetros, usualmente instalados a partir das galerias de drenagem. Na fase de projecto, ou em obras em que não se disponha de informação relativa ao valor das subpressões, é costume considerar no pé de montante da barragem uma pressão correspondente à altura de água na albufeira, e a jusante da obra uma pressão nula ou correspondente à altura de água a jusante.

Admite-se usualmente um diagrama bilinear de pressões ao longo da base da barragem o potencial é igual à soma do potencial a jusante com um terço da diferença entre o potencial a montante e a jusante. Este valor foi estabelecido a partir de observações piezométricas efetuadas em barragens de betão, pertencentes ao Tennessee Valley Authority e ao *U.S. Bureau of Reclamation*, nos EUA (Casagrande, 1961). No caso de não existência de rede de drenagem, ou de uma rede de drenagem inoperacional, adopta-se uma distribuição linear de

pressões, isto é admite-se que ocorre uma diminuição constante do potencial hidráulico entre o pé de montante e de jusante da obra.

De referir que a distribuição do potencial ao longo da base da barragem depende principalmente da presença e eficiência do sistema de drenagem. Tem sido efetuados diversos estudos por deferentes entidades, nomeadamente pela eletricidade de França (EDF), pelo *Swiss Committee on Dams* (SCD) e pelo *Electric Power Research Institute* (EPR, nos EUA), relativos à análise de subpressões observados.

Estes estudos, cujos resultados foram entretanto apresentados de forma resumida (European Club of ICOLD, 2004), foram efetuados devido à constatação de que as hipóteses de projecto usualmente adotadas, referidas no parágrafo anterior, nunca foram totalmente validadas. Tem sido adoptados diferentes critérios relativos à distribuição de pressões ao longo da base da barragem, e tem sido feito um grande esforço de análise das diferenças nos resultados (European Club of ICOLD, 2004; USACE, 2000).

De salientar, por fim, que na análise de estabilidade de barragens em serviços devem, sempre que possível, ser usado valores de pressão observados *in situ*, como recomendado pelo *European Club of ICOLD*.

d) Análise do comportamento hidráulico de fundações de barragens de betão

Nos maciços rochosos de fundação de barragens o escoamento efetua-se principalmente através das descontinuidades. Atualmente, estão disponíveis diversos modelos descontínuos que permitem simular com rigor o comportamento hidromecânico. Estes modelos são particularmente importantes para avaliação da segurança das obras para cenários de ruptura envolvendo a fundação.

No entanto, a sua aplicação no estudo do escoamento da fundação de barragens é difícil pois este tipo de modelos requer informação que não está em geral disponível, como, por exemplo, informação relativa à complexa geometria da faturação ou às propriedades hidráulicas e mecânicas das descontinuidades do maciço.

No estudo do escoamento em fundação de barragens admite-se que o escoamento das descontinuidades é pequeno quando comparado com a escala da obra. Assim, considera-se o escoamento no maciço rochoso fraturada equivalente ao escoamento em meios porosos, recorrendo-se usualmente ao modelo conceptual de meio contínuo equivalente. Deste modo, admite-se que o escoamento é governado pela lei de Darcy, estabelecida em 1856 a partir de uma

série de ensaios laboratoriais efetuados para estudar o escoamento através de filtros de areia homogénea.

Os resultados destes ensaios indicavam que, macroscopicamente, a velocidade de um fluido (v) através de um médio poroso é diretamente proporcional ao gradiente de pressão ou gradiente hidráulico (i) a que o fluido está submetido, que é a perda de carga por unidade de comprimento, como mostrado pela Equação (3.13), em que k_H é esta constante de proporcionalidade entre v e i , ou seja: o coeficiente de permeabilidade de Darcy (ou condutividade hidráulica), dado em m/s.

$$v = k_H i \quad (3.13)$$

Ou, dado que o caudal por unidade de tempo é dado por $q = vA$, a Equação (3.13) pode ser reescrita como mostrado na Equação 3.14, em que v é a velocidade de escoamento (em m/s), q é a vazão (volume) por unidade de tempo (m^3/s), e A é a área da seção transversal ao escoamento (m^2):

$$q = k_H i A \quad (3.14)$$

Assim, a quantidade de água que atravessa o meio num período de tempo t é dada pela Equação 3.15, em que Q é a vazão (m^3) e t é o tempo de escoamento (s).

$$Q = k_H i A t \quad (3.15)$$

O coeficiente de permeabilidade de Darcy, também conhecido por condutividade hidráulica ou simplesmente permeabilidade, é expresso como uma velocidade, em m/s. A rigor, a condutividade hidráulica é uma medida da permeabilidade que inclui as propriedades do meio e do fluido que o atravessa – densidade (ρ) e viscosidade (μ) –, ou na forma combinada de viscosidade cinemática: $\nu = \mu/\rho$, enquanto a permeabilidade é propriedade intrínseca do meio, e independe das propriedades do fluido (usualmente expressa em cm^2 ou em Darcys).

A permeabilidade (k) pode ser convertida em condutividade hidráulica (k_H) tendo em consideração as propriedades do fluido, como mostrado pela Equação 3.16, em que γ é o peso específico do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, ρ é a densidade do fluido, g é a aceleração de gravidade, e ν , a viscosidade cinemática de fluido.

$$k_H = \frac{\gamma}{\mu} k = \frac{\rho g}{\mu} k = \frac{kg}{v} \quad (3.16)$$

Conforme Baptista e Farinha (LNEC, 2011), os vários ensaios e exemplos práticos realizados permitem tirar as seguintes conclusões:

- i) A execução de uma cortina de impermeabilidade conduz a uma diminuição dos caudais que atravessam a fundação, mas a diminuição das subpressões na base da barragem não é significativa. Além disso, na prática não é possível assegurar a injeção de todas as discontinuidades, pelo que a execução da cortina de impermeabilização não garante que não se instalem na base da barragem pressões elevadas.
- ii) A execução da rede de drenagem provoca uma diminuição acentuada das subpressões na base da barragem, pelo que deve ser assegurada a eficiência deste sistema, mantendo os drenos desobstruídos.
- iii) Na análise do escoamento na fundação de barragens, admite-se, usualmente, que o valor da pressão na base da barragem, na zona da linha de drenagem, depende apenas da distância da boca dos drenos a essa superfície. Esta situação corresponde a admitir que a pressão na boca dos drenos é nula, o que pode ser considerado adequado quando a velocidade de escoamento da água no interior dos drenos é muito baixa (a rigor, a pressão só é nula se a velocidade de escoamento for baixo e se em vez da linha de drenos existir na linha de drenagem uma hipotética vala contínua com a mesma profundidade dos drenos). Contudo, em maciço rochosos com permeabilidades elevadas e em barragens com sistema de drenagem inadequados, a pressão pode ser superior à pressão correspondente à cota da boca dos drenos, pelo contrário, também é possível que a água no interior do dreno não atinja a boca do dreno. Na interpretação do comportamento observado das barragens, nomeadamente na análise do escoamento na fundação, a pressão da água na linha de drenagem deve ser tão próxima quando possível da pressão observada.

e) Diagramas de subpressões de projeto

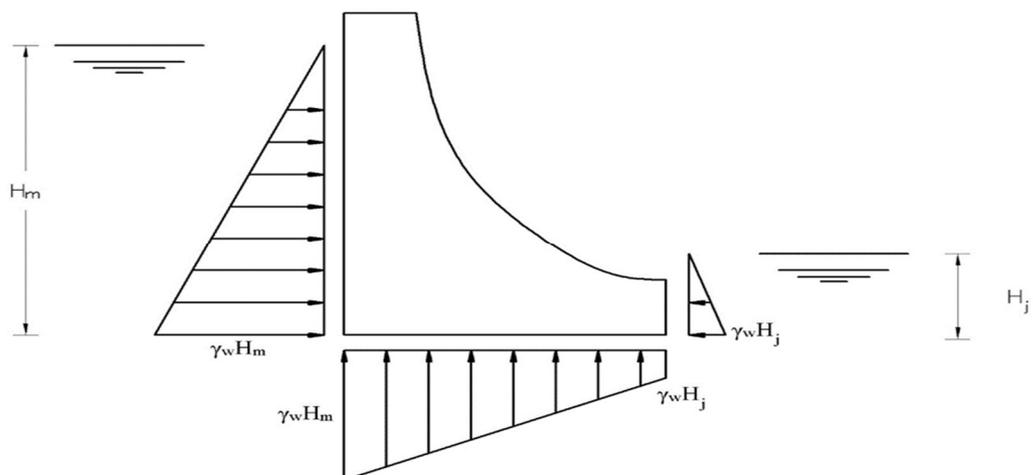
Da análise, ensaios e exemplos realizados, é possível confirmar que os diagramas de subpressões na base da barragem, entre os pés de montante e de jusante, podem ser representados, aproximadamente: i) por um troço linear, no caso de não haver galeria de drenagem; e ii) por um diagrama bilinear, quando existe drenagem realizada a partir da galeria.

Em situações práticas, as subpressões nos pés de montante e de jusante devem ser consideradas iguais às respectivas colunas de água. Se não existir drenagem, deve considerar-se um diagrama linear de subpressões na base Figura 3.9.

Existindo drenagem a sua eficácia é, em regra, menor que a teoria apresentada, pela razão referidas. Assim, em perfis gravidade maciço de pequena a média dimensão, é usual considerar-se que a subpressão na base da barragem, na linha dos drenos, é igual à pressão de jusante acrescida de 1/3 da diferença das pressões de montante e de jusante, desde que a soleira da galeria de drenagem se situe a uma cota igual ou inferior à cota da água a jusante, o que obriga à bombagem da água da galeria para exterior, conforme apresentado na Figura 3.10.

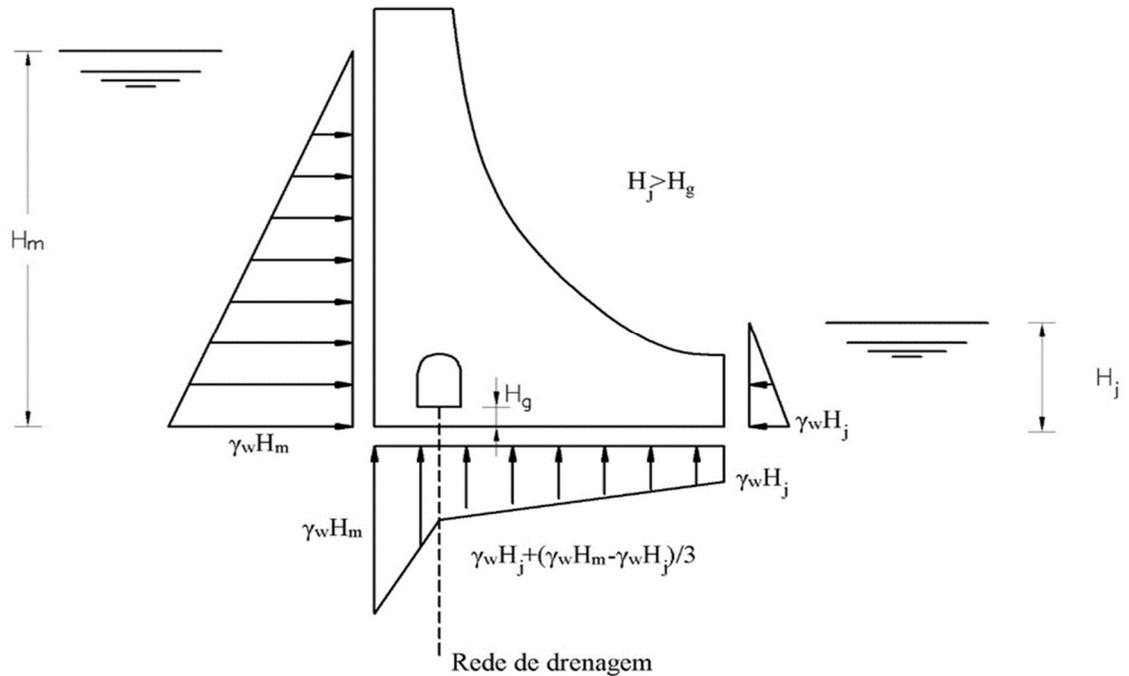
Valores de subpressões daquela ordem de grandeza ou mesmo menores, na linha da drenagem, são conseguidos na prática com furos de 76mm de diâmetro espaçados de cerca de 3m, atingindo uma profundidade de 40% a 50% da altura da barragem. Se a soleira da galeria de drenagem estiver acima do nível da água a jusante, a pressão na linha dos drenos deve ser considerada como se a água a jusante estivesse à cota da base da galeria, conforme Figura 3.11.

Figura 3.9 – Diagrama de subpressões na base da barragem no caso de não existir drenagem na fundação



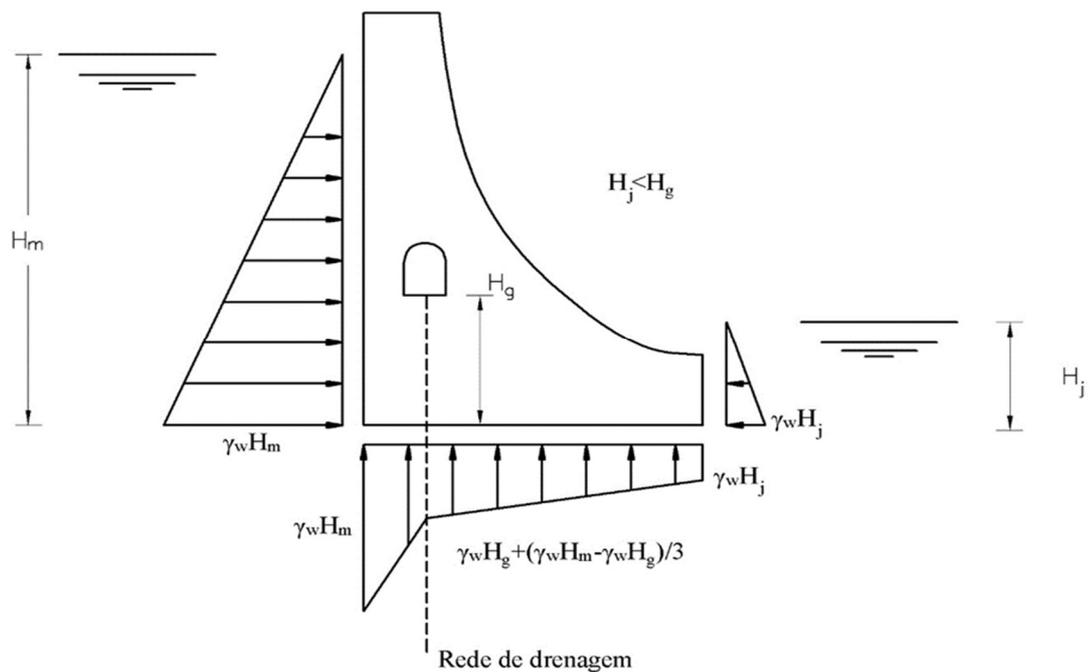
Fonte: Adaptado de LEC/LNEC (2018).

Figura 3.10 – Diagrama de subpressões na base da barragem existindo drenagem da fundação, no caso em que a soleira da galeria de drenagem se situa a uma cota igual ou inferior à cota da água a jusante



Fonte: Adaptado de LEC/LNEC (2018).

Figura 3.11 – Diagrama de subpressões na base da barragem existindo drenagem da fundação, no caso em que a soleira da galeria de drenagem se situa a uma cota superior à cota da água a jusante



Fonte: Adaptado de LEC/LNEC (2018).

3.4.4. *Impulsos de Terras e de Sedimentos*

Em regra, a betonagem do trecho enterrado das barragens é feita contra as superfícies laterais escavadas no maciço rochoso. Estas superfícies devem ser previamente preparadas retirando todos os blocos soltos e eliminando as cunhas potenciais de deslizamento dos taludes escavados (utilizando pregagens ou ancoragens, ou removendo o material rochoso).

Nestas condições, o maciço rochoso dará apoio à barragem e não introduzirá ações sobre a estrutura, passando a constituir um meio capaz de mobilizar as reações, o que irá garantir a funcionalidade e a segurança do conjunto barragem- fundação.

Com o enchimento das albufeiras serão mobilizadas, como referido, as ações da água, nomeadamente as pressões hidrostáticas a montante e a jusante, bem como as subpressões. Em condições de serviço, os movimentos da base da barragem, no sentido montante- jusante, são muito pequenos, não permitindo a mobilização de impulsos passivos nos taludes escavados de jusante. No entanto, em condições extremas de utilização (cenários de ruptura), esses movimentos induzirão reações passivas que podem ser consideradas na análise da estabilidade, desde que afetadas de coeficientes de segurança conservativos.

A exploração da albufeira provoca a acumulação de sedimentos no fundo do vale, aumentando as pressões sobre o maciço rochoso da fundação e sobre o parâmetro de montante. A acumulação de sedimentos depende de muitos fatores, nomeadamente da orografia, das características dos solos e do regime de chuvas da bacia hidrográfica, bem como do regime de exploração da albufeira.

Trata-se de um problema pouco relevante em Portugal, mas assume uma grande importância no caso de solos erodíveis, como acontece em África. Para além dos seus efeitos sobre a estrutura, adiante referidos a acumulação dos sedimentos ao longo do tempo poderá afetar a funcionalidade dos órgãos hidráulicos de segurança fundamentais, nomeadamente a manobra das comportas das descargas de fundo, podendo colocar em risco a segurança da obra.

Os impulsos passivos a jusante, no trecho enterrado, podem ser representados, com aproximação suficiente, por um diagrama triangular de pressões. Desprezando, em favor da segurança, o atrito que se gera na superfície de betão, a resultante do diagrama pode ser calculada considerando o impulso passivo, como mostra a Equação 3.17, em que k_p é o coeficiente de impulso passivo, γ_r' é o peso específico submerso das terras ou do maciço de jusante, e h_j a profundidade enterrada.

$$I_p = \frac{1}{2} k_p \gamma_r' h_j^2 \quad (3.17)$$

O coeficiente de impulso passivo pode ser obtido pela Equação 3.18, em que ϕ é o ângulo de atrito interno das terras ou maciço de jusante.

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} \quad (3.18)$$

As pressões dos sedimentos acumulados na albufeira sobre o maciço de fundação são devidas ao peso dos próprios sedimentos. A ação dos sedimentos sobre o paramento de montante também se pode traduzir, com aproximação suficiente, por um diagrama triangular de pressões. Desprezando o atrito entre os sedimentos e a superfície de betão, a resultante desse diagrama pode ser calculada considerando o impulso em repouso, como mostra a Equação (3.19), em que K_0 é o coeficiente de impulso em repouso, γ_s' é o peso específico submerso dos sedimentos, e h_s é a altura dos sedimentos.

$$I_s = \frac{1}{2} K_0 \gamma_s' h_s^2 \quad (3.19)$$

O coeficiente de impulso em repouso pode ser obtido pela fórmula de Jaky (Equação 3.20), em que ϕ é o ângulo de atrito interno dos sedimentos.

$$K_0 = 1 - \text{sen}\phi \quad (3.20)$$

3.5. Ações sísmicas

O Eurocodigo 8 (EC8, 2010) adota, para a definição da ação sísmica a considerar na verificação da segurança das estruturas relativamente aos estados limites últimos, uma probabilidade de excedência de 10% no período da vida útil de 50 anos, a que corresponde um período de retorno de $T = 145$ anos.

Considerando que as barragens tem um período da vida útil de 100 anos e adotando a mesma probabilidade de excedência para as obras de pequena a média dimensão, ter-

se-á como período de retorno para ação sísmica correspondente ao SMP um valor de cerca de $T = 1.000$ anos, para obras de pequenas e medias dimensão.

As ações sísmicas a considerar são devidas a sismos moderados com elevada probabilidade de ocorrência (sismo base de projeto – SBP) e a sismos de carácter excepcional, associados a um grande período de retorno (sismo máximo de projeto- SMP).

De acordo com as normas portuguesas de projeto de barragem (NPB, 1993), na certificação de segurança para cenário correntes e para cenários de ruptura devem considerar-se, respectivamente, o SBP e o SMP.

Os períodos de retorno a adoptar para o cálculo das acelerações máximas de SBP e do SMP representam ainda um tema controverso da aplicação das NPB. Considerando a lei de probabilidades exponencial para o cálculo dos períodos de retorno.

A ICOLD define, a título exemplificativo, o SBP como aquele que possui 50% de probabilidade de não ser em 100 anos, a que corresponde um período de retorno $T = 145$ anos. O SMP pode ser considerado igual ao sismo máximo expectável SME. Este, por sua vez, poderá ser definido por uma abordagem probabilista, pelo que haverá que definir uma probabilidade de excedência para a ação sísmica durante o período da vida útil da obra.

Conforme ARAÚJO (1995 *apud* CBGB, ANO), um importante carregamento que deve ser considerado no projeto de barragens de concreto e de gravidade em geral é o decorrente de uma excitação sísmica. Mesmo em regiões de baixa intensidade sísmica, como é o caso do Brasil, esse carregamento sempre é considerado no projeto das grandes barragens.

Nos procedimentos de projetos tradicionais, e excitação sísmica é introduzida através de forças estáticas equivalentes. Essas forças são obtidas considerando-se a massa da barragem acrescida da massa de água de uma parte do reservatório. Mas alerta que, entretanto, essa formulação pseudoestática não reproduz com rigor o comportamento dinâmico do conjunto barragem-reservatório-fundação.

Segundo Gutstein (2011), para a análise a estabilidade global de estruturas submetidas ao sismo, é usual o emprego de métodos simplificados como a análise pseudoestática. Nesse tipo de análise se estabelecem os esforços estáticos capazes de simular os efeitos causados pelos movimentos sísmicos, que são os esforços hidrodinâmicos, os empuxos de terra com os efeitos do sismo quando houver e esforços inerciais, determinados a partir do peso próprio da estrutura. Adota-se uma aceleração sísmica característica multiplicadora da aceleração da gravidade (g), incorporando à estrutura ações características devido ao terremoto. Segundo Gutstein, a análise quanto ao sismo, na prática, é feita da mesma forma que a adotada para a análise

quanto ao sismo induzido pela ação do reservatório, considerando-se as acelerações definidas nos sismos de projeto.

Do ponto de vista da análise simplificada de barragens gravidade, devido à elevada rigidez dos perfis gravidade, o primeiro modo de vibração, com uma configuração geométrica correspondente a uma deformada de corte no período plano do perfil, tem uma frequência própria relativamente alta e, conseqüentemente, um período muito baixa. Assim, a resposta sísmica pode ser calculada, com aproximação suficiente, numa análise pseudoestática, considerando o perfil com rigidez infinita e conseqüentemente, adoptar para aceleração estrutural a aceleração de projeto no maciço de fundação.

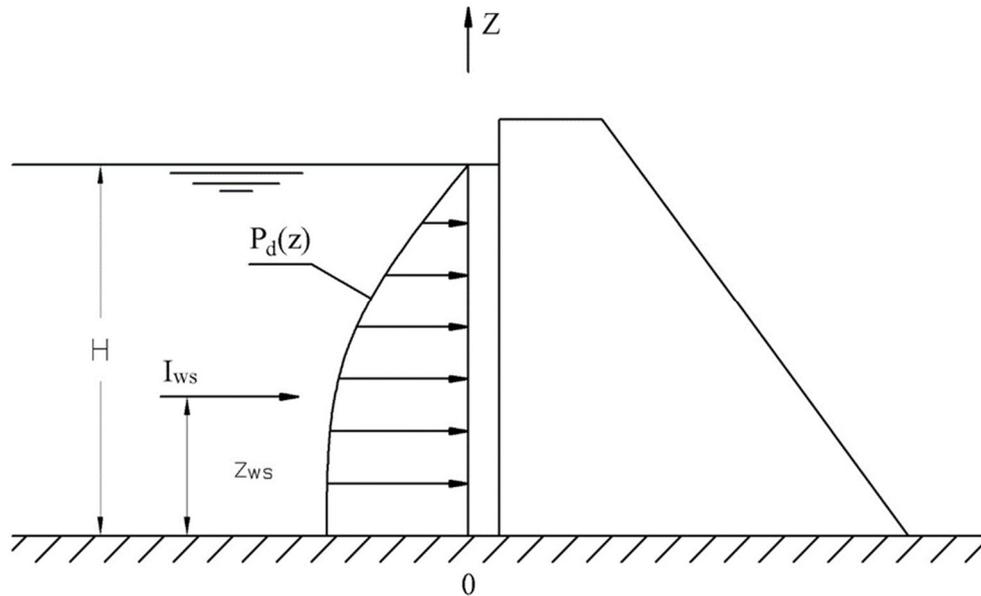
Conforme o *Comité Français des Barrages et Réservoirs* (CFBR, 2006), a aceleração deve ser afetado de um coeficiente de ponderação de 0,67; para que não sejam considerados os efeitos dos picos de aceleração que apenas provocam deslocamentos irreversíveis de valor desprezável. Por outro lado, o Eurocodigo 8 recomenda a consideração de um coeficiente de combinação de 0,3 para a ponderação de 0,20.

A quantificação das pressões hidrodinâmicas na interface estrutura-água pode ser feita considerando o modelo simplificado de westergaard (ver Figura 3.12), em que a solução analítica correspondente a este modelo considera as seguintes hipótese simplificativas:

- i) barragem rígida;
- ii) reservatório semi-infinito;
- iii) água incompressível;
- iv) ondas de superfície desprezáveis; e
- v) ocorrência de, apenas, vibrações horizontais da fundação na direção montante-jusante.

Nas Equações (3.21), (3.22) e (3.23), relativas ao esquema da Figura 3.12, a variável I_{ws} representa a resultante (impulso) das pressões na interface estrutura-água, c_m é um coeficiente que depende da inclinação do parâmetro de montante ($c_m = 0,749$ para parâmetro vertical), z é a coordenada vertical medida desde a base, ρ é a massa específica da água, H é a altura total da água acima da base e g é a aceleração horizontal da fundação (afetada de um fator de 0,67 numa análise pseudoestática, como referido).

Figura 3.12 – Quantificação das pressões hidrodinâmicas na interface estrutura-água



Fonte: Adaptado de LEC/LNEC (2018).

$$p_d(z) = \frac{1}{2} c_m \left(1 - \frac{z^2}{H^2} + \sqrt{1 - \frac{z^2}{H^2}} \right) H \rho a_g \quad (3.21)$$

$$I_{ws} = \frac{8 + 3\pi}{24} c_m H^2 \rho a_g \quad (3.22)$$

$$z_{ws} = \frac{7}{8 + 3\pi} H \quad (3.23)$$

Caso Limite (*Extreme*): analisam-se a combinação de uma cheia normal de projeto e demais ações correspondentes com os efeitos do sismo máximo possível (*maximum credible earthquake* – MCE).

No manual de pequenas barragens do *U. S. Bureau of Reclamation* (1987) é feito um detalhamento maior para critérios de projeto quando a consideração de terremotos, onde três níveis de carregamentos devem ser considerados: sismo básico de operação (OBE - *operating basis earthquake*), sismo básico de projeto (DBE – *design basis earthquake*) e sismo máximo possível (MCE – *maximum credible earthquake*).

Segundo Gutstein (2011), no sismo básico de operação a estrutura suporta o evento e permanece operando; no sismo básico de projeto a estrutura suporta o terremoto com danos

que sejam reparáveis, exceto para aquelas estruturas, sistemas e componentes que são importantes para a segurança, que devem permanecer operáveis.

As estruturas que são vitais para garantir a retenção ou liberação do reservatório devem ser dimensionadas para o carregamento devido ao sismo máximo possível (MCE). Neste caso as estruturas devem funcionar sem permitir uma liberação repentina e descontrolada do reservatório ou prever um esvaziamento controlado do reservatório.

Gutstein (2011) afirma que para os terremotos indicados no *U. S. Bureau of Reclamation* (1987), o sismo básico de operação tem uma expectativa de ocorrer uma vez a cada 25 anos durante a operação da usina, o sismo básico de projeto uma vez em 200 anos e para o sismo máximo possível não há uma preocupação com a probabilidade de ocorrência e somente com relação à sua possibilidade de ocorrência devido às análises geológicas e sismológicas. Sugere no seu estudo que também sejam avaliados casos de carregamentos considerando drenos inoperantes e outras combinações que se julguem necessárias para cada caso particular.

3.6. Verificação da Segurança

Conforme Baptista e Farinha (2012), nos perfis das barragens gravidade desenvolvem-se tensões internas relativamente baixas. A segurança deste tipo de obras é condicionada, em regra, pela estabilidade global da estrutura como corpo rígido (deslizamento e derrubamento) e pelas tensões transmitidas à fundação. Nos casos em que o maciço de fundação apresenta boa qualidade a pequena profundidade, não sendo assim requerida uma grande entrega da estrutura na fundação, são a verificação da segurança ao deslizamento e a não ocorrência de tensões de tração no pé de montante que condicionam as formas do perfil.

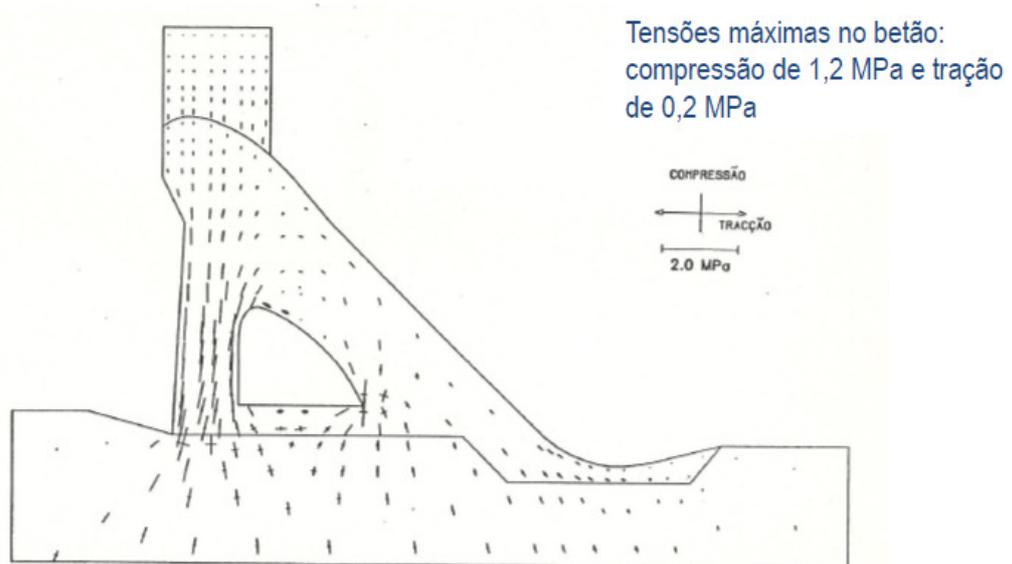
No caso de obra de maior dimensão será ainda necessário fazer verificação adicionais das tensões internas e da estabilidade ao deslizamento das superfícies horizontais de corte correspondentes as interfaces das camadas de betonagem, embora isso não condicione, em regra, o dimensionamento.

No caso de perfis triangulares de geometria simples, o cálculo das tensões internas pode ser feito, com aproximação suficiente, usando as expressões da flexão composta. Como atualmente existe uma grande disponibilidade de programas de cálculo automático baseados no método dos elementos finitos, o cálculo das tensões pode ser feito, com toda a generalidade, usando este tipo de modelação estrutural, considerando estados planos de deformação (perfil contínuo) e de tensão (pilares na zona dos descarregadores).

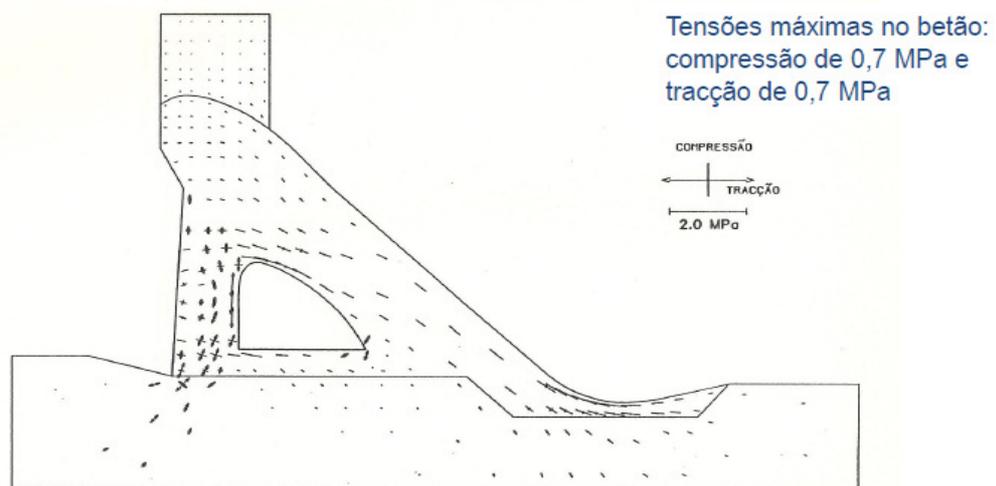
Esta opção permite ainda obter os deslocamentos do corpo da obra, embora isso não represente, em regra um condicionamento nas obras de pequena e média dimensão, pois são em geral, deslocamentos de reduzido valor (menores que 1 cm). Na Figura 3.13, estão ilustradas as tensões principais máximas no betão à compressão e à tração.

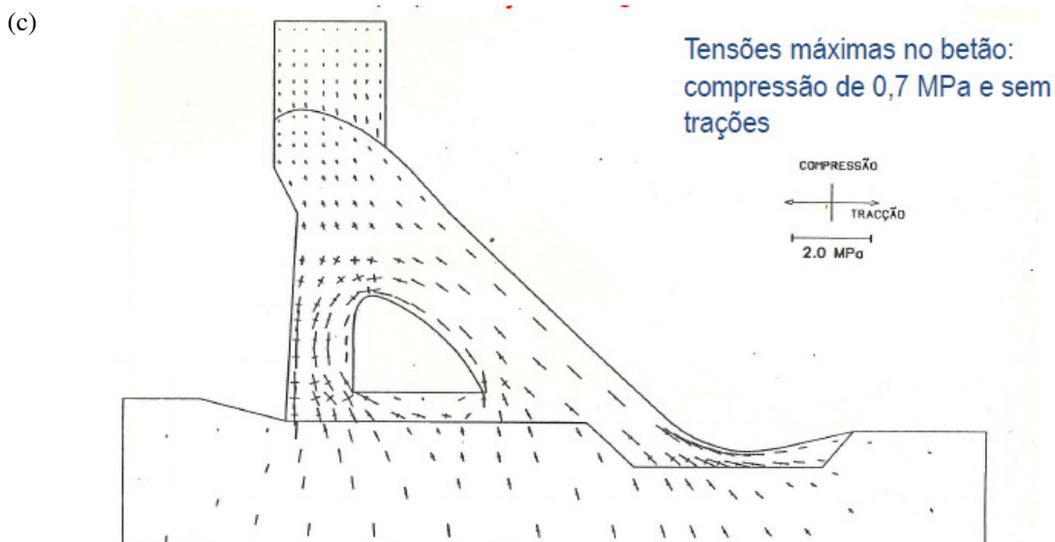
Figura 3.13 – Tensões principais máximas no betão: a) Devido ao peso próprio; b) Devido ações da água: pressão hidrostática e subpressões; e c) peso próprio e ações da água

(a)



(b)





Fonte: Adaptado de LEC/LNEC (2018).

A segurança das obras de concreto de uma barragem é conceituada pelos princípios estabelecidos na norma brasileira NBR 8681/84 – Ações e Segurança das Estruturas. Para a garantia da segurança global da estrutura e de todos os seus elementos estruturais, deverão ser verificadas e atendidas as condições prescritas na referida norma, para os estados limites últimos e de utilização, tendo em conta as combinações das ações correspondentes aos tipos de carregamentos (Eletrobrás, 2003).

A análise de segurança global deve ser feita para todas as estruturas principais, elementos estruturais e sistemas de interação entre as fundações e as estruturas submetidas aos diversos casos de carregamentos e englobará a análise de estabilidade no contato concreto-rocha, a análise de estabilidade em planos superiores e inferiores ao da fundação, a análise de tensões e deformações, a definição dos coeficientes de segurança e a verificação entre as tensões atuantes e as tensões admissíveis dos materiais.

Deverá ser dada especial atenção às verificações correspondentes ao Estado Limite Último de Perda de Equilíbrio Global ou Parcial das Estruturas, admitidas como corpo rígido. Nos projetos de barragens estas verificações correspondem as análises de estabilidade, no sentido de avaliar a segurança global quanto a movimentos de corpo rígido, tais como:

- Deslizamento em qualquer plano, seja da estrutura, seja da fundação;
- Tombamento;
- Flutuação;
- Tensões na base da fundação e na estrutura;
- Estabilidade elástica (flambagem);

- Deformações e recalques; e
- Vibrações.

Segundo ELETROBRÁS (2003) e USACE (1995), algumas normas portuguesas, seguem a filosofia preconizada pela Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD, 1988), na verificação da fiabilidade estrutural de barragens de betão, baseando-se em fatores e coeficientes de segurança globais. Decorrem atualmente, em Portugal e em outros países europeus, estudos no sentido da adopção, na verificação da fiabilidade estrutural das barragens de betão, da filosofia dos estados limites (e dos coeficientes de segurança parciais) definida nos Eurocodigos.

Critérios são, no presente contexto, regras que o projeto deve seguir, para se garantir a mais elevada probabilidade de segurança, entendida como a capacidade do conjunto barragem-fundação-reservatório cumprir os requisitos de comportamento, por forma e evitar incidentes e acidentes. Estes critérios, em muitos aspectos comuns aos diferentes tipos de barragens de betão, apresentam contudo importantes diferenças que convém realçar consoante o tipo de barragem e as deteriorações a que mais frequentemente estão sujeitas.

Cenários são situações que devem ser encaradas para avaliação da fiabilidade das obras (funcionalidade, resistência e a durabilidade) e que se classificam em duas categorias, conforme correspondam às situações de uso normal das obras – cenários correntes, ou de incidente – ou atribuíveis a ocorrências excepcionais – cenários de ruptura ou de acidente.

A segurança é, então, verificada para cenários de ruptura, enquanto a funcionalidade é verificada para cenários correntes. Deve referir-se o estreito paralelismo que existe entre estes cenários e os estados limites de utilização e estados limites últimos, respectivamente, considerados, de acordo com os Eurocódigos, em outros tipos de estruturas.

O Art. 31 das Normas de Projeto de Barragens em Portugal (NPB, 1993) define os critérios a observar na verificação da segurança para cenário correntes e de ruptura. Para cenários correntes, recomenda-se “que as tensões na fundação, quer em elementos volumétricos quer em juntas e superfícies respeitem o critério de Mohr-Coulomb, definido para valores de pico da coesão com coeficientes de segurança mínimos entre 3 e 5, e do coeficiente de atrito interno entre 1,5 e 2”.

Já para cenários de ruptura, é recomendado “que as tensões nas superfícies de ruptura global, tendo em conta as subpressões, satisfaçam o critério de Mohr-Coulomb, definido

para coesão nula e valores residuais do coeficiente de atrito interno, com coeficientes de segurança mínima entre 1,2 e 1,5”, sendo estes os critérios que devem ser seguidos na verificação da segurança.

As ações a considerar na verificação da segurança das barragens gravidade devem ser combinadas entre si para representar situações normais de exploração (cenários correntes) ou excepcionais (cenários de ruptura), sendo usual considerar as combinações que constam da Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Combinações de solicitações a considerar na verificação de segurança para cenários correntes e de ruptura

Cenários correntes	Ações estáticas (NPA)	Peso próprio do perfil e ações estáticas da água para o NPA (pressão hidrostática e subpressão)
	Combinação sísmica (NPA e SBP)	Peso próprio do perfil e ações estáticas da água para o NPA (pressão hidrostática e subpressão) e SBP (forças de inércia no perfil e pressões hidrodinâmicas)
Cenários de ruptura	Ações estáticas (NMC)	Peso próprio do perfil e ações estáticas da água para o NMC (pressão hidrostática e subpressão)
	Combinação sísmica (NPA e SMP)	Peso próprio do perfil e ações estáticas da água para o NPA (pressão hidrostática e subpressão) e SMP (forças de inércia no perfil e pressões hidrodinâmicas)

Fonte: Adaptado de NPB (1993).

3.6.1. Verificação da segurança ao deslizamento e ao derrubamento

A avaliação das condições de segurança ao deslizamento por superfícies de menor resistência na vizinhança da base da barragem requer o cálculo das resultantes das tensões tangenciais atuantes e das resistências, para as combinações de solicitações atrás referidas.

Considerando as disposições do Art. 31º das NPB, em que é considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, a segurança ao deslizamento é garantida se forem respeitadas as condições apresentadas na Tabela 3.5 e, considerando os efeitos do peso próprio, pressão hidrostática a montante e a jusante, subpressões e impulso passivo a jusante.

A Tabela 3.5 mostra as condições de verificação da segurança ao deslizamento na interface betão-rocha para cenários correntes e de ruptura.

Tabela 3.5 – Condições de verificação da segurança ao deslizamento na interface betão-rocha para cenários correntes e de ruptura

Cenários correntes	Ações estáticas (NPA)	$(W - U) \frac{tg\delta}{\gamma_\delta} + B \frac{c}{\gamma_c} + I_{wp} - I_w \geq 0$
	Combinação sísmica (NPA e SBP)	$(W - U) \frac{tg\delta}{\gamma_\delta} + B \frac{c}{\gamma_c} + I_{wp} - (I_w + I_{ws} + S_b) \geq 0$
Cenários de ruptura	Ações estáticas (NMC)	$(W - U) \frac{tg\delta_r}{\gamma_{\delta r}} + I_{wp} + \frac{I_p}{\gamma_p} - I_w \geq 0$
	Combinação sísmica (NPA e SMP)	$(W - U) \frac{tg\delta_r}{\gamma_{\delta r}} + I_{wp} + \frac{I_p}{\gamma_p} - (I_w + I_{ws} + S_b) \geq 0$

Fonte: Adaptado de NPB (1993).

Legenda: W é o peso do perfil de betão; U é a resultante das subpressões na interface horizontal betão-rocha; I_w é a resultante horizontal do impulso hidrostático sobre o paramento de montante; I_{wp} é a resultante horizontal do impulso hidrostático sobre o paramento de jusante; I_p é o impulso passivo no troço enterrado do paramento de jusante; I_{ws} é o impulso hidrodinâmico no paramento de montante; S_b é a força de inércia devido à ação sísmica no perfil de betão; δ é o valor de pico do ângulo de atrito da interface betão-rocha; c é a coesão da interface betão-rocha; δ_r é o valor residual do ângulo de atrito da interface betão-rocha; B é o desenvolvimento do trecho comprimido da interface betão-rocha; γ_δ é o coeficiente de segurança relativo à coesão da interface betão-rocha; $\gamma_{\delta r}$ é o coeficiente de segurança relativo ao valor residual do coeficiente de atrito betão-rocha; e γ_p é o coeficiente de segurança relativo ao impulso passivo a jusante.

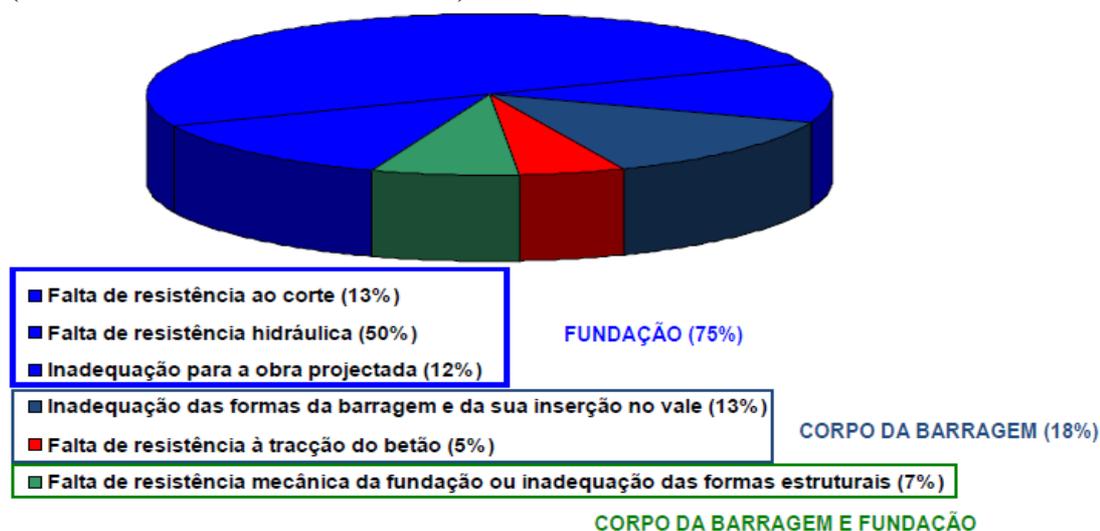
3.7. Ruptura de Barragens de Gravidade

Segundo Ramos *et al.* (2010) e JAUHARI (1999), as grandes barragens são um elemento determinante no aproveitamento dos recursos hídricos, continuando a verificar-se generalizadamente a sua construção num mundo em que as necessidades de água potável, de energia e de alimentos não param de crescer.

As grandes barragens são obras com elevado risco de ruptura sendo, então, a sua segurança uma preocupação a nível mundial, quer dos meios técnico-científicos e dos governos, quer da sociedade civil.

Na Figura 3.14, estão ilustrados principais cenários de acidente (%) em barragem de betão e alvenaria (excluídas as estruturas hidráulicas).

Figura 3.14 – Principais cenários de acidente (%) em barragem de betão e alvenaria (excluídas as estruturas hidráulicas)



Fonte: Adaptado de LEC/LNEC (2018).

Embora se verifique uma significativa diminuição da frequência e dimensão dos acidentes com grandes barragens, fruto da evolução dos conhecimentos técnico-científicos relativos ao seu projeto, construção e análise do comportamento, os acidentes, alguns desenvolvendo-se até à ruptura, continuam a verificar-se.

Após o relato de dois dos mais recentes acidentes, apresentados numa perspectiva “jornalística”, referem-se alguns casos históricos de rupturas de grandes barragens, seleccionados cronologicamente e de forma a apresentar situações envolvendo diferentes tipos de obras e diferentes causas de ruptura.

Segundo um trabalho relativamente recente da autoria de Jauhari (1999), que se apoia nos estudos de recorte estatístico da Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD), 2,2% de todas as barragens construídas até 1950 e 0,5% das construídas após este ano, terão rompido.

Infere-se dos dados de recorte estatístico que a probabilidade de ruptura tem diminuído, consequência de grandes melhorias no projeto, construção e controlo de segurança das obras, mas também se infere que continua a haver acidentes com grandes barragens, causando enormes perdas de vidas e de bens, com é o caso da barragem de Algodões 1 (Piauí, Brasil) e da central de Sayano-Shushenskaya (Rússia), conforme ilustrado nas Figuras 3.15.

Figura 3.15 – Exemplos de rupturas de barragem: Algodões (à esq.) e Savano-Shushenskaya (à dir.)



Fonte: LEC/LNEC (2018).

A principal causa da ruptura de barragens tem sido o galgamento, mortal para as barragens de aterro, mas podendo, em certas situações, provocar também a ruptura de uma barragem de betão, por exemplo, por erosão regressiva do maciço de fundação no pé de jusante, ou por cedência de um encontro. Outra causa frequente de ruptura nas barragens é a erosão interna. Nas barragens de betão, o maior número de colapsos deveu-se a rupturas na fundação ou no contacto barragem fundação, embora se verifiquem casos de ruptura no corpo da barragem.

Martins (2012) apresenta como principais causas de ruptura de barragens o galgamento por insuficiente capacidade de vazão do descarregador de cheias (35%) e problemas na fundação (25%), tais como pressão interna, escorregamentos, não estanquidade das fundações, sobrepressões no paramento de jusante e assentamentos.

Os 40% restantes dizem respeito a várias outras causas onde se incluem erros de construção e de projeto, má exploração da albufeira, falta de qualidade dos materiais, ação de ondas e atos de guerra, entre outros. Para uma barragem de betão, o galgamento pode não constituir um perigo para a respectiva integridade estrutural, enquanto que para barragens de aterro esta ocorrência significa provavelmente a sua ruptura, parcial ou total.

Johnson e Illes (1976) apresentam uma descrição dos vários tipos de ruptura, relacionando cada tipo de barragem (aterro, betão-gravidade e betão em arco) com a forma de ruptura mais comum. Também Singh (1996) apresenta um resumo com as causas de ruptura ligadas a cada um destes três tipos de barragens e define três tipos de condições para se dar a ruptura de barragens:

- condições relacionadas com cargas estáticas (exploração regular da albufeira em que a água se encontra com velocidade nula ou quase nula);
- condições relacionadas com cargas dinâmicas (ocorrência de um sismo); e
- condições de cheia (ocorrência de cheias com deficiente evacuação).

A hipótese de uma ruptura instantânea da estrutura que compõe a barragem, que é correta para as barragens de betão, é irrealista e demasiado pessimista para barragens de aterro. Portanto, vários métodos de proposta da previsão da vazão efluente máximo ou do hidrograma completo e dos parâmetros da brecha, foram apresentados.

Se a ruptura é quase instantânea (ruptura típica de barragens de betão) forma-se uma onda de frente abrupta (*shock wave*) com propagação para jusante, com velocidades e alturas de água muito superiores ao escoamento de base da linha de água. A ruptura quase instantânea provoca uma libertação súbita de água do reservatório e o conseqüente abaixamento do nível de água, originando uma onda negativa ou com propagação para montante.

No caso de rupturas graduais (ruptura típica de barragens de aterro), pode não ocorrer a formação de ondas de frente abrupta, sendo a cheia resultante gradual e progressiva, resultado de um lento processo de desenvolvimento da brecha, podendo variar de 15 minutos até cerca de 12 horas, tendo atingido, em alguns casos, 48 horas sem ter destruído a totalidade do corpo da barragem (Singh, 1996).

A Tabela 3.6 mostra causas de ruptura em barragens segundo Singh (1996).

Tabela 3.6 – Causas da ruptura de barragens

Tipo de Barragem	Causa da Ruptura
Betão de gravidade	Deterioração dos materiais de construção Problemas na fundação Instabilidade do corpo da estrutura Atos de guerra
Betão em arco	Falha dos encontros laterais do vale onde se encontra fundado o barramento Carga excessiva resultante de um enchimento excessivo da albufeira Deslizamento do corpo da barragem Problemas na fundação

Fonte: Adaptado de Martins (2012).

Segundo Bodstein (2019), o rompimento de barragens é uma modalidade de desastres consideravelmente recorrente na história da humanidade. Dois são os principais fatores que podem ser apontados como causa primária desse evento: o advento de um fenômeno natural

intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou o mau planejamento dessa estrutura que independentemente de fatores externos entra em colapso em razão dos erros de cálculos dos engenheiros.

Quando ocorre o primeiro dos fatores apontados acima (fenômeno natural) pode-se classificar o rompimento como um desastre misto, ao passo que na ausência de força externa classifica-se como desastre tecnológico.

O desastre misto ocorre quando há uma somatória entre forças da natureza e falhas na tecnologia humana como causa primária de um desastre. É o que ocorre quando grandes tempestades ou terremotos contribuem significativamente para o rompimento de uma barragem. Já o desastre tecnológico deriva exclusivamente de uma falha na tecnologia humana implantada, é o caso do rompimento de barragens que entram em colapso ao receberem o volume de água para o qual foram planejadas.

No Brasil, o rompimento de barragens de rejeitos minerários é o mais recorrente, no entanto, na Europa, Ásia e América do Norte, muitas barragens de água, voltadas a melhorar o abastecimento humano, se romperam no último século, conforme mostra a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Causas da ruptura de barragens no mundo

Barragem e data de ruptura	Tipo de barragem	Danos causados	Causa primária
St. Francis, em Los Angeles (EUA). Ruptura em 12/03/1928	Barragem de água para abastecimento	450 óbitos	Colapso das fundações e deslizamentos de terra provocados pela pressão do volume de água para a qual foi projetada
Malpasset, na Riviera Francesa (FRA). Ruptura em 02/12/1959	Barragem de água para abastecimento	Mais de 420 óbitos	Pressão excepcional da água proveniente de chuvas torrenciais, composição da rocha da margem esquerda e falha geológica a uma curta distância do rio abaixo (falhas tecnológicas somadas a eventos naturais extremos)
Vajont, em Dolomitas (ITA). Ruptura em 09/10/1963	Barragem de água para geração de energia	Entre 2000 e 2600 óbitos	A barragem não se rompeu, mas houve vazamento gigantesco de água, provocado por um deslizamento de 260 milhões de m ³ de terra e rochas, que atingiu as águas da barragem, causando uma onda de 250 m que varreu o vale a jusante (falhas tecnológicas somadas a eventos naturais extremos)
Teton, em Idaho (EUA). Ruptura em 05/06/1976	Propósitos diversos, inclusive proteção contra enchentes	11 óbitos	Infiltração e crateras na extremidade direita da barragem, causadas por erros de engenharia. Como o desastre foi previsto com horas de antecedência, as

Barragem e data de ruptura	Tipo de barragem	Danos causados	Causa primária
			<p>idades situadas a jusante foram evacuadas, o que reduziu consideravelmente o número de mortes (falhas exclusivamente tecnológicas)</p>
<p>Mogpog, em Marinduque (FIL).</p> <p>Ruptura em 24/03/1996</p>	Barragens de rejeitos de minério	<p>Não houve mortes diretas, mas pouco tempo depois, as pessoas apresentaram doenças relacionadas ao lixo tóxico, e algumas vieram a óbito. O Rio Boac foi contaminado e considerado sem vida, e centenas de pessoas ficaram desabrigadas.</p>	Sem informações
<p>Banqiao, na Província de Henan (CHN).</p> <p>Ruptura em 08/08/1975</p>	Barragem de água para controle de enchentes e geração de energia	<p>25 mil óbitos pela enchente, e 135 por consequências posteriores</p>	<p>O tufão Nina gerou uma tempestade de período de retorno de 2 mil anos, e foi responsável pelo colapso da barragem de Banqiao, Shimantan e um complexo de 62 barragens menores (causas naturais e tecnológicas). OBS. Conforme Brown <i>et al.</i> (2012), o hidrólogo Chen Xing havia alertado para a necessidade da introdução de 12 portas e eclusas na barragem, mas apenas 5 foram adotadas.</p>
<p>Há!Há!, em Quebec (CAN).</p> <p>Ruptura em 19/07/1996</p>	Barragem de água	<p>Entre 7 e 10 óbitos. 16 mil pessoas foram evacuadas, 488 casas destruídas.</p>	<p>Chuvas torrenciais entre 18 e 21 de julho elevaram o nível d'água do lago Há!Há!, e mesmo com a liberação do excedente de água, o dique leste do lago rompeu e os escombros foram arrastados, atingindo uma vila inteira (causa naturais e estruturais)</p>
<p>Sistema federal de diques, em New Orleans (EUA).</p> <p>Ruptura em 23/08 a 30/08/2005</p>	Barragem de água	<p>1.836 óbitos e 705 desaparecidos em decorrência do furacão Katrina. Não há informação especificamente em relação ao rompimento dos diques</p>	<p>A passagem do Katrina, o sexto mais forte da história, causou o rompimento do sistema federal de diques em New Orleans, o que resultou na inundação de 80% da cidade. Alertas precoces sobre o furacão resultaram na evacuação de milhares de pessoas, reduzindo consideravelmente o número de mortes, mas muitos moradores não conseguiram deixar a região, e vieram a óbito (causas naturais e estruturais)</p>
<p>Barragem 3 da Companhia Pittson Coal, na Virgínia (EUA).</p>	Barragem de resíduos e líquidos	<p>125 óbitos e 1.121 feridos, cerca de 4 mil desabrigados</p>	<p>Quatro dias antes, a barragem havia sido inspecionada e considerada "satisfatória". No entanto, chuvas fortes levaram à ruptura, lançando 500 milhões de resíduos líquidos de carvão sobre os habitantes de Buffalo Creek</p>

Barragem e data de ruptura	Tipo de barragem	Danos causados	Causa primária
Ruptura em 26/02/1972			Hollow (falhas tecnológicas e eventos naturais)
Barragem de Boliden, na Andaluzia (ESP).	Barragem de resíduos de zinco, ferro e cádmio	Danos ambientais de longo prazo. Mortandade de peixes e poluição do rio Guadiamar	Falhas estruturais foram constatadas anos antes por um relatório encomendado pela Boliden, mas providências não foram tomadas. Brown <i>et al.</i> (2012) assevera que a causa da negligência foi uma relação de custo-benefício, já que as multas por poluição na Espanha eram irrisórias
Ruptura em 25/09/1998			

Fonte: Adaptado de Martins (2012).

Analisando-se os desastres ocorridos no exterior verifica-se a grande importância dos sistemas de alerta precoce, os quais são capazes de proporcionar a evacuação dos locais atingidos e conseqüentemente mitigar o dano ambiental reflexo mais irreversível, qual seja: a morte.

Dentre os fatores de vulnerabilização a esses eventos estão as legislações negligentes (multas irrisórias, regulamentação precária), a corrupção dos agentes públicos, bem como fatores naturais, como solos instáveis e ausência de planejamento e tecnologias adequadas nas construções.

No Brasil, o número de barragens rompidas nos últimos anos também é alarmante, principalmente no Estado de Minas Gerais, onde 6 barragens se romperam nos últimos 15 anos.

Aquela região contém muitas cavernas, então, na medida em que vai se depositando água, ela cria pressão e o terreno vai acomodando -- o que produz pequenos abalos sísmicos, inferiores a 2 na escala Richter. Isto vai mexendo na estrutura. E na época do ano em que aquela região recebe maior intensidade de chuva, esta combinação de fatores causa um desastre (Martins, 2012).

Com relação ao restante do país, segundo Bol. Uol. (2020), ainda sustenta que a ausência de estudos consistentes de sondagem e de inspeção continuada das obras contribui significativamente para o cenário recorrente de colapso de barragens. Fora de Minas Gerais 4 barragens romperam nos últimos 12 anos.

Conforme Marques (2009), as rupturas de barragens de concreto quase sempre estão relacionadas com problemas na fundação. Um exemplo de gestão inadequada de riscos geológicos/geotécnicos é o rompimento da barragem de Camará, onde houve uma falha na ombreira esquerda, devido a elevada subpressão e baixo ângulo de atrito disponíveis, o que também evidencia que a ruptura se deu pela fundação e não pelo corpo da barragem.

Segundo Almeida *et al.* (2007 *apud* Johnson e ILLes, 1976) e Singh (1996), diversas são as causas que podem levar ruptura de uma barragem podendo um acidente ocorrer devido a um fator isolado ou a um conjunto de fatores combinados.

Esses autores apresentam uma descrição de vários tipos de ruptura relacionando cada tipo de barragem (aterro, betão-gravidade e arco-gravidade) com a forma de ruptura mais comum, bem como um resumo com as causas de ruptura ligadas a cada um destes três tipos de barragens.

Almeida *et al.* (2007 *apud* Johnson e Illes, 1976) ainda acrescenta ao pontuado por Singh (1996) e mostrado na Tabela 3.6 como causas de ruptura de barragens de betão em arco: saturação das fundações rochosas e erosão das fundações na região de jusante.

Conforme Fontenelle (2007 *apud* ICOLD, 1995) e os Bulletins 99 e 109 (ICOLD 1997), as rupturas das barragens de gravidade (concreto ou alvenaria) têm como causas principais:

- a) Resistência ao cisalhamento insuficiente em descontinuidades pela fundação;
- b) Sub-pressão excessiva nas fundações, em razão de drenagens não adequadas ou inexistentes;
- c) Não consideração de esforços raros, como resultantes de sismos;
- d) Erosão da rocha de fundação situada no pé de jusante.

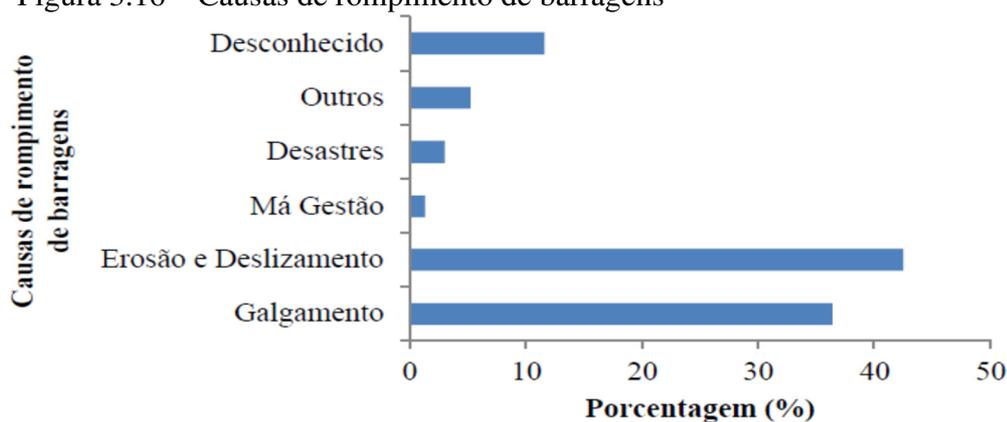
Relacionam-se alguns dados relativos a rupturas de barragens que foram obtidos do Boletim 99 (ICOLD,1995):

1. 2.2% (117 de um total de 5.268) das barragens construídas antes de 1950 romperam, sendo que a partir desta data o percentual caiu para menos de 0,5% (59 de um total de 12.138), (excluída a China);
2. Em termos absolutos, a maioria das rupturas ocorre nas barragens pequenas, as quais se constituem na maioria das barragens construídas, de forma que a razão entre barragens rompidas e barragens construídas, de uma determinada altura H, varia muito pouco com a altura.
3. A maioria das rupturas se dá em barragens recém-construídas. A maior proporção (70%) das rupturas ocorre mais frequentemente nos 10 primeiros anos e mais especialmente no primeiro ano de operação.
4. Para as barragens de concreto, os problemas de fundação constituem a causa mais frequente: com a erosão interna e baixa resistência ao cisalhamento, cada uma contando com 21%;

5. Para barragens de terra e enrocamento, a causa mais comum de ruptura é o galgamento (31% como causa principal, 18% como causa secundária) seguida de erosão interna no corpo da barragem (15% como causa principal e 13% como causa secundária) e problemas de fundação (12% como causa principal e 5% como causa secundária);
6. Em relação às barragens de alvenaria de pedra, a causa mais frequente é o galgamento (43%) seguida de erosão interna das fundações (29%);
7. As principais ações adotadas após a ruptura são: abandono da obra (36%), construção de nova obra a partir de um novo projeto (17%) e reconstrução total com o mesmo projeto (16%); e
8. Quando a ruptura está relacionada a estruturas auxiliares, o caso mais frequente é a insuficiência de vazão do vertedouro.

Mota (2017 *apud* Zhang, Xu e Jia, 2007) coletaram 593 casos de falhas em barragens com o objetivo de analisar quais foram as maiores ocorrências de falhas em barragens em vários países. Esses dados são de vários tipos de barragens (concreto, terra, terra-enrocamento, alvenaria e outros) e de vários países (sendo Estados Unidos, Índia, Reino Unido, Austrália e África do Sul os mais coletados). Várias causas foram detectadas e estão apresentadas nas Figuras 3.16 e 3.17.

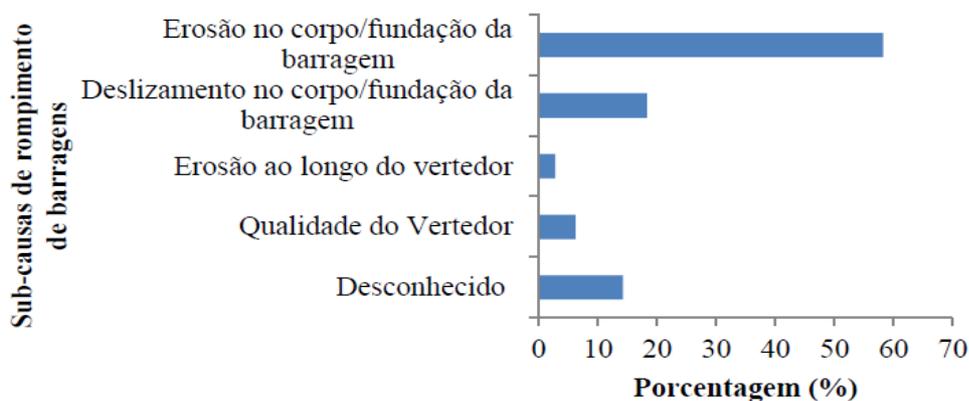
Figura 3.16 – Causas de rompimento de barragens



Fonte: Adaptado de Mota (2017).

Observa-se na Figura 3.16 que as causas de rompimento de barragens com a maior percentagem de ocorrência são a erosão e deslizamento e o galgamento, porém ambos são causas gerais. A Figura 3.17 apresenta as sub-causas com maior percentagem de ocorrência.

Figura 3.17 – Sub-causas de rompimento de barragens



Fonte: Adaptado de Mota (2017).

No caso específico das barragens de Betão e Alvenaria, portanto barragens de gravidade, conforme ainda ICOLD (1997), no mundo, das 4.500 “grandes” barragens de gravidade em operação em 1995, em torno de 2.500 têm menos de 30 metros de altura.

Existem também milhares de “pequenos” barramentos de barragens de gravidade, em geral, barragens de derivação e aquelas formando os vertedouros de barragens de terra. O concreto gradualmente sucedeu a alvenaria entre 1900 e 1930 nos países industrializados.

Nos países de mão de obra de baixo custo (na África, Ásia e especialmente China e Índia) a alvenaria ainda é bastante utilizada. Cerca de 1/3 das grandes barragens de gravidade menores que 30 m de altura são em alvenaria, a proporção cai com o aumento da altura. Desde 1988 algumas dezenas de estruturas menores que 30 metros de altura têm sido construídas de concreto compactado a rolo (CCR).

Cerca de 120 “grandes” barragens de alvenaria de pedra foram construídas antes de 1900 (incluindo-se 80 barragens com altura inferior a 30m) que apresentavam perfis estreitos e fundação deficiente. Foram reportadas 10 rupturas (8%), incluindo 5 delas com alturas menores que 30m.

Foram construídas 600 grandes barragens, incluindo 300 com altura inferiores a 30 metros, no período entre 1900 e 1930. 10 tiveram suas rupturas reportadas, sendo 6 com alturas menores do que 30 metros.

Os registros de segurança de barragens de gravidade construídas antes de 1930 foi de fato pior que os de barragens de aterro, mesmo a probabilidade de ruptura sendo similar, mas

o fato da ruptura de barragem de gravidade ser mais rápida tem-se um maior número de vítimas para este tipo de barragem.

Cerca de 40% das rupturas ocorrem durante o primeiro enchimento, usualmente por causa da fundação; ocorre principalmente em barragens com alturas superiores a 30m. As rupturas subsequentes ao primeiro enchimento são devidas a anormalidades no nível do reservatório, a preocupação é maior nas barragens mais altas e longas.

A maioria das rupturas se dá após os 10 anos de operação, portanto, não deve haver relaxamento na vigilância principalmente devido ao fato de que a ruptura, se ocorrer, será rápida. Das 10 rupturas de barragens ocorridas a partir de 1900, 2 foram por ato de guerra, 6 por cheias e 1 por ruptura de barragem a jusante.

O custo de não cumprir as exigências por granulometria dos materiais, juntas construtivas e resfriamento do concreto não se justifica mesmo para barragens menores que 30 metros de altura, isto faz com que não haja registro de ruptura de barragem por deficiência de concreto, mesmo as construídas de 1900 a 1930.

MENESCAL (2009) afirma que na África do Sul o galgamento é responsável por 50% dos incidentes, seguidos da erosão interna (em solos dispersivos) com 30%. A instabilidade de taludes responde por 34%. Os 20% restantes são devidos a erros humanos, práticas inaceitáveis, liquefação ou rupturas nas estruturas auxiliares.

Conforme ELETROBRÁS (2003), uma barragem deve ser uma estrutura segura, sempre projetada, construída, operada e mantida dentro da mais perfeita técnica existente.

O estudo da ruptura de uma barragem é importante, sendo o vale do rio a jusante habitado ou não. Existe sempre a necessidade de se determinar riscos de perdas de vidas humanas e, também, danos econômicos, sociais e ambientais.

Este estudo deverá determinar a planície extrema de inundação a jusante da barragem, em uma extensão em que os danos possam ser considerados desprezíveis, mediante inundações naturais extremas.

Deverá ser feita uma avaliação preliminar para determinar as implicações sociais e econômicas de uma provável ruptura da barragem, permitindo iniciar estudos mais aprofundados e a elaboração do Plano de Ações Emergenciais (PAE).

Todas as barragens devem ser classificadas quanto às consequências de uma ruptura em potencial, onde devem ser considerados, entre outros, os seguintes fatores:

- Populações a jusante;
- Danos materiais;
- Danos ao meio ambiente; e

- Danos à infraestrutura da região.

Deverá ser adotada a classificação mostrada na Tabela 3.8, optando-se pela situação mais desfavorável:

Tabela 3.8 – Classificação de acordo com categoria de dano

Consequência da ruptura	Perdas de vidas	Econômico, social e perdas ambientais
Muito Alta	Significativa	Dano excessivo
Alta	Alguma	Dano substancial
Baixa	Nenhuma	Dano moderado
Muito Baixa	Nenhuma	Dano mínimo

Fonte: elaborada pelo autor.

Os critérios de classificação de categorias de danos econômicos, sociais e ambientais devem ser baseados nas consequências das perdas em relação a região afetada.

Quando do estudo da ruptura deverá ser considerado, concomitantemente, o escoamento da vazão de projeto pelo vertedouro.

As barragens podem romper por diversas causas, entre elas:

- Rompimento de um dos taludes da barragem (montante ou jusante);
- Ruptura da fundação (fratura de rocha, deslizamento de camadas, etc.);
- Galgamento, normalmente por evento hidrológico extremo; e
- Ruptura por entubamento, em função de falhas no corpo da barragem.

A segurança, relativamente a fenômenos associados à percolação, das obras de engenharia de barragens pode ser conseguida através de observância, isoladamente ou em associação: (i) da manutenção da água afastada de zonas nas quais pode causar danos, adotando sistemas de impermeabilização e (ii) do controle da água que aflui à estrutura, concebendo sistemas de drenagem (Caldeira, 2012).

Conforme o Eurocódigo 7, existem essencialmente quatro tipos de ruptura associados à percolação:

- por levantamento global (flutuação);
- por levantamento hidráulico;
- por erosão interna; e
- por erosão tubular.

A flutuação ocorre quando a pressão na água dos poros instalada sob uma estrutura ou sob um estrato de terreno de baixa permeabilidade se torne mais elevada do que a tensão total vertical média (devida à estrutura e/ou aos estratos de terreno subjacentes.)

O levantamento hidráulico aparece, quando forças de percolação de sentidos ascendentes, atuando contra o peso do solo, reduzem a zero a tensão efetiva vertical. As partículas de solo são então impelidas para cima pelo fluxo de água, produzindo-se assim ruptura do solo (efervescência).

A ruptura por erosão interna é produzida pelo transporte de partículas de solo no interior de um estrato, na superfície de contacto entre dois estratos de solo ou na superfície de contacto entre um estrato de solo e uma estrutura. Este processo poderá evoluir para uma erosão regressiva e conduzir ao colapso da estrutura do solo.

A ruptura por erosão tubular é uma forma particular de ruptura por erosão interna em que a erosão começa à superfície ou no parâmetro de jusante e depois progride em sentido regressivo originando a formação de um túnel de escoamento, em forma de tubo, no interior da massa de solo, entre o solo e uma fundação ou na superfície de contacto entre estrato de solo coesivo e um estrato de solo sem coesão. A ruptura ocorre logo que extremidade de montante do túnel de erosão atinge a albufeira.

O controle da erosão interna e da erosão tubular é efetuado por meio do estabelecimento de limitação ao gradiente hidráulico.

A erosão interna pode ser causada por falta de proteção do filtro (filtros ou drenos com grandes vazios), deficiente compactação ao longo de condutas ou de valas de fundação, buracos de roedores, raízes apodrecidas, falhas ou fissuras em rochas de fundação ou em encontros, estratos grosseiros na fundação ou em encontros, fissuras em drenos rígidos, ao longo de condutas ou em núcleos de barragens.

A existência de pressões intersticiais elevadas pode induzir escorregamento de taludes e a ruptura de fundações de barragens de aterro, ao levantamento global ou flutuação de soleiras de descarregadores ou de canais, após o escoamento e a rupturas por liquefação de barragens devido a ações sísmicas.

Todos os maciços terrosos ou rochosos, naturais ou alterados pelo homem, têm uma estrutura específica e complexa capaz de permitir a passagem da água ou a sua percolação.

Verifica-se que, nos solos e nos agregados, o escoamento é quase sempre laminar, sendo válida a lei de Darcy, dada pela Equação (3.24), em que Q representa a vazão percolada, k é a condutividade hidráulica do solo, i é o gradiente hidráulico e A é a área da seção transversal normal à direção do fluxo do solo (que inclui os vazios e partículas sólidas).

$$Q = KiA \quad (3.24)$$

A água é um fluido praticamente incompressível com resistência ao corte desprezável. Estas propriedades associadas tornam a água muito problemática, uma vez que é capaz de penetrar rapidamente na mais pequena fissura e exercer forças elevadas.

Quando a água passa através do solo (aqui entendida como maciços terrosos e rochosos), realiza um trabalho, que se traduz pela perda de carga total, H . A perda de carga é devida à resistência friccional do solo à percolação, a qual determina o estabelecimento de uma força F sobre a amostra.

Verifica-se que, para haver equilíbrio, a soma da força F com a força induzida pela descida da água de uma altura h_2-h_3 tem que ser igual à diferença entre as pressões da água em cada uma das extremidades da amostra vezes área, A , da sessão, como mostram as Equações (3.25) e (3.26), em que V representa o volume do solo:

$$F - (h_2 - h_3)\gamma_w A = (h_1 - h_2)\gamma_w A - (h_4 - h_3)\gamma_w A \quad (3.25)$$

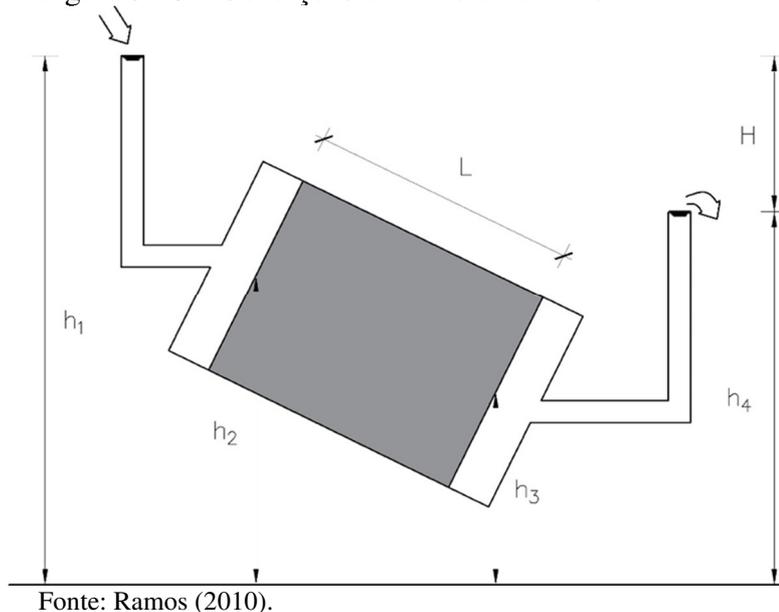
$$F = H\gamma_w A = \frac{H}{L}\gamma_w V \quad (3.26)$$

A força de percolação por unidade de volume do solo é, então, como apresentado na Equação (3.27), em que i é o gradiente hidráulico.

$$J = \frac{F}{AL} = \frac{H}{L}\gamma_w = i\gamma_w \quad (3.27)$$

Esta força por unidade de volume tem direção paralela à direção do fluxo, conforme pode ser visualizado na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Condições de fluxo unidirecional



As forças de percolação são frequentemente, tidas em linha de conta nos cálculos para projeto de muitas obras de engenharia civil. Se essas forças atuam em maciços terrosos e não são susceptíveis de um equilíbrio estável, podem ocorrer rupturas de grandes proporções. Se essas forças instaladas ao nível das partículas do solo são elevadas e essas partículas não são firmemente impedidas de se deslocar, sobrevêm erosão com consequentes rupturas por erosão tubular.

Conforme Caldeira (2012 *apud* Taylor, 1948), as forças de percolação são forças volúmicas. O mesmo sucede com as forças devidas ao peso próprio do solo e da água, sendo que estas forças podem ser calculadas de diversas maneiras, considerando:

- O peso submerso do solo e a força de percolação
- O peso total do solo e da água e a resultante das pressões intersticiais nas fronteiras;
- O peso das partículas sólidas, o peso da água e a resultante das pressões intersticiais nas fronteiras.

As forças de percolação, em conjunto com o peso próprio, podem melhorar ou piorar as condições da estabilidade do maciço ou de uma fundação, tudo dependendo da direção da atuação dessas forças de percolação.

Na análise de estabilidade das barragens, utilizam-se métodos em que as forças correspondentes ao peso dos segmentos verticais do maciço (fatia) são decompostas em forças

tangenciais e normais à superfície de deslizamento em estudo, analisando a estabilidade com base na razão entre as forças estabilizadoras (componentes normais N multiplicadas pela tangente do ângulo de atrito) e as forças de tombamento T (componentes tangenciais).

As forças de percolação atuantes nas partículas sólidas individuais podem atingir valores que em certas circunstâncias, dão origem à erosão interna e a rupturas por erosão tubular. Para evitar estes fenómenos, recorre-se a drenos e a filtros. Estes órgãos, desde que convenientemente projetados, são, teoricamente, capazes de garantir uma proteção total relativamente aos gradientes instalados, por mais elevados que sejam. No entanto, a um adequado projeto pode não corresponder uma construção adequada, ensinando a prática que são frequentes construções deficientes de filtros e de drenos.

As redes de percolação permitem o cálculo da pressão intersticial em qualquer ponto contido na massa de solo saturado, nomeadamente ao longo de qualquer superfície impermeável em contacto com o solo saturado.

O controle da percolação em formações rochosas é tradicionalmente, conseguido por tratamentos por injeções de produtos com composição adequada, sob núcleos impermeáveis de barragens de terra e de enrocamento ou no prolongamento de cortinas impermeáveis a montante.

Estes tratamentos são, em regra, executados a partir de uma viga de encabeçamento dos furos de injeção, necessária em rochas muito fraturadas ou de reduzida resistência mecânica. A viga, designada por plinto, minimiza a fuga de caída de injeção para superfície e proporciona uma certa impermeabilização na zona superior da fundação.

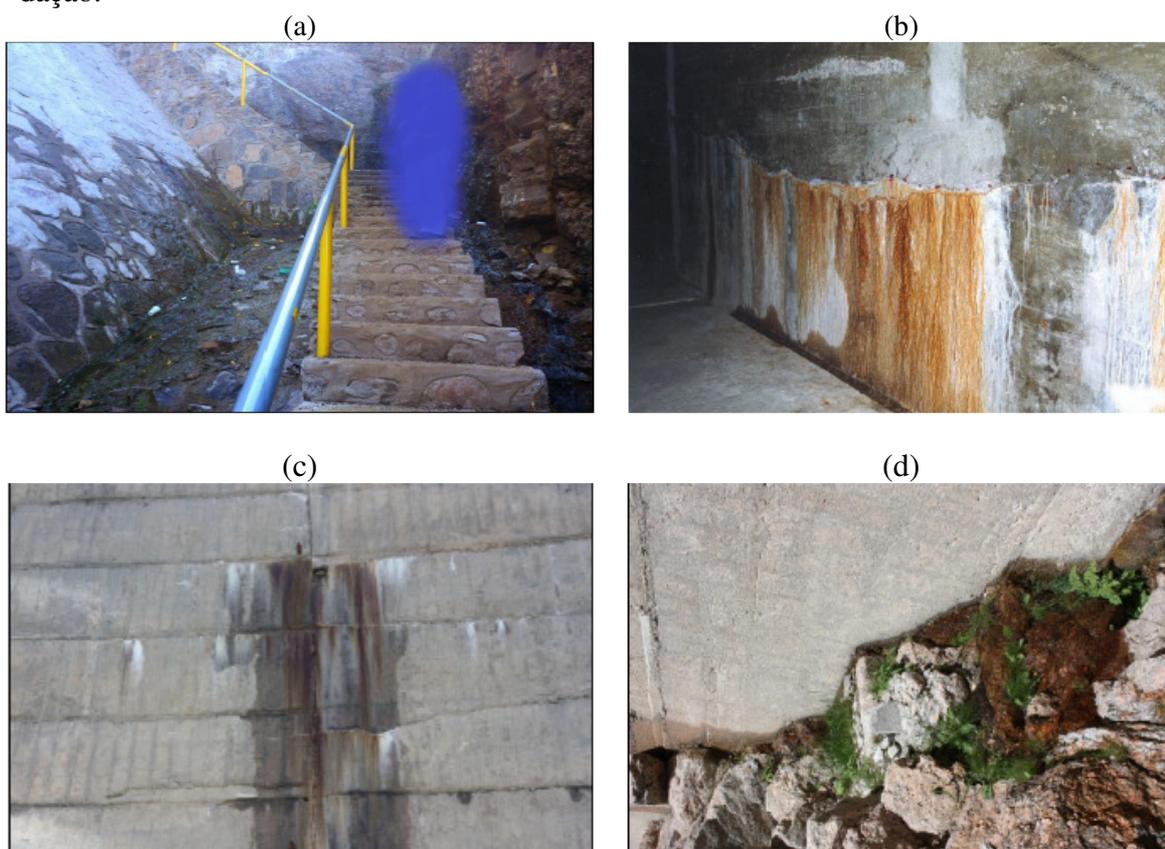
As cortinas de injeções permitem uma apreciável redução de caudais percolados, mas são muito pouco eficientes na eliminação de subpressões. Para atingir este último objetivo é mais conveniente recorrer a um sistema de drenagem adequado (Caldeira, 2012).

Admite-se, por exemplo, que se a eficiência é de 90%, a permeabilidade da cortina de 1/10 da permeabilidade da fundação em que está inserida ($k_{\text{injetada}} = 0,10 k_{\text{inicial}}$), pelo que existem 10 quebras de potencial na zona injetada equivalentes à diferença assumida na zona não tratada, num total de 20. A perda de carga na cortina será, então, igual a 0,5 h e o caudal percolada terá uma redução de cerca de 45%.

Como pode verificar-se, uma cortina com 95% de eficiência ($k_{\text{injetado}} = 0,05 k_{\text{inicial}}$) reduz o caudal inicial percolado através da fundação a 37%. Se se atender que, para se obter uma eficiência de 90%, é necessário que 99% das fendas e fissuras sejam injetadas, pode antecipar-se que só muito raramente uma cortina de injeções permite um razoável controlo de caudais.

Na Figura 3.19, estão ilustradas algumas situações de percolação pelas ombreiras, fundações e corpo da barragem, repasses e ressurgências no maciço de fundação à jusante e nas encostas, resultantes de inspeções visuais, que são problemas comuns em obras de alvenarias, concreto e outros tipos de barragens, tanto em Cabo Verde como noutros países.

Figura 3.19 – Percolação, infiltração, repasses e ressurgências: a) Ombreiras, corpo da barragem, fundações e encostas, b) percolação e infiltração nas paredes interiores de galeria de injeção e drenagem, c) repasses no paramento jusante e d) ressurgências na fundação.



Fonte: Acervo pessoal do Autor.

4. MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

4.1. Aspectos Básicos

Conforme ANA, 2016, os documentos do projeto e construção de uma barragem deverão conter, em princípio, os estudos hidrológicos e de simulação da operação do reservatório, que permitiram proceder ao dimensionamento hidráulico dos órgãos extravasores e de operação, assim como definir determinados parâmetros relativos ao dimensionamento da barragem.

Os estudos hidrológicos originais devem ser objeto de revisão, incorporando novos dados básicos obtidos no período compreendido entre o projeto da barragem e a revisão periódica de segurança, assim como as possíveis variações das características hidrológicas ao longo do tempo (alterações de usos de água a montante, alterações climáticas, entre outros).

A revisão dos estudos hidrológicos permitirá obter fundamentalmente os seguintes elementos:

- Hidrogramas das cheias naturais para vários períodos de recorrência;
- Hidrograma da cheia natural e modificada para verificação da adequação dos órgãos extravasores existentes e/ou das suas regras de operação, considerando os tempos de recorrência mínimos recomendados de acordo com a informação atual sobre o tipo, altura e classificação da barragem; e
- Atualização das regras de operação do reservatório.

As conclusões dos estudos hidrológicos devem incluir recomendações de natureza hidráulica visando a adequação dos aspectos relevantes da barragem, tais como capacidade de descarga do vertedouro, borda livre (diferença entre a cota da crista e o nível de máxima bem como vertedouro e repercussões sobre as estruturas a jusante do vertedouro).

A Tabela 4.1 apresenta para barragens de pequeno, médio e grande porte, definidas em função do fator X, as atividades a desenvolver nos estudos hidrológicos.

Tabela 4.1 – Estudos hidrológicos a desenvolver em função do porte da barragem

Atividade	Porte da Barragem		
	Pequeno	Médio	Grande
1. Obtenção e atualização de dados básicos	X	X	X
2a. Obtenção e atualização dos hidrogramas de cheias naturais para vários períodos de recorrência	X	X	X
2b. Obtenção e atualização dos hidrogramas de cheias naturais e modificadas para vários períodos de recorrência, para verificação da adequação dos órgãos extravasores existentes e/ou de suas regras de operação	X	X	X
2c. Atualização das regras de operação do reservatório	X ^(*)	X	X
3. Atualização do estudo de inundação das cheias de projeto e de ruptura	X ^(*)	X	X

Fonte: Adaptado de ANA (2016).

Legenda: X: estudos detalhados; X^(*): estudos simplificados

4.2. Estudos Hidrológicos

Conforme Campos (2009), nas décadas de 1950 e 1960, foram desenvolvidos muitos modelos matemáticos em Engenharia Hidrológica. O corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (*U. S. Army Corps of Engineers*) contribuiu significativamente com a criação de programas, os quais foram reunidos na família HEC (*Hydrologic Engineering Center*) que mais tarde evoluiu para HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*), que é um programa desenvolvido para simular os processos de chuva-deflúvio em bacias hidrográficas.

Neste presente estudo a simulação realizada têm a ver com a simulação das bacias hidrográficas e as seis barragens em estudo, cujo objetivo foi de definir os hidrogramas de cheia correspondentes aos hietogramas que foram determinados por convolução desses hietogramas com o hidrograma unitário sintético do *Soil Conservation Service*, por intermédio do modelo HEC-HMS desenvolvido pelo *U. S. Army Corps of Engineers* (nova versão do modelo HEC – HMS 4.2.1). As componentes deste modelo caracterizam-se por relações matemáticas simples, que pretendem simular os processos meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos que condicionam a relação entre a precipitação e o escoamento. A utilização deste programa contempla a análise da precipitação, da interceptação/infiltração, evapotranspiração e do escoamento.

A simulação da transformação da precipitação em vazão e da propagação da vazão ao longo do sistema de drenagem tem grande utilização em recursos hídricos, em diferentes

estudos, inclusive no próprio entendimento dos processos envolvidos na parte terrestre do ciclo hidrológico (Tucci, 1998).

O desenvolvimento de estudos na área de hidrologia viabiliza projetos de obras de infraestrutura hídrica por mais de um século. Com isso, diversos métodos para a determinação da intensidade de precipitações foram equacionados ao longo do tempo visando uma modelagem adequada das vazões de projeto (Campos *et al.*, 2017).

A modelagem hidrológica objetiva a definição das vazões máximas em diferentes pontos da bacia para os tempos de retorno e cenários pré-determinados. De forma a possibilitar a obtenção destes dados, é necessário que se tenha o histórico das vazões. A fonte de obtenção da série histórica utilizada foi a de Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG) de Cabo Verde.

Ao se projetar os vertedouros para barragens de acumulação de água (albufeiras), faz-se necessário estudar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica, geralmente realizado através do estudo da resposta hidrológica do sistema a uma precipitação calculada para determinado período de retorno, geralmente a cheia milenar ou decamilenar, utilizando-se parâmetros hidrológicos da bacia hidrográfica (Musy e Higy, 2011).

A resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica a um evento de precipitação é medida pela observação da quantidade de água que passa pela seção de controle do sistema, sendo caracterizada, principalmente, por sua velocidade e intensidade. Mas, o fluxo de água medido à seção de controle está diretamente relacionado às características físicas da bacia hidrográfica (MUSY e HIGY, 2011), tais como a área de drenagem, a medida linear do comprimento, o formato e a inclinação da bacia, parâmetros de tempo de escoamento, o uso e o tipo de solo. A maioria dos modelos hidrológicos requer característica da bacia hidrográfica, um parâmetro de tempo, que reflita o tempo de escoamento da mesma.

SILVA e FERNANDES (2020) afirmam que a inexistência de estações pluviométricas para estudo das vazões escoadas nas bacias e diminuta extensão das séries históricas de precipitação máximas diárias, normalmente inferiores a 30 anos de dados para a maioria dos postos pluviométricos da Ilha de Santiago (de acordo com os dados de precipitação do INMG, 2017), afetam a análise hidrológica das barragens em Cabo Verde.

Conforme Silva e Fernandes (2020), para análise hidrológica das barragens em estudo, foi empregado o modelo hidrológico HEC-HMS (USACE, 2016).

O modelo hidrológico chuva-vazão adotado foi também o mesmo empregado pelas consultoras correspondendo ao hidrograma unitário do SCS, tendo-se calculado o tempo de

retardo (time lag) correspondente a $(0,6tc)_{\text{mínimo}}$, ao invés de $(0,6tc)_{\text{médio}}$ que foi utilizado na elaboração dos projetos executivos das seis barragens.

O método de propagação de cheias utilizado é o puls modificado, sendo que a laminação da cheia sobre cada vertedouro foi calculada em função do hidrograma de projeto da cheia milenar reavaliada com base no menor tempo de concentração e calculada automaticamente e diretamente pelo modelo HEC-HMS. Para que isso pudesse ser determinado, foi necessário criar sub-bacias, rios, junções e reservatório, como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Elementos da modelagem usando o HEC-HMS

Elemento Hidrológico	Descrição
Subbasin	Elemento usado para representar a bacia hidrográfica. Dada a precipitação, o fluxo de saída do elemento sub-bacia é calculado subtraindo-se as perdas, transformando excesso de precipitação em corrente de fluxo na saída da sub-bacia
Reach	Elemento usado para transmitir o fluxo a jusante no modelo de bacia, sendo que a entrada neste elemento pode vir de um ou vários elementos hidrológicos de montante
Reservoir	Elemento usado para representar a barragem. Contém também os dados do vertedouro e os de <i>dam break</i> , usados na simulação de ruptura, localizando-se a jusante da bacia
Junction	Elemento usado para ligar elementos hidrológicos de montante. A entrada neste elemento pode ser de vários elementos de montante, e a saída é calculada somando todas as entradas
Diversion	Elemento usado para fazer desvio do rio. Tem uma entrada e duas saídas, sendo possível desviar vários rios
Source	Elemento sem entrada, com uma saída. É uma das duas únicas maneiras de produzir fluxo no modelo de bacia
Sink	Elemento com várias entradas, mas sem saídas. Entradas múltiplas são adicionadas para determinar a quantidade total de água que entra no elemento

Fonte: USACE (2016).

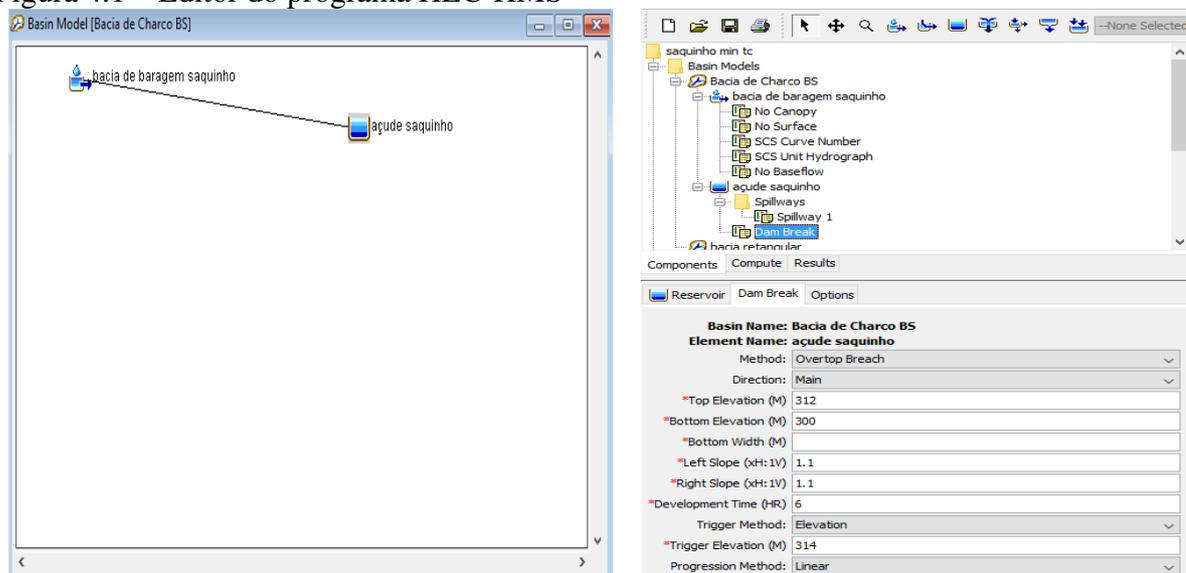
No elemento *subbasin*, foram informados a área da bacia, o método de perda e transformação adotado foi o SCS. O número de escoamento CN foi adotado 1% de área impermeável e o tempo de concentração, calculado pela Equação de Kirpich. O número de escoamento CN tem em conta as características do solo, a sua utilização e as condições de superfície. Face aos fracos horizontes de ripabilidade dos solos, quase impermeáveis, originando elevado escoamento direto, e tomando as tabelas do S.C.S publicadas em Lencastre et al. (1992), atribuiu-se a classificação D aos solos da bacia em estudo (elevado potencial de escoamento superficial). Quanto às características de utilização e ocupação do solo, e com base nas observa-

ções no local, admitiu-se a predominância de pastagens pobres. Além disso, admitiu-se condições prévias de humedecimento do solo AMC III, ou seja, elevadas. Conjugando estas características, obteve-se, $N = 96$ a partir das tabelas do S.C.S.

No elemento *reach*, é necessário informar somente o tempo de concentração, que é calculado pela Equação de Kirpich, substituindo o comprimento do talvegue pelo comprimento do rio.

Os elementos hidrológicos do programa HEC-HMS descritos na Tabela 4.2 estão evidenciados na Figura 4.1, através dos seus ícones. Para entrar com informações da pluviometria, é necessário criar “Meteorologic models” e “Time-series data” no HEC-HMS, conforme ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Editor do programa HEC-HMS



Fonte: HEC-HMS.

Na modelagem chuva-vazão dos projetos executivos das seis barragens analisadas, bem como nas análises do presente trabalho, foi adotado o hidrograma unitário do SCS, caracterizado pelo tempo de atraso (*lag time*) e que é dado pela Equação (4.1), em que t_p é o tempo de atraso (em minutos) e t_c é o tempo de concentração (também em minutos) (Woodward, 2008):

$$t_p = 0,6t_c \quad (4.1)$$

No projeto original das seis barragens em estudo, para estimar o tempo de concentração das bacias hidrográficas, foram utilizadas as fórmulas de NERC, de Témez, de

Chow/Kirpich, do *Soil Conservation Service* e de Giandotti, indicadas a seguir pelas Equações (4.2) a (4.6) (Silva e Fernandes, 2020):

Equação de Nerc (Loukas e Quick, 1996):

$$T_c = 2,8(L/S^{0,5})^{0,47} \quad (4.2)$$

em que:

T_c – tempo de concentração [h];

L – comprimento da linha de água principal [km]; e

S – declive da linha d'água principal, entre 10 e 85% do talvegue L [m/km].

Equação de Témez (Martins, 2000):

$$T_c = 0,3(L/J^{0,25})^{0,76} \quad (4.3)$$

em que:

T_c – tempo de concentração [h];

L – comprimento da linha de água principal [km]; e

J – declive médio da linha de água principal [m/m].

Equação de Chow e Kirpich (Tomaz, 2010; Chow *et al.*, 1998):

$$T_c = 57(L^3/H)^{0,385} \quad (4.4)$$

em que:

T_c – tempo de concentração [min];

L – comprimento da linha de água principal [km]; e

H – desnível entre os pontos mais alto e mais baixo da bacia [m].

Equação do Soil Conservative Service (SCS) (Chow *et al.*, 1998):

$$T_c = (100L^{0,8}(1000/N - 9)^{0,7})/(1900\sqrt{s}) \quad (4.5)$$

em que:

T_c – tempo de concentração [min];

L – comprimento da linha de água principal [ft = 0,3048m];

s – desnível médio [%]; e

N – número de escoamento.

Equação de Giandotti (Norvia e CENOR, 2013):

$$T_c = (4\sqrt{A} + 1,5L) / (0,8\sqrt{h_m}) \quad (4.6)$$

em que:

T_c – tempo de concentração [h];

L – comprimento da linha de água principal [km]; e

h_m – altura média da bacia [m].

O tempo de concentração da barragem de Flamengos foi calculado pela equação de Kirpich, apresentada pela Equação (4.7):

$$T_c = \left(\frac{1}{52}\right) \cdot L^{1,15} / D^{0,38} \quad (4.7)$$

em que:

T_c – tempo de concentração [min];

L – distância entre exutório e o ponto mais distante da bacia [m]; e

D – desnível entre exutório e o ponto mais distante da bacia [m].

4.2.1. Hietograma de Projeto

Para a realização do estudo hidrológico, foram solicitados ao Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica de Cabo Verde (INMG), delegação da Praia, os registos de precipitação máxima diária anual (Pmda) dos últimos 30 anos, nos postos pluviométricos mais próximos da bacia hidrográfica das barragens em estudo. Identificados os postos pluviométricos com informação disponível para o estudo hidrológico ajustaram-se aos registos de precipitação máxima diária anual (Pmda) seis leis estatísticas, designadamente, as leis Normal, log-Normal, Gumbel e Gama.

Conforme Ribeiro *et al.* (2010), as precipitações com durações (D) inferiores a 24,0 h foram obtidas mediante multiplicação das precipitações máximas diárias pelos coeficientes de repartição PD/P24 propostos, relacionando esses coeficientes a precipitação máxima com dada duração com a precipitação máxima em 24,0 h com o mesmo período de retorno.

No presente estudo, fez-se uso dos coeficientes para durações até 24 h, por ter sido essa a duração total estabelecida para os hietogramas de projeto da barragem de Figueira Gorda e Poilão e para durações até 12 h, para barragens de Faveta, Flamengos, Saquinho e Saquinho. Para as durações mais curtas, optou-se por arredondar por excesso os valores desses coeficientes para as durações inferiores a 3,0 h, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Média dos quocientes de repartição PD/P24 (coeficiente de repartição)

Duração D (em h)						
0.5	1.0	3.0	4.0	6.0	12.5	24
0.2	0.3	0.55	0.62	0.7	0.85	1.00

Fonte: Ribeiro *et al.* (2010).

Com base nos valores indicados na tabela 5.3, estabeleceram-se, por regressão, a seguintes linhas de possibilidade udométrica adimensionais das Equações (4.8) a (4.10):

$$\text{Para } D < 3,56 \text{ h} \rightarrow PD/P24 = 0,2972 \times D^{0.5634} \quad (4.8)$$

$$\text{Para } 3,56 \text{ h} < D < 12,5 \text{ h} \rightarrow PD/P24 = 0,4284 \times D^{0.2754} \quad (4.9)$$

$$\text{Para } 12,5 \text{ h} < D < 24 \text{ h} \rightarrow PD/P24 \text{ é obtido por interpolação} \quad (4.10)$$

Conforme Campos (2009 *apud* Silva e Fernandes, 2020), o método dos blocos alternados é um dos mais simples e mais utilizados na construção de hietogramas de projeto.

Neste presente trabalho, com base nas telas finais do projeto original, construiu-se o hietograma dos blocos alternados para uma chuva com duração D de 24 horas para barragem de Figueira Gorda e Poilão e para duração D de 12 horas para as barragens de Faveta, Flamingos, Saquinho, Salineiro, todos para período de retorno de 1.000 anos. Os procedimentos e hipóteses adotados no estabelecimento dos hietogramas com 24,0 h de duração foram os seguintes (Norvia/Cenor, 2011):

- a duração de cada bloco de precipitação que compõe o hidrograma é $\Delta d = 20$ min;
- todas as precipitações foram corrigidas em função da sua duração e da área da bacia hidrográfica conforme proposto por Chow *et al.* (1988);
- cada bloco de precipitação corresponde à diferença entre a precipitação com dada duração d e a precipitação com duração $d-\Delta d$; e
- a disposição dos blocos de precipitação foi obtida colocando às 12,0 h o bloco com maior intensidade e distribuindo alternadamente, à direita e à esquerda, por ordem decrescente de intensidade de precipitação, os restantes blocos.

Os procedimentos e hipóteses adotados no estabelecimento dos hietogramas com 12 h de duração foram os seguintes (Norvia/Cenor, 2011):

- a duração de cada bloco de precipitação que compõe o hidrograma é $\Delta d = 10$ min;
- todas as precipitações foram corrigidas em função da sua duração e da área da bacia hidrográfica conforme proposto por Chow *et al.* (1988);
- cada bloco de precipitação corresponde à diferença entre a precipitação com dada duração d e a precipitação com duração $d-\Delta d$; e
- a disposição dos blocos de precipitação foi obtida colocando às 6,0 h o bloco com maior intensidade e distribuindo alternadamente, à direita e à esquerda, por ordem decrescente de intensidade de precipitação, os restantes blocos.

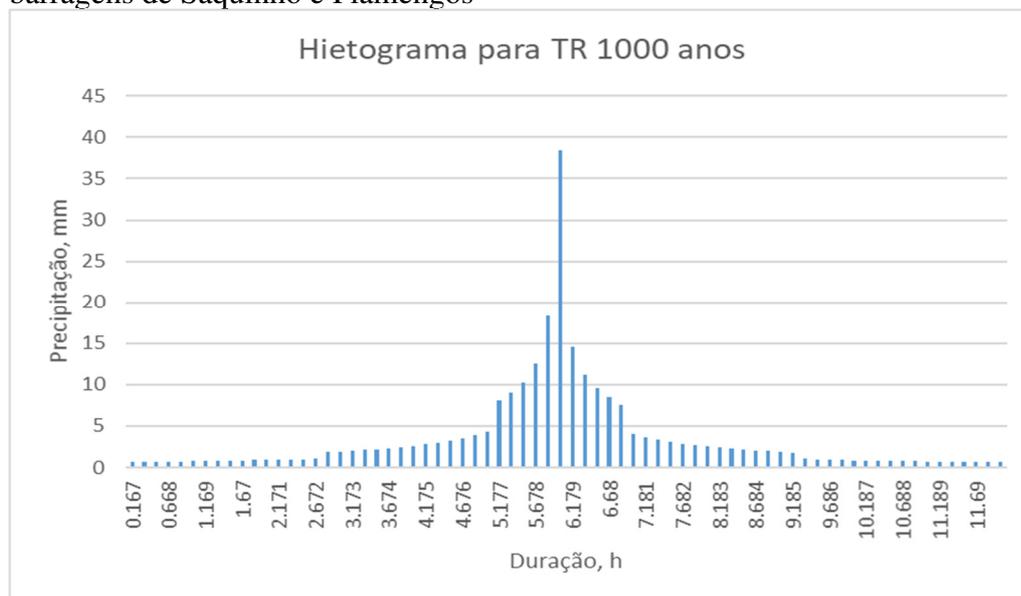
Correia (1986) em “Alguns procedimentos adotados pelo *Soil Conservative Service* para a determinação de caudais de cheia em pequenas bacias naturais e urbanas”, define que os blocos de precipitação a considerar na construção do hietograma deverão ter duração igual ou inferior a aproximadamente $0,133T_c$ (tempo de concentração).

Conforme proposto por Chow *et al.* (1988), a correção da precipitação é para ter em consideração o facto da intensidade de precipitação com dada duração não ser uniforme em toda a bacia, sendo a não uniformidade tanto mais acentuada quanto maior for a área da bacia e quanto menor for a duração da precipitação.

Primeiramente, escolheu-se um intervalo de 20 minutos para cada bloco em hietograma de barragem de Figueira Gorda e Poilão e, 10 minutos para cada bloco de barragens de Faveta, Flamengos, Salineiro e Saquinho, formando para barragem 72 amostras, o que corresponde a 72 blocos.

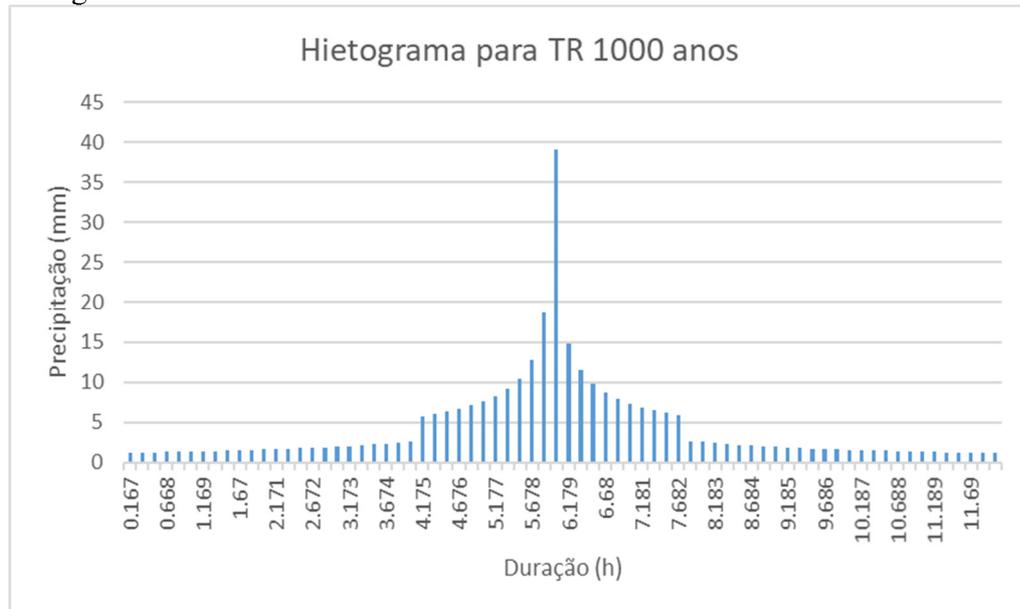
Os cálculos efetuados com base nos coeficientes de repartição apresentados na Tabela 4.3, calculados a partir da Equação 8, a distribuição da precipitação nos blocos bem como os hietogramas para período de retorno 1.000 anos, são ilustrados nas Figuras 4.2 a 4.5 seguintes. A distribuição foi feita atendendo à área de influência dos postos pluviométricos utilizados para cada barragem.

Figura 4.2 – Hietograma de projeto para o período de retorno de 1.000 anos para barragens de Saquinho e Flamengos



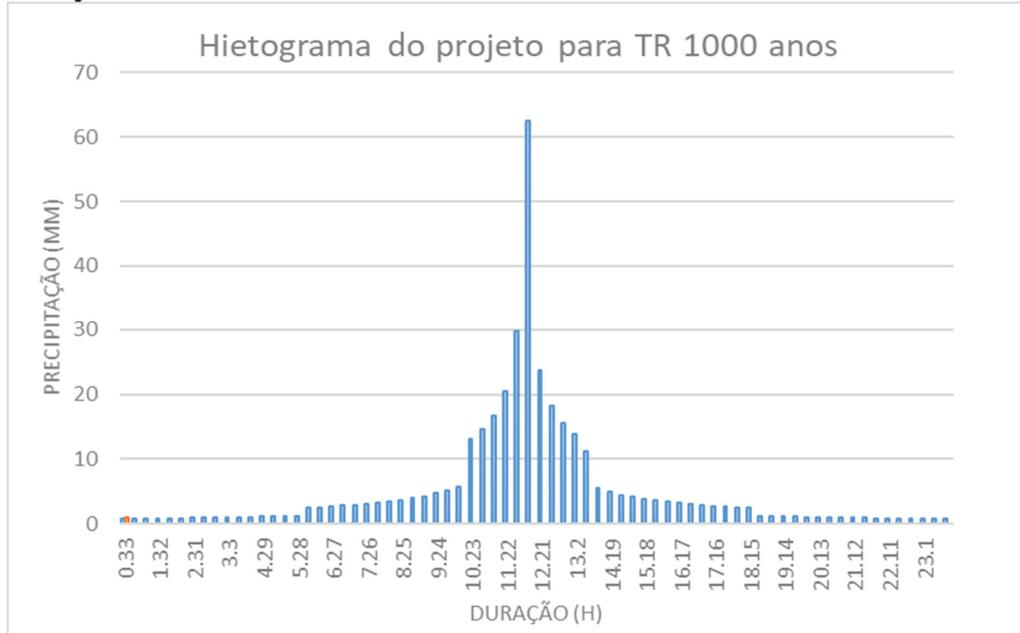
Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2013).

Figura 4.3 – Hietograma de projeto para o período de retorno de 1.000 anos para barragens de Faveta



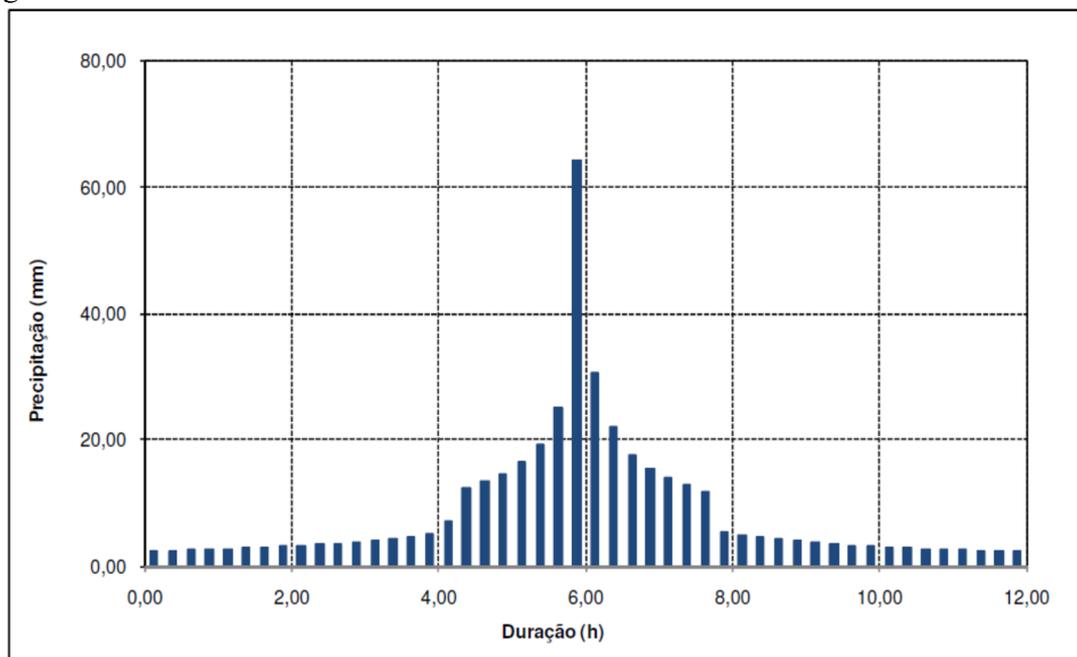
Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2013).

Figura 4.4 – Hietograma de projeto para o período de retorno de 1.000 anos para barragem de F. Gorda e Poilão



Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2013).

Figura 4.5 – Hietograma de projeto para período de retorno de 1000 anos para barragem de Salineiro



Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2013).

4.2.2. Hidrograma de cheia

A sequência temporal de eventos de uma chuva é representada em um hietograma, já a sequência temporal de eventos de um escoamento é chamada de hidrograma (MCCUEN, 1998).

Existem vários métodos para determinar a maior chuva que pode ocorrer sobre a bacia hidrográfica. Esses valores de chuva de projeto são, então, utilizados para determinar o hidrograma de cheia, à partir do método do hidrograma unitário ou alguma outra função de transformação (RAKHECHA e SINGH, 2009).

Um hidrograma é a resposta de uma dada área de captação a um evento de chuva. Ele representa todas as três fases do escoamento: o escoamento superficial direto, a precipitação recolhida diretamente pela superfície livre da água, o escoamento subsuperficial, a porção da precipitação que infiltra nas camadas superiores do solo e logo volta a contribuir com o escoamento superficial, e o escoamento básico, a água que infiltra até atingir o lençol freático (MUSY e HIGY, 2011).

O hidrograma incorpora os efeitos integrados de uma grande variedade de áreas de captação e de características de chuva, assim, dois eventos de chuva diferentes em uma mesma

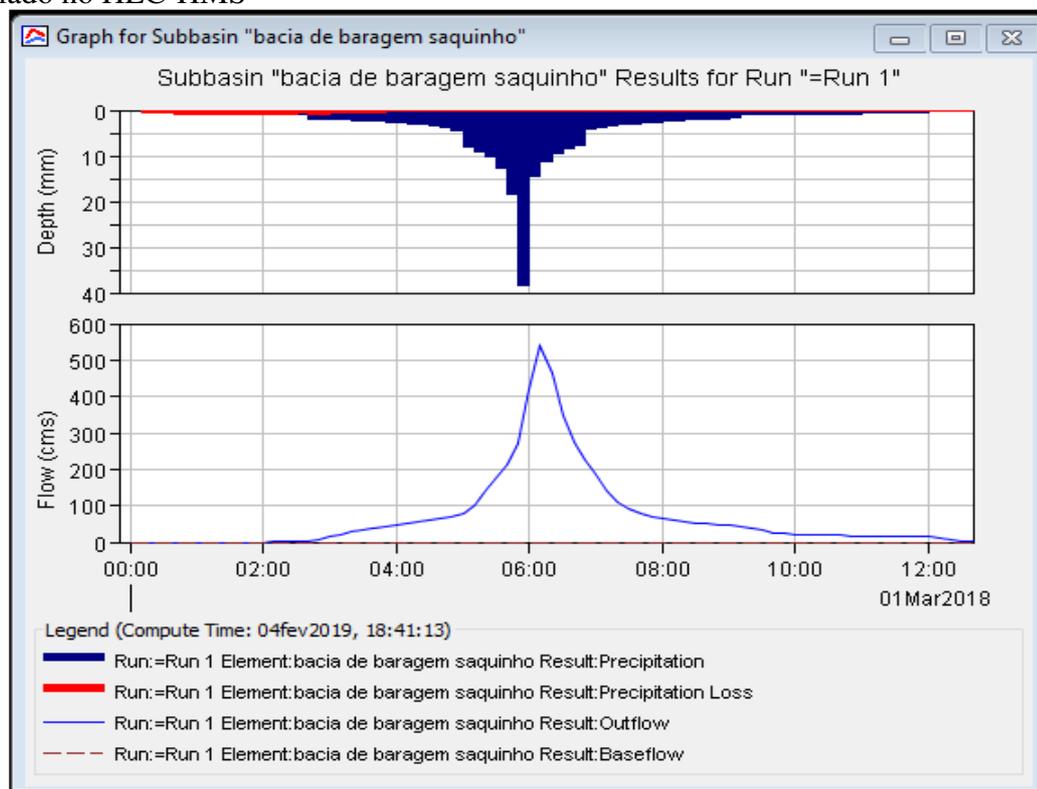
área de captação de um rio produzem hidrogramas diferentes entre si, do mesmo modo que eventos de chuva idênticos em duas áreas de captação produzem hidrogramas diferentes (RAKHECHA e SINGH, 2009).

Os hidrogramas de cheia de ruptura para período de retorno 1.000 anos, foram calculados automaticamente pelo programa HEC-HMS através de simulação no *Dam Break*, conforme ilustrada na Figura 4.1.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram hidrogramas de cheia na seção de saída da bacia hidrográfica resultante de um hietograma específico, simulados no HEC-HMS (FIGURA 4.6), e um hietograma e hidrograma genérico (FIGURA 4.7).

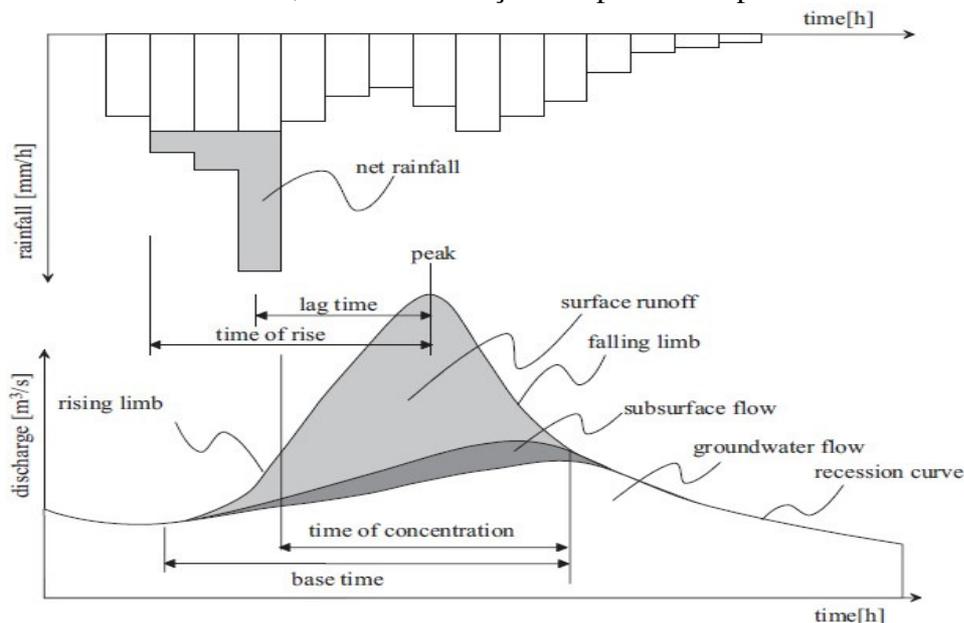
Para tal resultado, tem-se uma chuva, definida no tempo e no espaço, que cai sobre uma bacia hidrográfica com características conhecidas e certas condições iniciais. Um hidrograma de cheia possui comumente um formato de sino assimétrico (MUSY e HIGY, 2011).

Figura 4.6 – Hietograma e hidrograma resultantes de um evento de chuva simulado no HEC-HMS



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.7 – Representação genérica de Hietograma e hidrograma resultantes de um evento de chuva, com identificação das partes componentes



Fonte: Musy e Higy (2011).

O formato do hidrograma pode ser dividido em quatro partes principais e mostra ainda algumas características de tempo, são elas (MUSY e HIGY, 2011):

- A curva de concentração ou o trecho em ascensão: Reflete as características da bacia hidrográfica e da precipitação. Corresponde ao aumento da cheia (MUSY e HIGY, 2011). A alta taxa de perda por infiltração durante os primeiros momentos de uma chuva faz com que o crescimento aconteça lentamente nos momentos iniciais (RAKH-ECHA e SINGH, 2009);
- A crista ou o pico: O pico do hidrograma ocorre quando os escoamentos provenientes de várias partes da área de captação contribuem simultaneamente gerando a maior vazão na seção de controle. Em geral, para grandes áreas de captação, a vazão de pico após o fim da chuvada (RAKHECHA e SINGH, 2009). É utilizado para determinar o tempo de resposta da bacia hidrográfica e o tempo de pico do hidrograma. Na prática, é comum que hidrogramas apresentem várias cristas, uma vez que as chuvadas podem se distribuir no tempo e no espaço de forma heterogênea (MUSY e HIGY, 2011);
- O trecho em declínio: Se inicia no ponto de inflexão da crista, marcando o fim do fluxo de entrada de água e refletindo a presença do escoamento subsuperficial. Seu formato é primordialmente em decorrência das características de drenagem da rede, sendo praticamente independente das variações de intensidade da chuva (MUSY e HIGY, 2011);

- A curva de recessão: É a parte do hidrograma gerada exclusivamente pelos lençóis freáticos, uma vez que o escoamento superficial tem parado (MUSY e HIGY, 2011);
- Tempo de ascensão: Tempo decorrido entre a chegada do escoamento superficial na seção de controle e o escoamento máximo do hidrograma (MUSY e HIGY, 2011); e
- Tempo de base: Duração do escoamento superficial direto (MUSY e HIGY, 2011).

O tempo de retardo e o tempo de concentração também podem ser identificados no hidrograma, já definidos na seção anterior, cuja relação está expressa na Equação (4.1).

Para cada barragem foram utilizados no cálculo, o tempo de concentração mínimo calculada pela equação de Kirpich, que conforme, Silva e Fernandes (2020), se adequa bem a bacias pequenas de relevo acidentado, tal como é o caso do relevo da Ilha de Santiago, em Cabo Verde e traz bons resultados em termos de análise hidráulica e hidrológica.

4.2.3. Análise de risco hidrológico

O termo risco é definido como o produto da probabilidade de ocorrência de um evento adverso pela consequência desse evento (USBR, 2003).

O risco hidrológico associado ao projeto de barragens é a probabilidade da ocorrência de pelo menos um evento de superação de um determinado nível d'água extremo, da qual poderia resultar a falha de uma estrutura hidráulica, ao longo de sua vida útil (SILVA e FERNANDES, 2020).

Uma distribuição binomial de probabilidades nos permite lidar com situações em que os resultados importantes pertencem a apenas duas categorias, como por exemplo, cara ou coroa, sucesso ou falha (TRIOLA, 2010).

- No que diz respeito às obras hidráulicas as categorias são “a obra entrar em colapso” e “a obra não entrar em colapso”. A distribuição binomial deve satisfazer algumas condições: O procedimento deve ter um número fixo de tentativas;
- As tentativas devem ser independentes, ou seja, o resultado de uma tentativa não deve afetar as probabilidades das outras tentativas;
- Cada tentativa deve ter seu resultado classificado em apenas duas categorias: sucesso ou fracasso; e
- A probabilidade de cada resultado se mantém constante em cada tentativa.

As duas categorias de resultado, chamadas de sucesso ou falha, podem ser denotadas por S ou F, respetivamente. A probabilidade de sucesso pode ser chamada de p e a probabilidade de falha de q , em cada evento isoladamente, assim, pode-se inferir a Equação (38). Chama-se de n a quantidade estabelecida de tentativas e de x a quantidade de sucessos nas n tentativas, ou seja, x pode ser qualquer número inteiro entre 0 e n , inclusive (TRIOLA, 2010).

Uma vez que as tentativas são independentes, pode-se multiplicar todas as probabilidades correspondentes aos diferentes resultados, matematicamente representado na Equação (4.11) (WALPOLE *et al.*, 2012). Enquanto $P(x)$ denota a probabilidade de se obter exatamente x sucessos em n tentativas e pode ser calculada pela Equação (4.12), o coeficiente binomial apresentado na Equação (4.13) representa a quantidade de maneiras que se podem combinar sequências de eventos S e F ocorrendo o primeiro x vezes e o outro $(n - x)$ vezes. O coeficiente binomial é expresso matematicamente na Equação (4.14).

$$q = 1 - p \quad (4.11)$$

$$p^x q^{n-x} \quad (4.12)$$

$$p(x; n : p) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x} \quad (4.13)$$

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x! (n - x)!} \quad (4.14)$$

Assim, definindo como a variável aleatória a ocorrência de uma cheia em um ano qualquer e assumindo que a probabilidade definida pela curva de distribuição de frequência é constante de um ano para o outro, é possível descrever a ocorrência de uma cheia por uma distribuição binomial.

A falha de uma obra hidráulica, especialmente do porte de uma barragem, acarreta uma série de prejuízos materiais, assim como risco à vida humana. No entanto, a construção de uma obra que suporte qualquer valor de cheia não é viável economicamente.

Adota-se então um valor de vazão, denominada cheia de projeto, que tenha pouca probabilidade de ser igualado ou superado pelo menos uma vez dentro da vida útil da obra. A cheia de projeto está associada a um período de retorno (T_R), ou seja, o tempo médio, em anos, que essa vazão, ou evento, é igualada ou superada pelo menos uma vez.

Para a determinação do T_R da cheia de projeto, utilizam-se alguns critérios, tais como (VILLELA e MATTOS, 1975):

- Vida útil da obra;
- Tipo de estrutura;
- Facilidade de reparação e ampliação; e
- Perigo de perda de vida.

Outro critério para a fixação do T_R da cheia de projeto é a determinação do risco que se deseja correr caso a obra falhe dentro do seu tempo de vida. Assim, a probabilidade de ocorrência da vazão excedente é dada pela Equação (4.15). A probabilidade do evento não ocorrer dentro de n anos é dado pela Equação (4.16).

Aplicando a Equação (4.15) na Equação (4.16), obtemos a Equação (4.17). Logo, o risco de falha (R) pode ser representado pela Equação (4.18). Por fim, o período de retorno para o qual se deve estimar o evento crítico capaz de causar uma falha ou o colapso da obra, cuja vida útil seja de n anos, admitindo-se correr um risco R é apresentado na Equação (4.19).

$$p_E = \frac{1}{T_R} \quad (4.15)$$

$$p_0^n = (1 - p_E)^n \quad (4.16)$$

$$p_0^n = \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^n \quad (4.17)$$

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^n \quad (4.18)$$

$$T_R = \frac{1}{R = 1 - (1 - R)^{1/n}} \quad (4.19)$$

4.2.4. Modelagem Hidráulica

A análise hidráulica das barragens estudadas é feita com recurso ao *software* HEC-RAS (*Hydrological Engineering Center - River Analysis System*), programa do pacote da HEC integrado de programas de análises hidráulicos, onde o usuário interage com o sistema usando uma interface gráfica. Esse sistema é capaz de trabalhar em regime permanente, análise unidimensional e bidimensional de regime não permanente, transporte de sedimentos e qualidade da água (USACE, 2016).

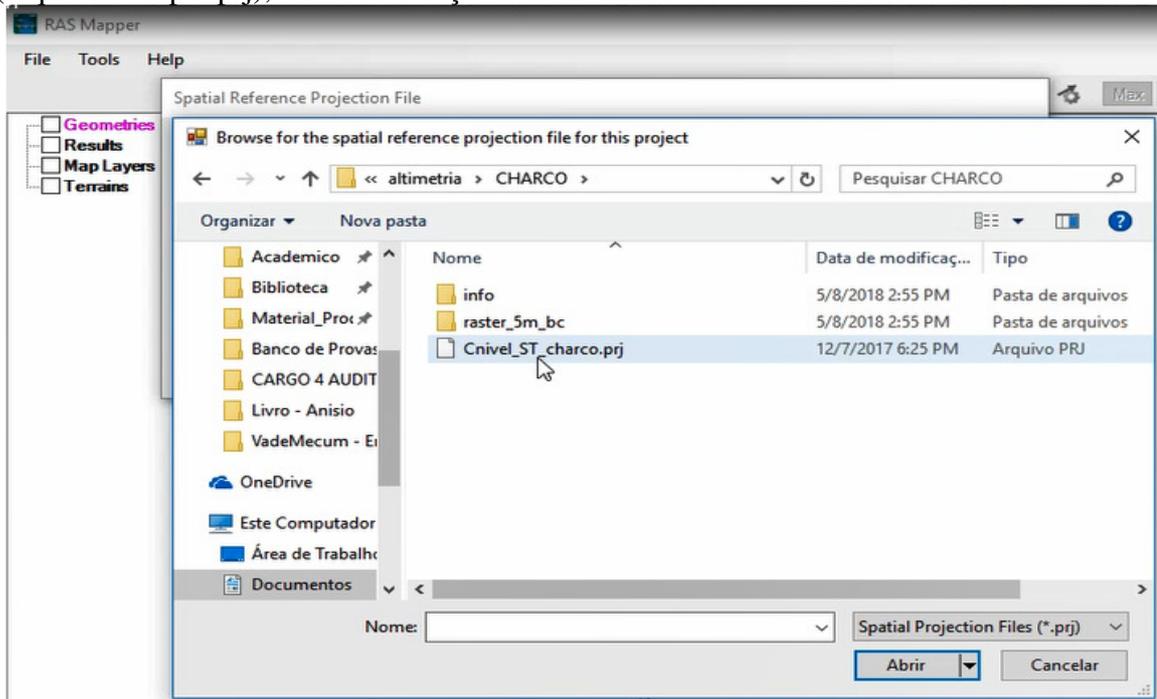
O programa HEC-RAS é muito utilizado em avaliação e simulação do comportamento do ressalto hidráulico sob condições de mudança de rugosidade, declividade longitudinal do canal e regime de escoamento (Cavalcante; Tavares; Fernandes e De Sá, 2019).

A determinação da vazão de projeto para dimensionamento de uma dada estrutura hidráulica é feita em duas etapas: inicialmente, determina-se a chuva de projeto representada por um hietograma; em seguida, aplica-se o hietograma em um modelo chuva-deflúvio (Silva *et al.*, 2014).

Tendo como dados de base os hietogramas de precipitação total sobre a bacia, o cálculo dos correspondentes hidrogramas de cheia foi efetuado considerando que, para os períodos de retorno mais elevados, de 1.000 anos, o solo se encontra praticamente saturado no início da chuvada de projeto (condição de humedecimento do solo AMC III, ou seja, elevada, na classificação do *Soil Conservation Service*), o que, atendendo ao tipo de solo (atribuiu-se a classificação D aos solos da bacia em estudo como elevado potencial de escoamento superficial) e à sua ocupação (quanto às características de utilização e ocupação do solo, e com base nas observações no local, admitiu-se a predominância de pastagens pobres), conduz ao valor 96 para o número de escoamento CN (Cenor/Norvia, 2013).

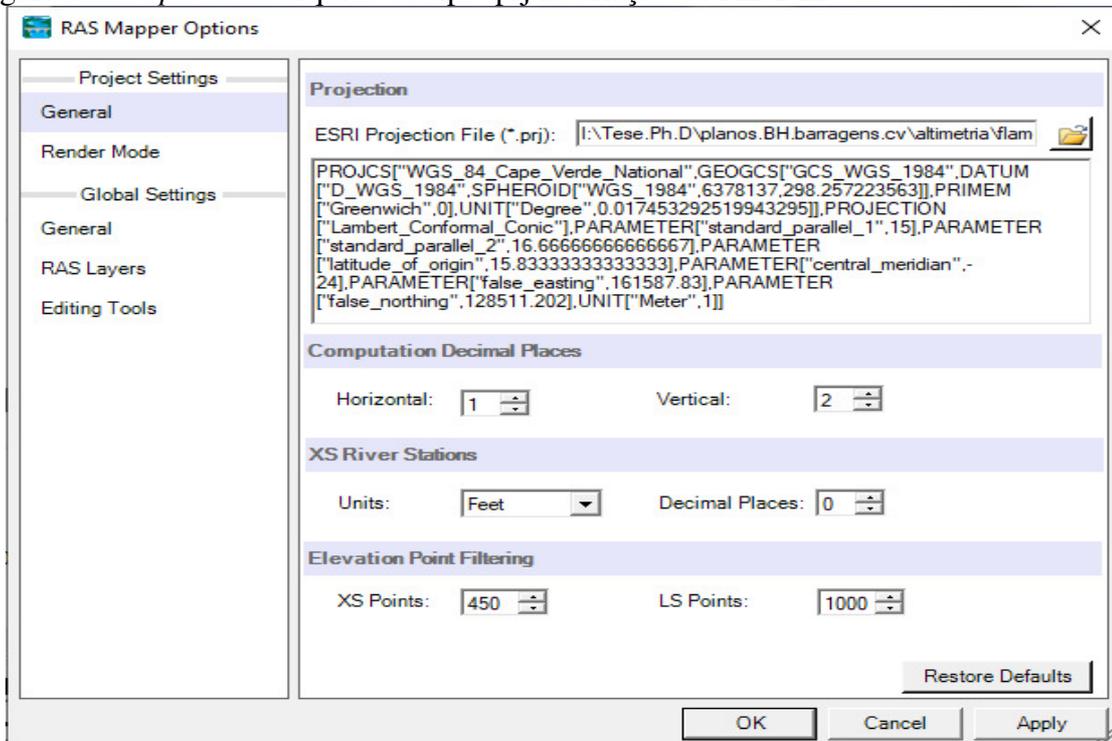
No RAS Mapper, incorporado no programa HEC-RAS, deve-se selecionar ou inserir o nome do arquivo de projeção de referência espacial que pretendemos criar o modelo digital do terreno 2D, neste caso, os dados altimétricos, tais como as curvas de níveis das bacias hidrográficas e hidrografia, que por sua vez, já estavam transformados em *shapefiles* e georreferenciados para o sistema de coordenadas locais de Cabo Verde (WGS_84), conforme ilustrado nas Figuras 4.8 a 4.12.

Figura 4.8 – Altimetria de bacia hidrográfica georreferenciada em sistema de projeção local (arquivo do tipo .prj), usada na criação do MDT 2D



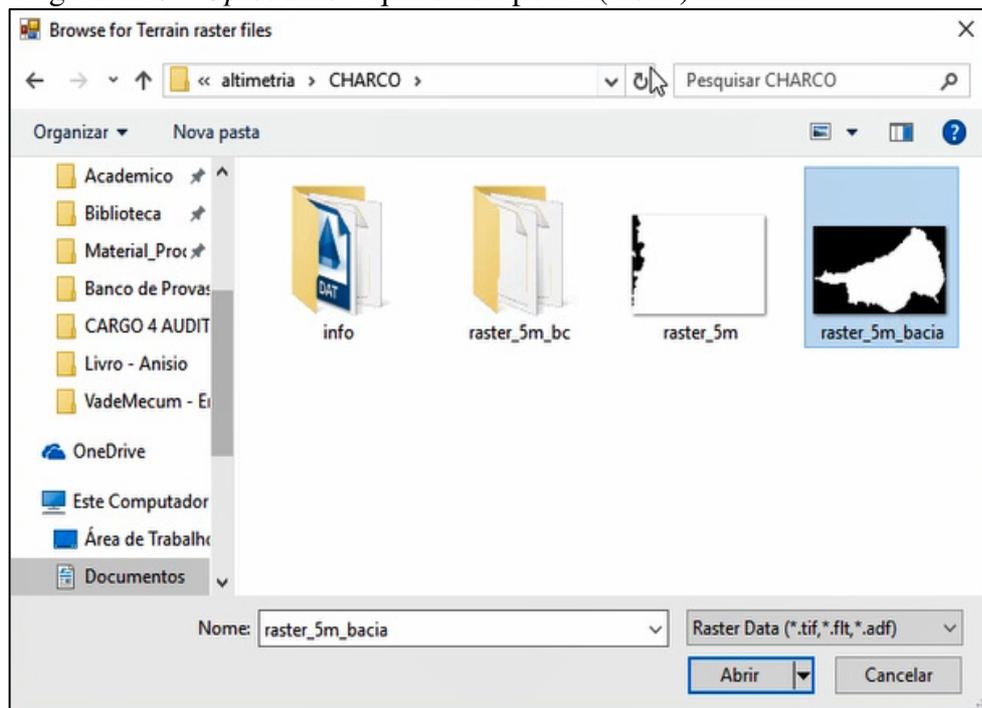
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.9 – Upload do arquivo do tipo .prj na criação do MDT 2D



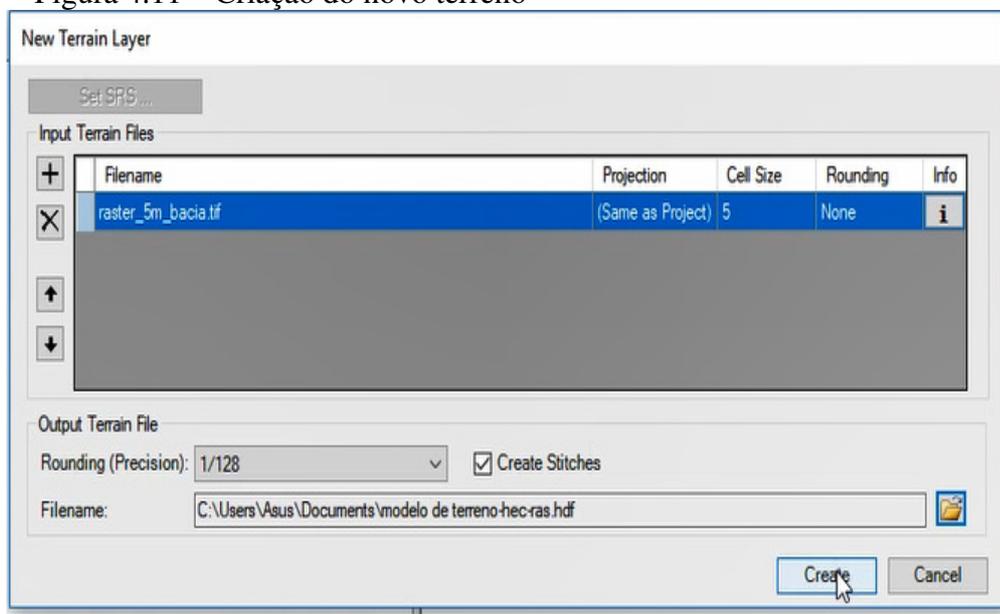
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.10 – Upload do arquivo do tipo .tif (raster) da bacia



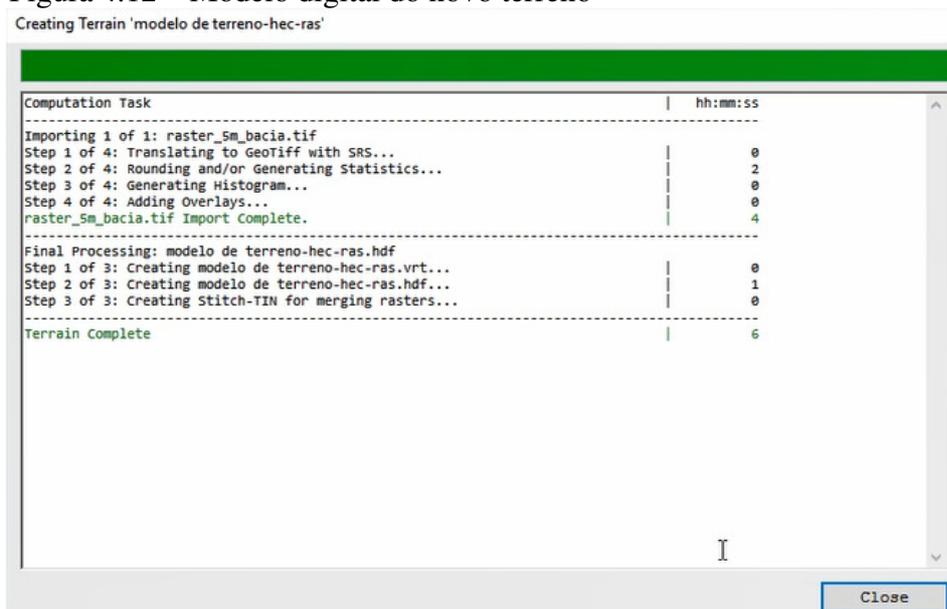
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.11 – Criação do novo terreno



Fonte: elaborado pelo autor.

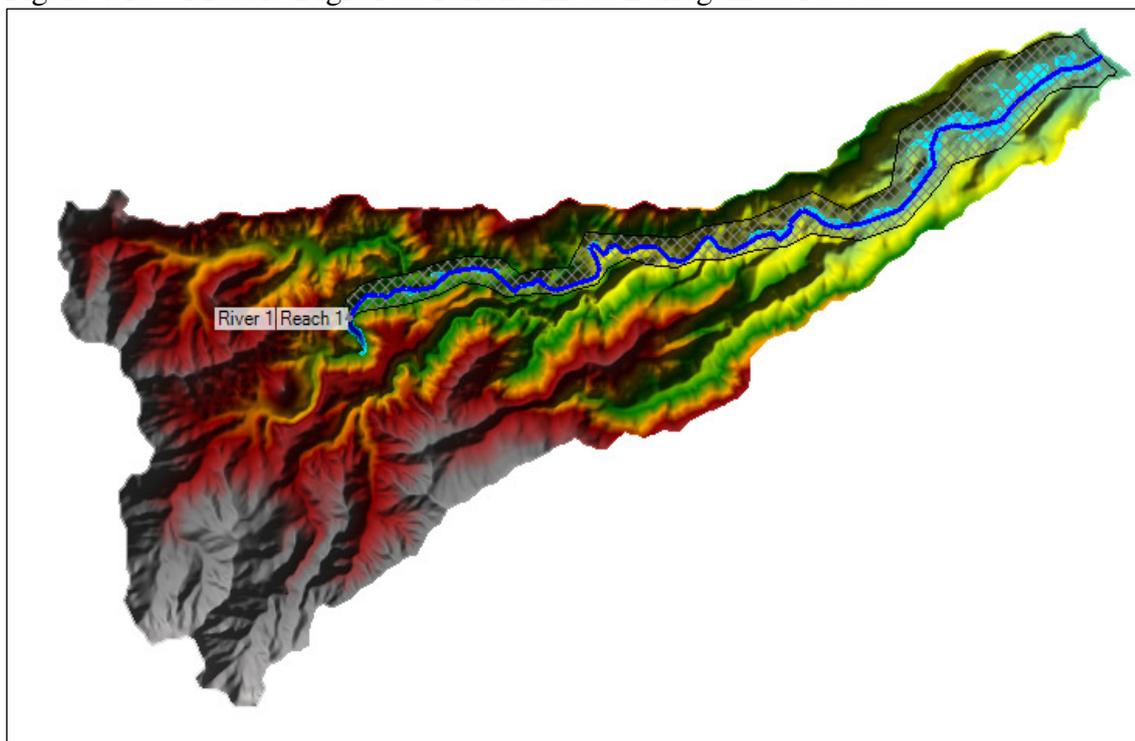
Figura 4.12 – Modelo digital do novo terreno



Fonte: elaborado pelo autor.

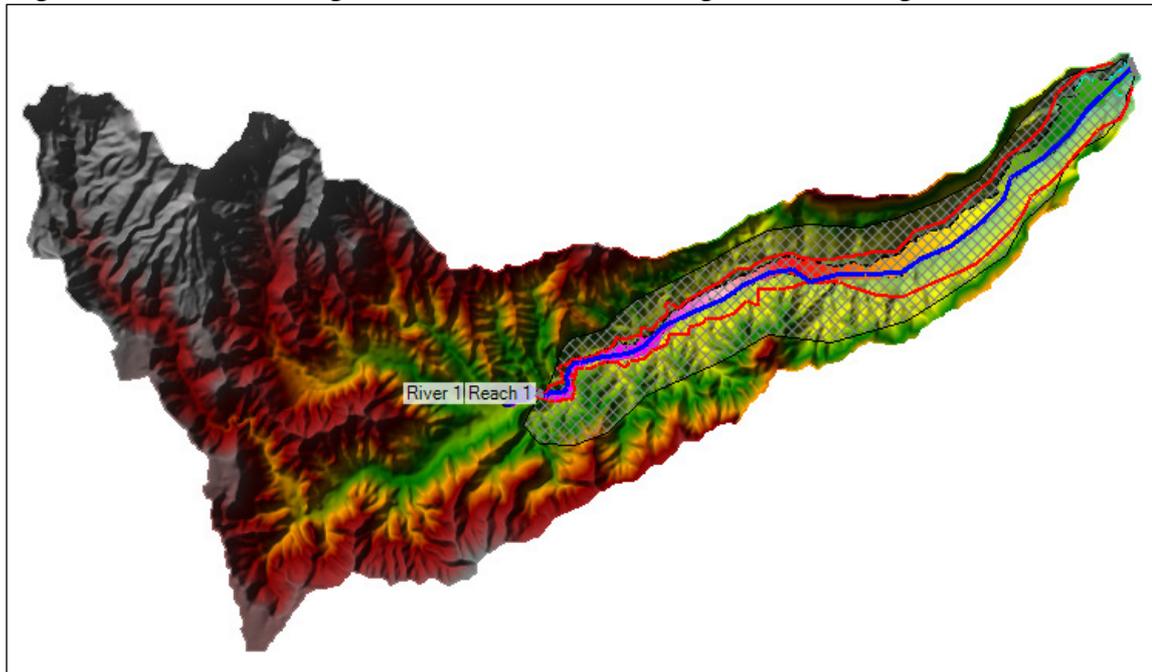
Os Modelos Digitais do Terreno (MDT) de todas as bacias hidrográficas e respectivas barragens em estudo, Faveta, Figueira Gorda, Flamengos, Poilão, Saquinho e Salineiro, utilizando os processos descritos acima, se encontram ilustrados nas Figuras 4.13 a 4.18.

Figura 4.13 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Faveta



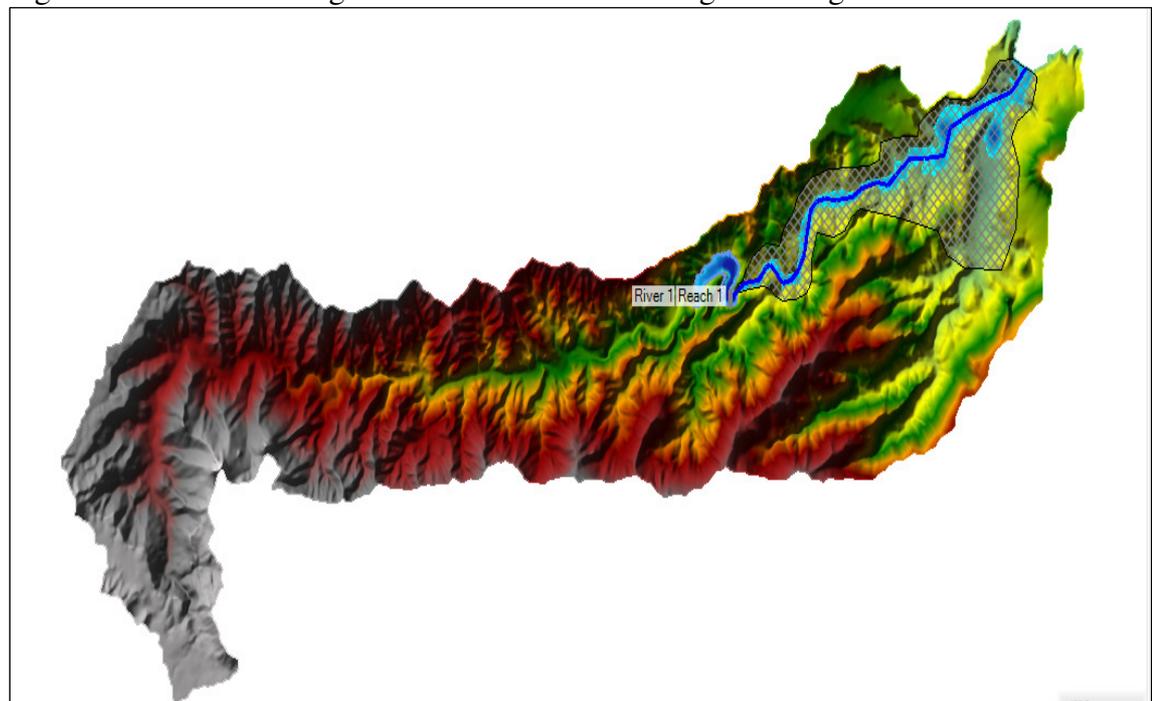
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.14 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Flamengos



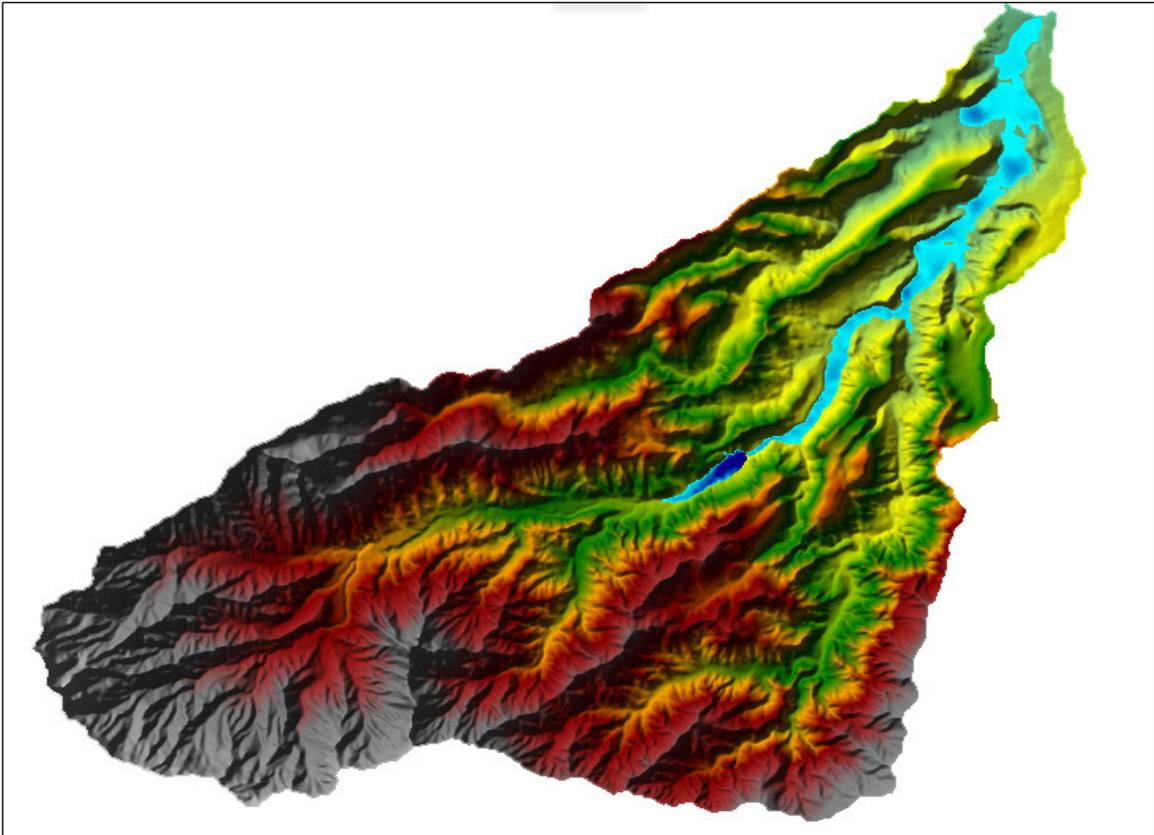
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.15 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Figueira Gorda



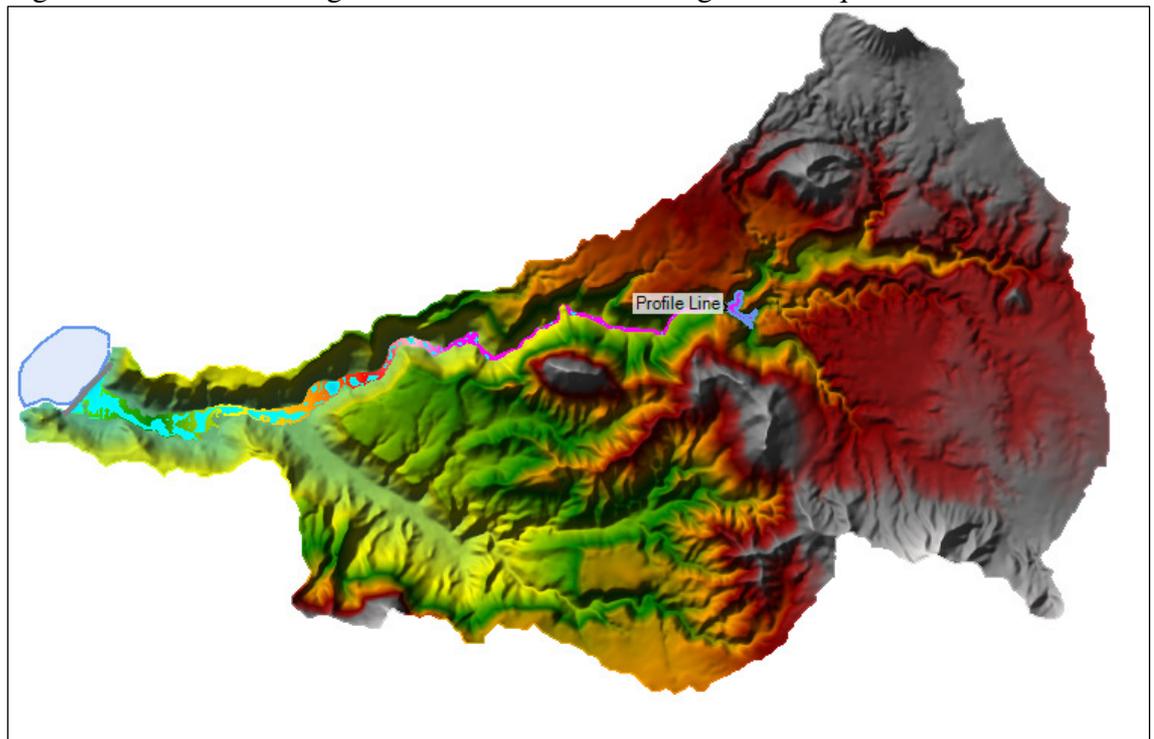
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.16 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Poilão



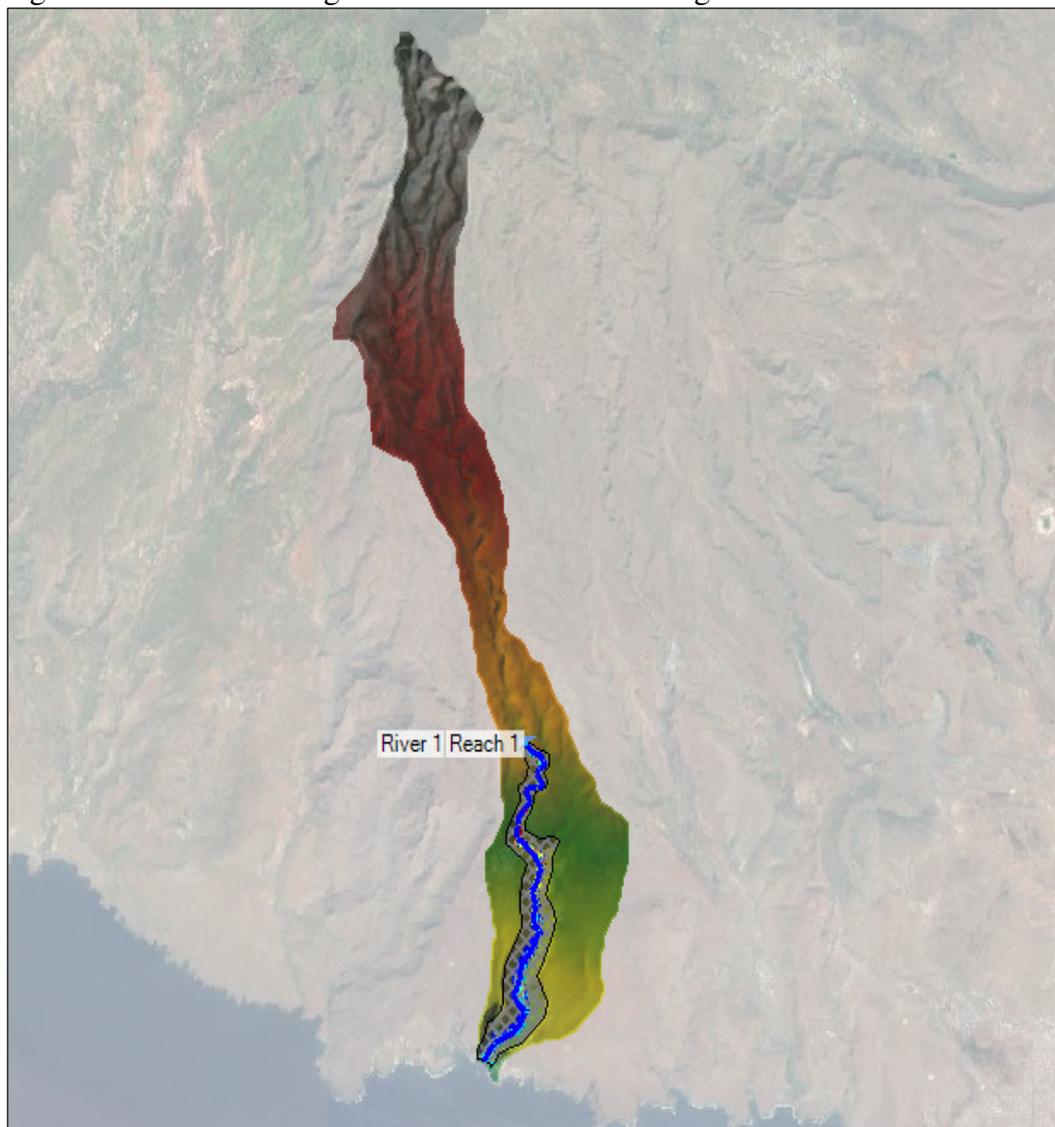
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.17 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Saquinho



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.18 – Modelo Digital de Terreno 2D da Barragem de Salineiro



Fonte: elaborado pelo autor.

Os arquivos do MDT 2D criados e os hidrogramas de ruptura (como dados de entrada, a curva cota-volume do reservatório e parâmetros da formação da brecha) gerados no HEC-HMS, juntamente com outros dados, tais como características geométricas da barragem, definição de área de armazenamento (SA, 2D), criação da malha, introdução de condições de contorno a montante (Barragem) e a jusante, são inseridos no HEC-RAS para simulação de rompimento das barragens em estudo.

Assim, é possível realizar uma propagação hidrodinâmica dos hidrogramas gerados pela ruptura das barragens, usando como base o modelo hidráulico. Com respeito à geração dos hidrogramas de ruptura utilizou-se o módulo de “Dam Break” integrante do software HEC-HMS, que é aceito internacionalmente como um software adequado para esse propósito.

A modelagem no HEC-RAS consistiu na configuração da geometria (seção da barragem e do reservatório), do regime não permanente e o plano de simulação do sistema.

O programa possui uma série de aplicações, como a simulação de transporte de sedimentos, modelação de temperatura da água e simulação de ruptura de barragens. possível realizar a evolução da ruptura a partir de erosão interna (*piping*) ou por galgamento (*overtopping*), principais causas de rupturas em estruturas desta natureza.

A modelagem matemática é uma importante ferramenta de planejamento e apoio à segurança de barragens, uma vez que permite a simulação da ruptura hipotética de uma estrutura de barramento e a propagação da onda decorrente do acidente (VERÓL, 2010). Modelos hidrodinâmicos aplicam equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento, que regem a onda de cheia resultante do colapso de uma barragem, descrevendo a variação do fluxo ao longo do canal (KATOPODES E SCHAMBER, 1983).

O objetivo de se utilizar modelos hidrodinâmicos de propagação de um hidrograma de ruptura é simular o movimento da onda de cheia ao longo do vale a jusante da barragem (LAURIANO, 2009), no intuito de avaliar os impactos produzidos pela onda e o potencial risco associado a este evento.

Morris (2000) define as seguintes informações como resultados essenciais que o modelo deve fornecer para qualquer ponto de interesse dentro da área atingida pela onda de cheia:

- Tempo de chegada da onda de ruptura;
- Nível máximo de água;
- Tempo até que se atinja este nível máximo;
- Profundidade e velocidade da onda de cheia; e
- Duração da inundação.

A precisão da resposta fornecida varia de acordo com a opção de modelo escolhido, sendo divididos em modelos simplificados, hidrológicos, hidrodinâmicos unidimensionais (1D), hidrodinâmicos quasi-bidimensionais (quasi-2D), hidrodinâmicos bidimensionais (2D) e, finalmente, os modelos hidrodinâmicos tridimensionais (3D).

Os escoamentos em rios e canais podem ser classificados, em relação a sua dinâmica temporal, em regimes permanente e não permanente. Quando as variáveis do modelo não mudam com o tempo, o escoamento é dito permanente. Por outro lado, quando as variáveis mudam com o tempo, o escoamento é dito não permanente.

Uma aplicação clássica de escoamento em regime permanente é a confecção de manchas de inundação para rios e canais, que são usadas no planejamento urbano para avaliar os efeitos de potenciais eventos de cheia que possam ocorrer (Leitão, 2018).

Com informações obtidas a partir da análise hidráulico-hidrológico, portanto hidrogramas para período de retorno de 1000 anos e gráfico de elevação de armazenamento com recurso a *software* HEC-RAS e, seguidamente com o recurso de ferramentas de geoprocessamento, o QGIS 3.12, gerou-se o mapa com a mancha de inundação associadas à cartografia da região para gerar maior vazão de pico.

De posse dos dados da simulação e utilizando o *software* de geoprocessamento QGIS, seguiu-se para a etapa de confecção do mapa que indicará numa forma simples e em escala adequada, a área impactada com o rompimento da barragem e apresentação de zonas de risco a jusante dentro da zona de inundação.

A metodologia adotada no HEC-RAS é subdividir as seções transversais entre as planícies de inundações e o canal principal, com base nos valores do coeficiente de Manning. Os valores adotados para estes coeficientes são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Coeficiente de Rugosidade da Fórmula de Manning para Arroios e Rios

Item	Natureza das Paredes	Condições			
		Muito Boas	Boas	Regulares	Ruins
1	Limpo, retilíneos e uniformes	0.025	0.028	0.03	0.033
2	Como em 1, porém com vegetações e pedras	0.03	0.033	0.035	0.04
3	Como meandros bancos e poços pouco profundos, limpos	0.035	0.04	0.045	0.05
4	Como em 3, água baixas, declividade fraca	0.04	0.045	0.05	0.055
5	Como em 3, com vegetação e pedras	0.033	0.035	0.04	0.045
6	Como em 4, com pedras	0.045	0.05	0.055	0.06
7	Com margens espraiadas, pouca vegetação	0.05	0.06	0.07	0.08
8	Com margens espraiadas, muita vegetação	0.075	0.1	0.125	0.15

Fonte: Adaptado de Porto (2006).

As equações que governam o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, são as equações unidimensionais originais de fluxo não permanente em leitos fluviais, desenvolvidas por Ad-hémar Jean Claude Barre de Saint-Venant e publicadas em 1870. As equações de Saint-Venant, quando trabalhadas sob o aspecto unidimensional, como no modelo em questão, podem ser

descritas pelas equações de Conservação da Massa e Conservação da Quantidade de Movimento respectivamente, apresentadas através das Equações (4.20) e (4.21):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (4.21)$$

em que:

t – variável independente relativa ao tempo [s];

x – variável independente relativa à direção do escoamento [m];

u – velocidade média de escoamento [m/s];

g – aceleração da gravidade [m/s²];

h – espessura da lâmina líquida [m];

S₀ – declividade média da calha fluvial ou fundo do canal [m/m]; e

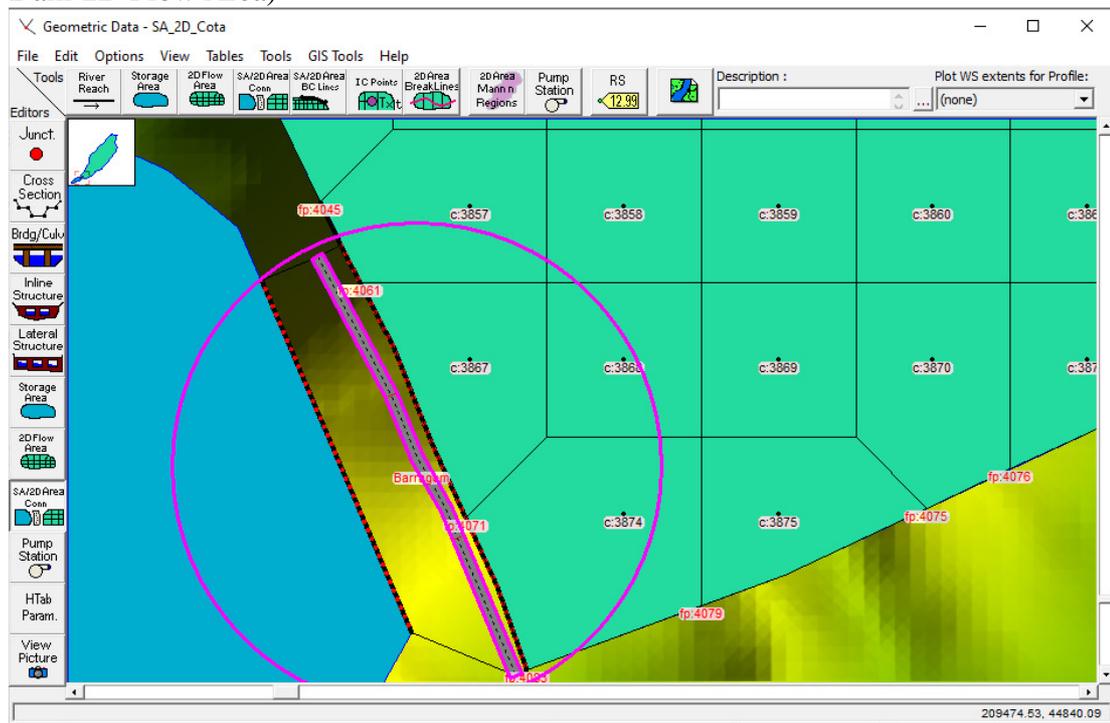
S_f – declividade média da linha de energia, equivalente ao termo de perda de carga unitária por atrito [(m/m)].

Além de tratar o escoamento de forma unidimensional, aplicar as equações anteriores ainda traz outras hipóteses simplificadoras, como a distribuição hidrostática de pressões, que assume a inexistência de componentes de aceleração no sentido longitudinal. Neste caso, Mascarenhas (1990) afirma que em situações de escoamento em que haja um ressalto hidráulico negativo, cria-se uma região com fortes acelerações verticais, invalidando a hipótese em questão.

Willinghoefer (2015) cita ainda a perda de carga estimada pela equação de Manning, a declividade do fundo do canal pequena, o fato do fluido se tratado como incompressível e homogêneo (massa específica constante) e a criação de um perfil uniforme de velocidade na seção transversal do canal, como hipóteses simplificadoras da aplicação das equações acima no estudo da propagação de uma onda de cheia proveniente da ruptura de uma barragem.

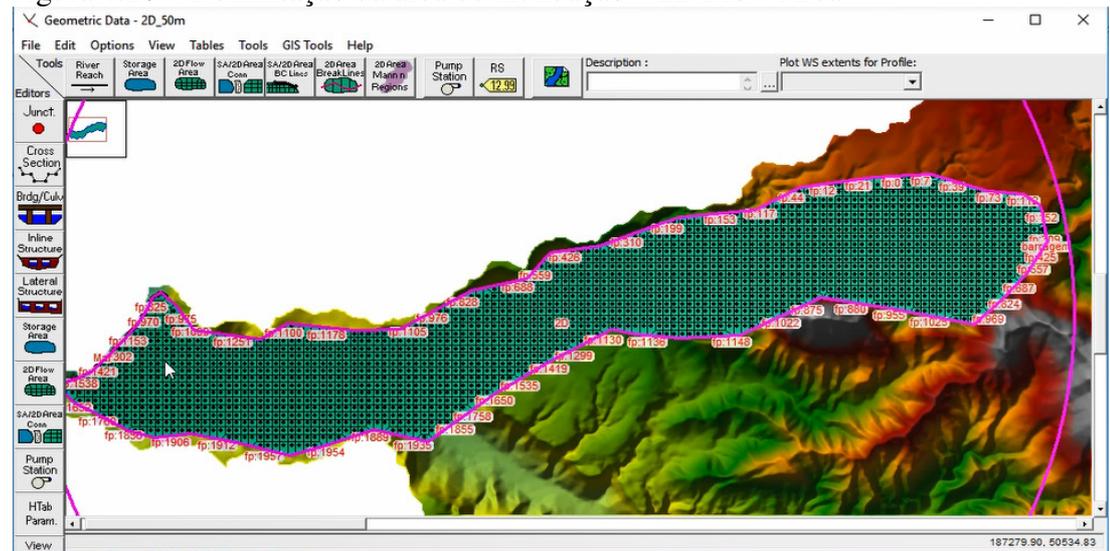
A modelagem no HEC-RAS consistiu em introduzir os dados da estrutura (Barragem), delimitação da área de inundação a jusante da barragem (2D Flow Área) e criação da malha, introdução de hidrograma de ruptura, definição das condições de contorno a montante e a jusante, no editor geométrico, Geometric Data, incorporado no HEC-RAS, conforme apresentando nas Figuras 4.19 a 4.26.

Figura 4.19 – Conexão entre Albufeira-Barragem-Área de inundação a jusante (SA-Dam-2D Flow Area)

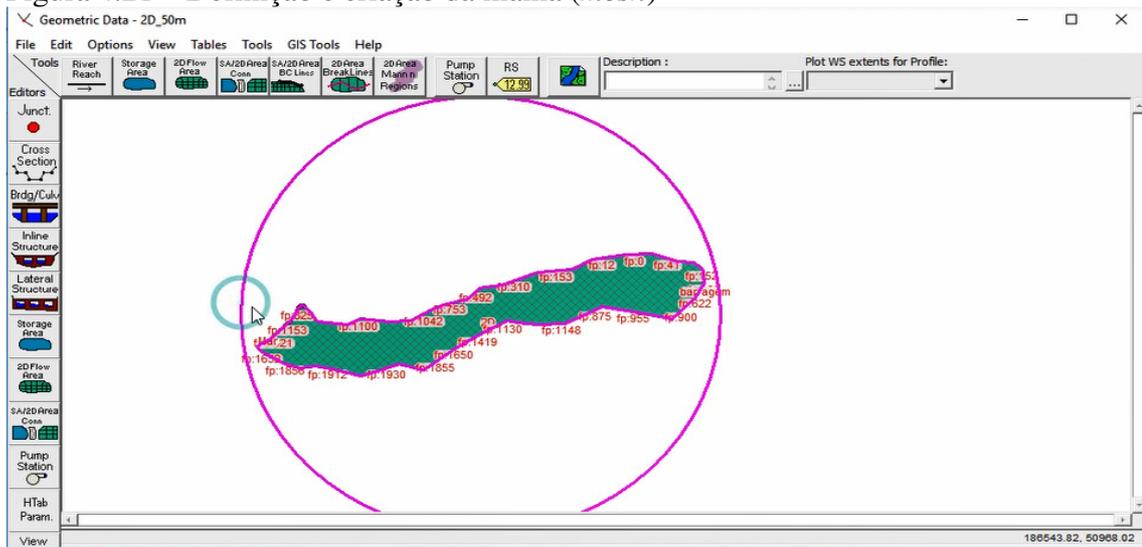


Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.20 – Delimitação da área de inundação – 2D Flow Area



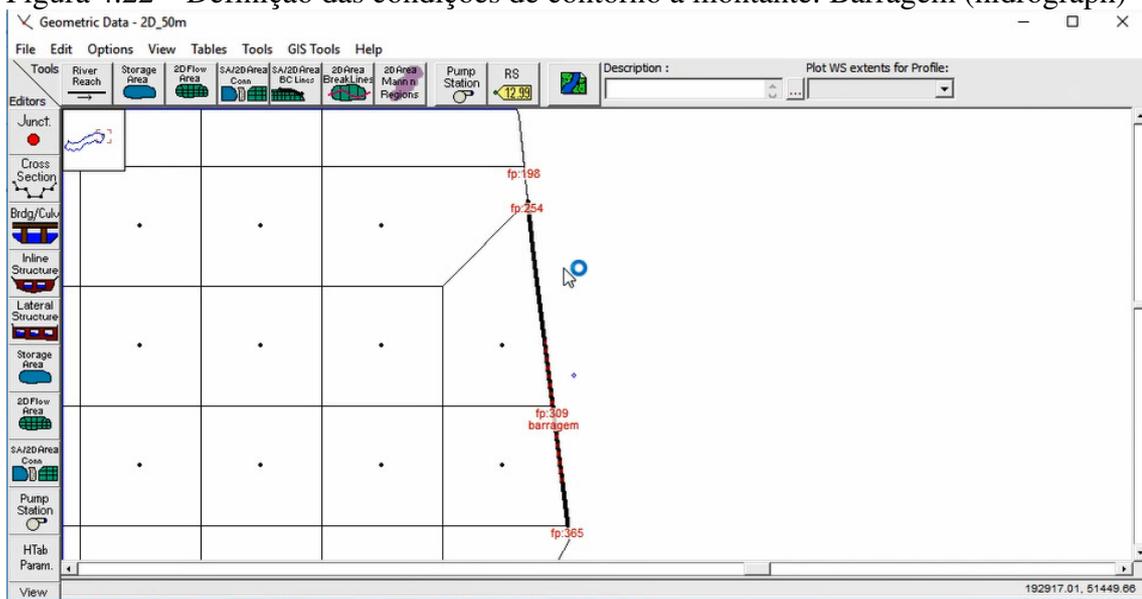
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.21 – Definição e criação da malha (*mesh*)

Fonte: elaborado pelo autor.

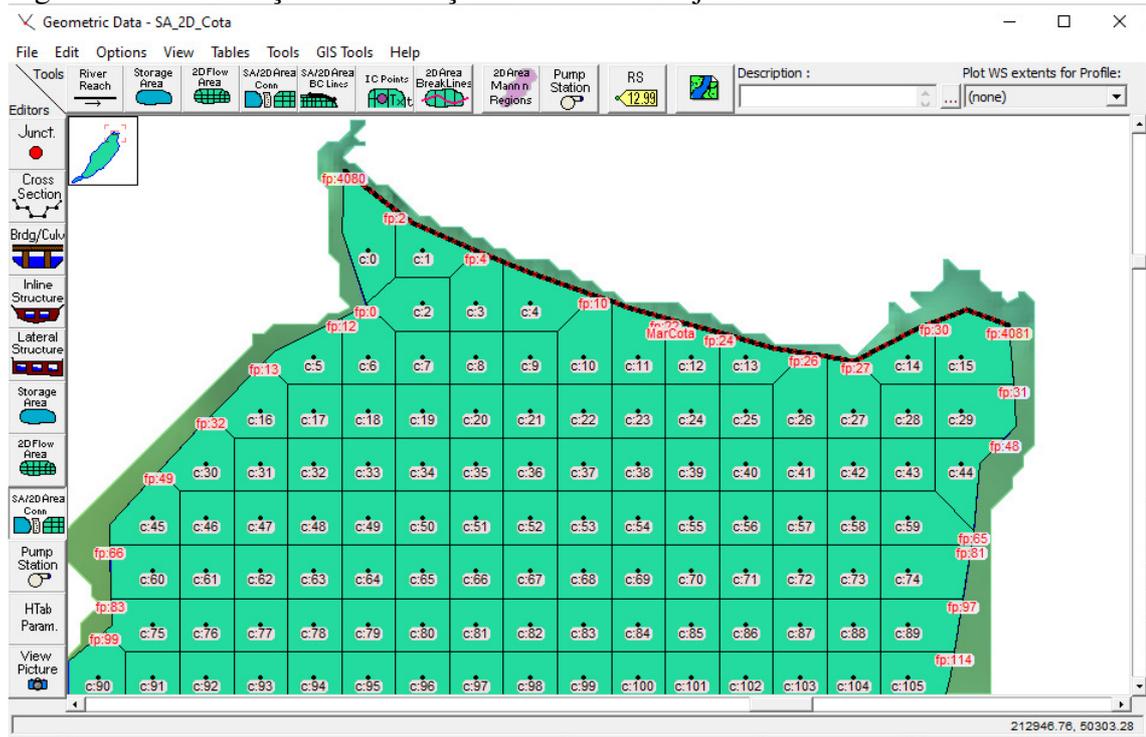
Para a simulação do cenário de simulação foi considerada como condição de contorno de montante o hidrograma de ruptura da barragem (*flow hydrograph*), e como condição de contorno de jusante foi utilizada a profundidade normal (*normal depth*), referente à declividade do trecho final.

Figura 4.22 – Definição das condições de contorno a montante: Barragem (hydrograph)



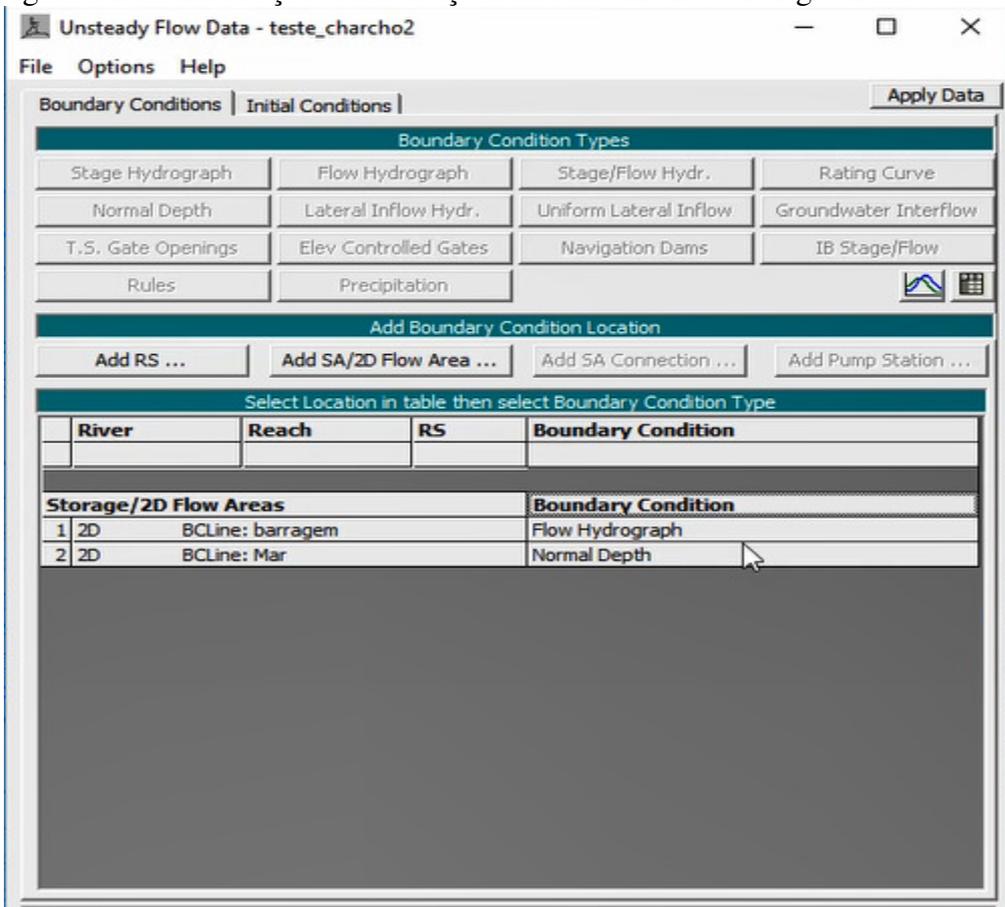
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.23 – Definição das condições de contorno a jusante: Mar



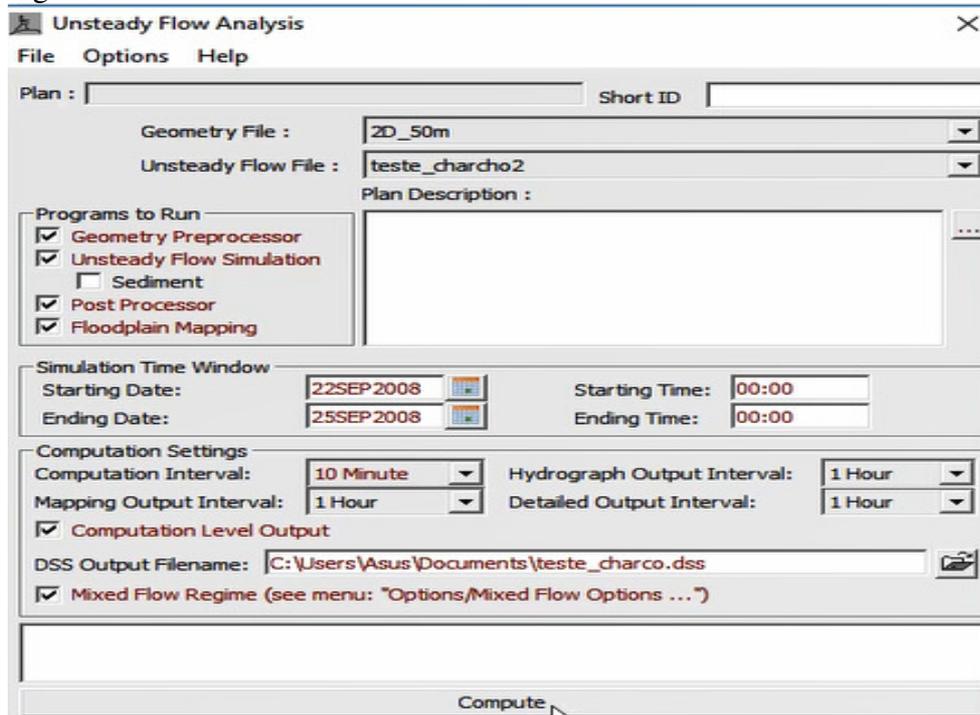
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.24 – Introdução das condições de contorno no editor geométrico



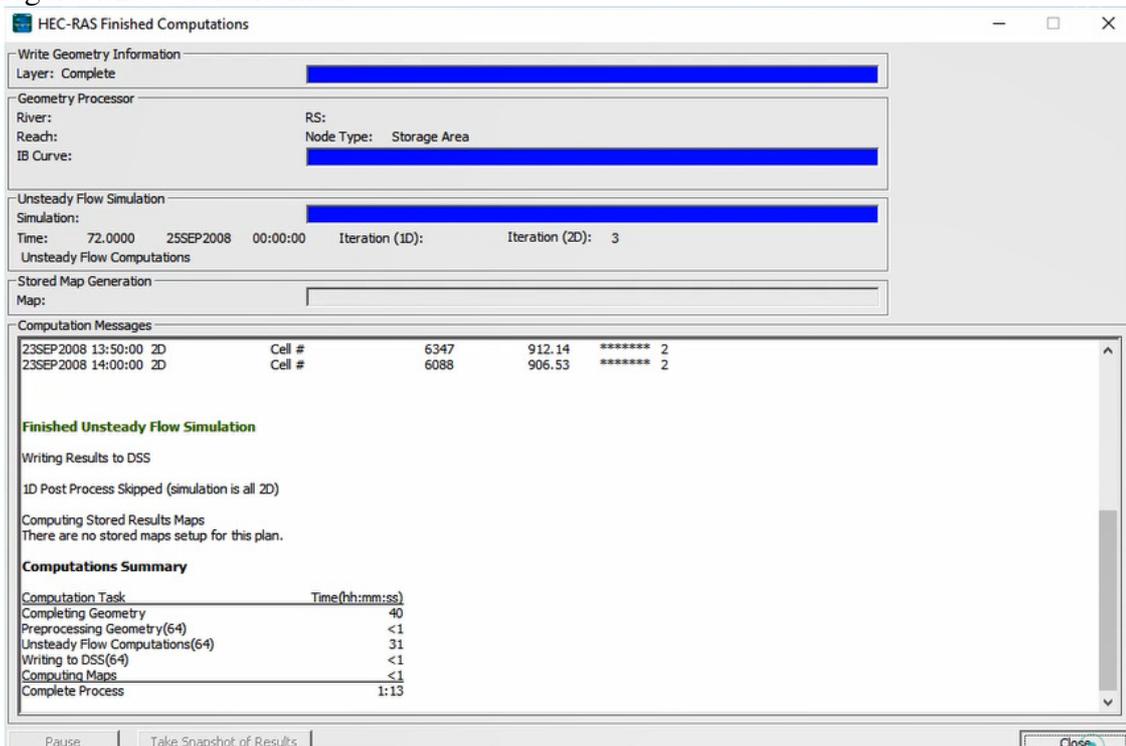
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.25 – Cálculo e análise de dados



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.26 – Cálculo final



Fonte: elaborado pelo autor.

Depois de realizada a simulação de rompimento no HEC-RAS, são elaborados os mapas de inundação com o objetivo de delimitar a zona de risco a jusante e analisar os impactos decorrentes da onda de inundação e sua respectiva propagação.

4.2.5. Mapas de Inundação

A humanidade vem sofrendo (e aproveitando) as inundações desde seu início da história. As inundações, junto com as secas, impactam o maior número de pessoas entre todos os tipos de fenômenos naturais. O prejuízo causado por inundações no mundo é enorme, e as inundações se tornaram cada vez mais severas nas últimas décadas.

Segundo Kobiyama *et al.* (2006), os desastres naturais que provocam maiores perdas humanas no Brasil foram as inundações. Nesta situação atual, é evidente que a comunidade científica e tecnológica deve se dedicar ainda mais para redução de desastres associados a inundação.

Em Cabo Verde, devido ao relevo acidentado e bacias hidrográficas muito inclinadas as inundações são praticamente inevitáveis devido ao caráter concentrado da precipitação presenciada no arquipélago, conduzindo a elevadas quantidades precipitadas num curto período de tempo.

O fenômeno das cheias e inundações é bastante recorrente nos países da África Ocidental, como consequência de elevadas quantidades precipitadas, concentradas no tempo, aliadas à falta de ordenamento de algumas zonas urbanas e de redes de drenagem precárias ou não adequadas às realidades locais. Registam-se anualmente inúmeros casos afetando toda a comunidade Ocidental Africana, especialmente as comunidades mais carenciadas.

Segundo dados reportados pelo UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (2016), foi igualmente catastrófico tendo sido registadas várias situações calamitosas originadas pelas inundações que ceifaram a vida de centenas de pessoas e deixaram milhares temporariamente sem-teto. Houve também grandes perdas materiais e de infraestruturas.

Kobiyama *et al.* (2015) afirma que as técnicas apresentadas para mapear áreas de inundações com uso de HEC-HMS e HEC-RAS são ferramentas para mapeamento de áreas de perigo. Para elaborar mapas de risco de inundação, deve-se elaborar mapas de vulnerabilidade depois de executar simulação e, assim finalmente, terão informações suficientes para construir mapas de risco. Na figura 4.27, estão ilustrados a relação entre perigo, risco e vulnerabilidade.

A UNESCO iniciou a fase VIII do *International Hydrological Programme* (IHP). Esta fase pretende responder ao desafio de segurança hídrica, tendo seis temas. O primeiro e o sexto temas são referentes a redução de desastres hidrológicos e educação sobre a água, respectivamente, compreender o mecanismo de ocorrência de inundação e desenvolver técnicas para mapeamento de inundação podem fazer parte do tema 1. Divulgar tal conhecimento e técnica pode ser considerado como parte do tema 6.

Silva (2016) afirma que mapas de inundação fornecem informações sobre uma ou várias inundações, contendo ao menos uma das seguintes informações:

- Extensão da mancha de inundação;
- Profundidade da inundação; e
- Velocidade da inundação.

Entretanto, o mapa final pode conter apenas as informações das características do evento ou mesmo ser combinado às outras informações do local, como população atingida, custos e outros. A obtenção das características de uma inundação é o passo fundamental para se construir a política de gestão destes eventos, pois é esta que deverá guiar decisões como ocupação do solo, investimentos em prevenção e até mesmo qual o deslocamento prioritário das equipes de resgate.

Em geral, as características da inundação podem ser determinadas a partir da simulação de dados de saída de modelos pluviométricos; ou de dados reais de vazões, como é o caso do HEC-RAS. Apesar de aparentar ser uma informação limitada, os mapas de manchas de inundação são o passo mais importante na gestão de riscos de inundações e enchentes.

EXCIMAP (2007) define que as bases para um trabalho de gestão de inundação devem ter como princípio mapas de risco, feitos para diversos tempos de retorno, abordando a extensão e profundidade da inundação e, quando necessário, até mesmo a velocidade da água. Além disso, estas informações devem ser casadas com outras, como quantidade de população afetada.

Estas informações são de extrema importância, pois além de permitir a construção de um plano de emergência no caso de uma situação extrema, permitem guiar as futuras expansões urbanas da cidade e o direcionamento de construções de controle de enchentes.

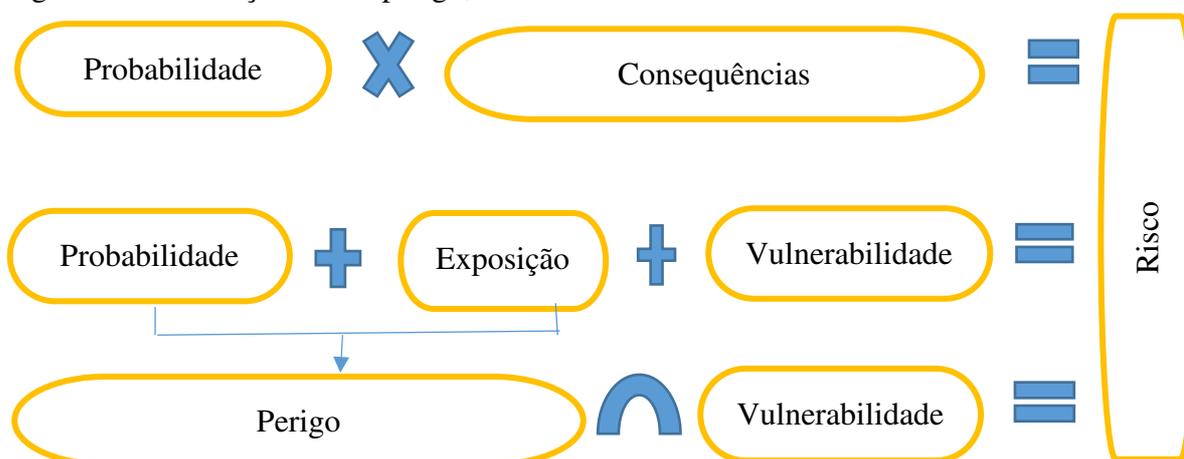
A população tem uma contribuição fundamental na construção dos mapas e na elaboração do plano de gestão de inundações. Primeiramente, é ela quem mais sofre com efeitos diretos destes eventos extremos, sendo suas memórias um importante auxiliar na validade das características da inundação, como a extensão das áreas atingidas e profundidade alcançada.

4.2.5.1. Classificação de Mapa de Inundação

Primeiramente, deve-se esclarecer os termos “risco” e “perigo”. Perigo é característica inerente ao problema: no caso de uma inundação, se relaciona à probabilidade na ocorrência de uma mancha de inundação; geralmente, estas informações são caracterizadas como “baixo, médio e alto perigo”.

Por outro lado, risco está relacionado à sensibilidade de um fator de perigo. Vulnerabilidade é susceptibilidade à ocorrência de incidentes ou acidentes decorrentes de características e fatores intrínsecos da barragem, sua construção ou exploração. A Figura 4.27 ilustra a relação entre perigo, risco e vulnerabilidade.

Figura 4.27 – Relações entre perigo, risco e vulnerabilidade.



Fonte: Adaptado de FLOODsite (2009).

A EXCIMAP (2007) define que mapas de risco de inundações são aqueles obtidos entre a interseção das características da inundação com a população afetada ou custos. Já as diretrizes do FLOODsite (2009) vão além; além de realizar o cruzamento fator exposto, deve-se realizar uma maior interseção entre os dois fatores.

Baseado então nestas informações sobre risco e vulnerabilidade, os mapas de inundação podem ser divididos em dois grandes grupos. Aqueles que fornecem informações sobre as características da inundação são chamados de “mapas de risco”. Outros mapas, que reúnem informações das características da inundação com outros pontos sensíveis de uma cidade, como por exemplo quantidade de casas afetadas, são conhecidos como mapas de vulnerabilidade.

Além de obter o mapa de inundação através de recursos de cartografia, se podem fazer também estudos do zoneamento de risco. Esse processo consiste na divisão do território

potencialmente atingido pela onda de cheia, sendo classificada segundo os riscos envolvidos, a magnitude do dano, a vulnerabilidade e os tempos de alerta (BALBI, 2008).

Almeida (2001) lista as principais características hidrodinâmicas envolvidas em um zoneamento:

- Áreas atingidas (determina quais elementos em risco serão afetadas, população, estruturas etc);
- Cotas máximas dos níveis d'água ou alturas máximas;
- Instante de chegada da onda de cheia;
- Instante de chegada da altura máxima;
- Grau de perigo em função da velocidade e altura ($V \times H$), em m^2/s ; e
- Velocidade máxima do escoamento.

O tempo entre a identificação da emergência e a chegada da onda de cheia nos locais habitados é o primeiro parâmetro para a classificação da área de risco. O tempo eficaz de aviso permite com que as pessoas preparem a mobilização e a evacuação das zonas mais sensíveis, sendo este o fator primordial para a mitigação do efeito das cheias. A USBR (1999) adotou um critério para estimar a perda de vidas em função do tempo de alerta, conforme a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Número esperado de vítimas em função de tempo de alerta

Tempo de aviso(min)	Perda de vidas	Número esperado de vítimas
0 a 15	Significante	NEV = 0,5. (número de pessoas em risco)
15 a 90	Potencialmente Significante	NEV = 0,6.(número de pessoas em risco)
Acima de 90	Perda de vida virtualmente eliminada	NEV= 0,0002.(número de pessoas em risco)

Fonte: Adaptado de Silva (2016).

4.2.5.2. *Formatação de Mapas de Inundação*

Cada país determina seus padrões para apresentação dos mapas a serem elaborados, tipos de representação e de informações, nomenclaturas, escalas etc.

Conforme Balbi (2008), o guia espanhol (ESPANHA, 2001), por exemplo, estabelece que os mapas devem indicar a delimitação da área inundável, com detalhes das zonas que

possam progressivamente ser afetadas pela ruptura, devendo ser confeccionados sobre cartografia oficial, de escala adequada.

O guia determina que, para cada uma das hipóteses de ruptura, sejam elaborados dois tipos de mapas, para determinados intervalos de tempo:

- Mapa com a indicação da envoltória da zona inundável e dos tempos de chegada da onda de ruptura:

Neste mapa, se representa a extensão máxima da zona potencial de inundação ao longo do tempo e se indica a posição da frente da onda em intervalos horários computados desde o momento do início da ruptura (30 minutos na primeira hora). Nesses mapas e nas seções ou zonas importantes, populações, zonas industriais, serviços essenciais e vias de comunicação são indicadas e demarcadas as cotas de referência, a profundidade e as cotas máximas, a vazão máxima, a velocidade máxima e os tempos iniciais e de ponta de chegada da onda de ruptura.

- Mapas de inundação progressiva correspondentes às áreas potencialmente inundáveis aos 30 minutos, 1 hora e horas seguintes:

Nestes mapas e nas seções ou zonas significativas ou de singular importância, serão indicadas e demarcadas as cotas de referência, as profundidades e as cotas, as vazões e as velocidades correspondentes aos máximos relativos associados a uma hora determinada, assim como aos tempos de chegada da onda de ruptura e o tempo de ponta correspondente aos máximos relativos temporais.

Existem diversos programas de geoprocessamento disponíveis no mercado como o ArcGIS (ArcInfo e ArcView) da ESRI, o MapInfo, o Geomedia (Intergraph), AutoCAD Map, MicroStation Geographics, entre outros. São programas que geralmente implicam um alto investimento, porém são muito úteis nos trabalhos de mapeamento de riscos. As atuais tecnologias de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) auxiliam esses trabalhos, permitindo uma apresentação virtual e mais rica dos dados a serem divulgados e analisados.

Alguns programas, inclusive, são capazes de ler os resultados dos modelos de propagação hidráulica e apresentá-los em Modelos Digitais de Terreno (MDT), facilitando significativamente o trabalho, como é o caso do modelo hidráulico HEC RAS combinado ao software de geoprocessamento QGIS, que serão utilizados neste presente trabalho para apresentar o mapa de inundação.

4.2.5.3. Cenários de ruptura

Cenário é a combinação única de circunstâncias de um ambiente como: evento iniciador, velocidade do vento, nível de água no reservatório, posicionamento das comportas, modo de ruptura, onda de cheia provocada pela ruptura e fatores que determinam a presença de pessoas a jusante da barragem no momento da ruptura.

O cenário define a combinação de circunstâncias com interesse para uma avaliação de riscos. Pode-se falar, por exemplo, em cenários de ações, cenários de ruptura e cenários de inundação a jusante. Verifica-se que, para cada barragem, pode-se construir um número elevado de cenários. É necessário estabelecer um conjunto de cenários que viabilize o estudo e seja representativo das situações potencialmente mais graves a atingir o vale.

Brasil (2005) sugere a seguinte classificação de cenários de ruptura:

- Cenário 1 ou cenário extremo de ruptura: é o cenário que define a envoltória máxima para as áreas de risco a jusante. Ele deve ser utilizado para o estabelecimento do sistema de aviso e alerta e do plano de emergência.
- Cenário 2 ou cenário de ruptura mais provável: esse cenário ajusta-se melhor a uma situação real. Pode ser utilizado para fins de uso e ocupação do território a jusante.
- Cenário 3 ou cenário considerando somente a ruptura: onda de cheia proveniente somente da ruptura da barragem. O hidrograma afluente ao reservatório é desconsiderado.
- Cenário 4 ou cenário de operação extrema: esse cenário considera um evento de cheia que leva os órgãos extravasores da barragem a um funcionamento em condições críticas, sem, entretanto, ocorrer o colapso da estrutura.

Almeida (2001) aconselha a não se multiplicar desnecessariamente o número de cenários a simular dada a dificuldade de manipulação de grande quantidade de informações. Segundo FERC (2007), em muitos casos, somente um cenário de ruptura, seja em situações normais (sem cheias naturais) ou durante inundações, requer uma análise desde a lista de notificações, e a prioridade para notificações, normalmente, permanece a mesma, independente da condição inicial investigada.

Algumas vezes, a cheia de projeto é muito inferior à de ruptura e sua significância para a simulação é pequena. Ao analisar a bacia como um todo, os afluentes de jusante podem ter uma contribuição significativa nos períodos chuvosos, sendo responsáveis por grandes inundações, independente da barragem, mesmo num cenário de ruptura.

4.2.5.4. Parâmetros da Brecha

Na ocorrência de uma ruptura em barragem, a forma final mais frequente das brechas ocasionadas é a trapezoidal, segundo dados históricos sobre o tema (FROEHLICH E TU-FAIL, 2004).

Uma variedade de ferramentas e métodos está disponível para a previsão de cenários de ruptura de barragens, caracterizando o desenvolvimento da brecha. Para tal é comumente utilizada formulações matemáticas deduzidas de modo empírico a partir de casos históricos. Cabe ressaltar que as principais características, obtidas por meio dessas equações, referem-se ao tempo de formação da brecha e largura média da mesma.

Dentre as metodologias disponíveis na literatura, aquela desenvolvida por Froehlich (2016) é bastante citada para a previsão das características da brecha. A mesma foi desenvolvida com base em 63 casos de ruptura de barragens, em 1995. Em 2016, os estudos foram revisados, considerando 111 casos de ruptura de barragens.

Neste sentido, por meio das Equações 4.22 e 4.23, pode-se estimar a largura média da brecha e o tempo de formação, respectivamente (FROEHLICH, 2016).

$$B_{ave} = 0,23 K_0 V_w^{1/3} \quad (4.22)$$

$$T_f = 60 \sqrt{\frac{V_w}{g H_b^2}} \quad (4.23)$$

em que:

B_{ave} – largura média da brecha [m];

V_w – volume do reservatório no momento da ruptura [m³];

K_0 – constante equivalente a 1,5 para casos de rompimento por galgamento.

T_f – tempo de formação da brecha [s];

g – aceleração da gravidade [m/s²]; e

H_b – altura da brecha [s].

Para a determinação do cenário de simulação, foi adotada a metodologia de estudo de ruptura simplificado, como recomendado no documento “*Dam Safety Guidelines – Dam Break Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification*”, elaborado pelo *Washington State Department of Ecology* em julho de 1992, e posteriormente revisado em outubro de 2007.

De acordo com o documento supracitado, a utilização do nível de água no NA (nível máximo *maximorum*) normal do barramento, apresenta resultados aceitáveis para estudos dessa magnitude, como o da barragem industrial.

Dessa forma, o cenário determinado para a ruptura hipotética foi: Ruptura da barragem, considerando o nível de água do reservatório fixado no NA normal do barramento no momento da ruptura.

5. GESTÃO DE RISCO E PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA

5.1. Análise, Avaliação e Gestão de Risco em Barragens

O risco está presente em qualquer obra de engenharia, pois não é possível determinar por completo o comportamento de alguns materiais, como por exemplo, o solo. Desta forma, as estruturas devem estar em constante monitoramento, visando gerenciar ou minimizar o risco.

A análise de risco utiliza a avaliação de risco como forma de coletar dados para a análise da situação da segurança da barragem. A avaliação de risco, por sua vez, tem como objetivos básicos identificar as ameaças em potencial e os modos de ruptura, proceder a uma estimativa estatística de risco, avaliar tolerabilidade, avaliar o potencial de redução através de medidas corretivas eventualmente necessárias e estabelecer uma estratégia de atenuação.

Segundo Mello (2010), pode-se definir risco como a combinação da probabilidade de ocorrência de um evento com suas consequências. A probabilidade de ocorrência de um evento é geralmente intitulada como ameaça e as consequências são os custos diretos e indiretos decorrentes da manifestação de ameaça.

Na Tabela 5.1, apresenta-se a metodologia Nível de Perigo da Barragem (NPB) (FONTENELLE, 2007) e CNRH (2012), como exemplo de metodologia associada apenas à ameaça, tendo em vista que seu cálculo é efetuado considerando o número de anomalias verificadas durante a inspeção e os respectivos Níveis de Perigo (NP).

Tabela 5.1 – Níveis de perigo e os pesos respectivos

Nível de Perigo da Anomalia	Peso do NP (a)
Nenhum (0)	0
Atenção (1)	1
Alerta (2)	4
Emergência (3)	9

Fonte: Adaptado de CNRH (2012) e Fontenelle *et al.* (2018).

A classificação das barragens em função do risco é uma ferramenta importante a ser utilizada para administrar o investimento em ações de prevenção de acidentes, priorizando as ações de recuperação e reforço nas barragens que apresentarem um maior risco.

A abordagem implícita na Avaliação de Riscos vem ao encontro desta nova realidade, fornecendo aos Engenheiros mais uma ferramenta de trabalho, complementando aqueles já existentes na abordagem tradicional. Ela permite que as incertezas inerentes à engenharia

sejam todas tratadas de maneira mais transparente e explícita, por meio de análises probabilísticas e de confiabilidade, ao invés de análises determinísticas e dos “julgamentos de engenharia” cujas incertezas ficam implícitas nos valores dos Fatores de Segurança adotados e na experiência profissional.

Por ser sistemática, permite que o comportamento e o desempenho da barragem sejam mais bem compreendidos, uma vez que procura focar na origem das incertezas. Além disso, as possíveis consequências são estudadas e seus impactos considerados na avaliação.

Conforme Fontenelle *et al.* (2018), na metodologia proposta por Fontenelle (2007), os valores provenientes do níveis de perigo podem ser utilizados para o cálculo da probabilidade de ruptura (ameaça) utilizando-se o chamado Nível de Perigo da Barragem (NPB).

Para o cálculo, inicialmente, são atribuídos pesos para cada um dos NP, conforme mostra-se nas Tabela 5.2, valendo ressaltar que os números entre parêntesis indicam a numeração utilizada na coluna NP da lista de inspeção, Tabela 5.3.

Tabela 5.2 – Peso da quantidade de NP em cada nível

Quantidade de NP na lista de inspeção	Peso da quantidade
0-5	1
6-10	2
11-15	3
16-20	4
21-35	5
36-50	6

Fonte: Adaptado de CNRH (2012) e Fontenelle *et al.* (2018).

Instituída em 2001, pela COGERH (MENESCAL *et al.*, 2001), esta metodologia utiliza três parâmetros para calcular o potencial de risco (PR). São os parâmetros: a Periculosidade (P), Vulnerabilidade (V) e a Importância Estratégica (I). A Tabela 5.3 mostra um exemplo de formulário utilizado para o cálculo da pontuação total do NPB, e a Tabela 5.4, a classificação da barragem adotada a partir dos resultados obtidos para o NPB.

Tabela 5.3 – Exemplo de Quadro utilizado para o cálculo da pontuação total do NPB

NP	Peso do NP (a)	Quantidade na lista de Inspeção	Peso das quan- tidades (b)	Pontuação NPB (a x b)
Nenhum (0)				
Atenção (1)				
Alerta (2)				
Emergência (3)				
Total da Pontuação NPB da Barragem =				

Fonte: Adaptado de Fontenelle *et al.* (2018).

Tabela 5.4 – Classificação da Barragem adotada a partir do NPB

NPB	Classificação
>30	Altamente preocupante (AP)
9-30	Preocupante (P)
2-8	Aceitável (AC)
1	Bom Desempenho (BD)
0	Ótimo Desempenho (OD)

Fonte: Adaptado de Fontenelle *et al.* (2018).

A Periculosidade (P) engloba dados técnicos e de construção, calculada a partir do somatório dos índices de acordo com certos critérios e pontuações (ver Tabela 5.5, mais adiante). Sendo considerada elevada se a pontuação for maior que 30, significativo para uma pontuação entre 20 e 30, e baixo a moderado para pontuações entre 10 e 20.

Com base em inspeções de campo e em leituras de instrumentação, tais como piezômetros e medidores de recalques magnéticos, é calculada a estimativa de Vulnerabilidade (V) segundo a Tabela 5.6, e a partir de critérios econômicos, técnicos, ambientais e sociais é estabelecida a importância estratégica (I) com base na Tabela 5.7 (FONTENELLE, 2007).

A Vulnerabilidade é dada pela soma dos índices da tabela e pode ser classificada em: elevada se for maior que 35, moderada a elevada se for entre 20 e 35, baixa a moderada se for entre 5 e 20, e muito baixa se menor que 5. A importância estratégica (I), por sua vez, é dada pela média aritmética dos valores.

Tabela 5.5 – Periculosidade (P)

Dimensão da barragem	Reservatório	Tipo de barragem	Tipo de fundação	Vazão de projeto
A < 10 m L < 200 m (1)	Pequeno < 20 hm ³ (3)	Concreto (4)	Rocha (1)	Decamilenar (1)
A 10-20 m L < 2.000 m (3)	Médio Até 200 hm ³	Alvenaria de pedra/ concreto rolado (6)	Rocha alterada / sa- prolito (4)	Milenar (2)
A 20-50 m L 200-3.000 m (6)	Regular 200-800 hm ³ (7)	Terra / enrocamento (8)	Solo residual / alu- vião até 4 m (5)	500 anos (4)
A > 50 m L < 500 m (10)	Muito grande > 800 hm ³ (10)	Terra (10)	Aluvião arenoso es- parso / solo orgâ- nico (10)	< 500 anos ou desconhecida

Fonte: Adaptado de Fontenelle *et al.* (2018).

Legenda: A = altura da barragem; L = comprimento da barragem.

Tabela 5.6 – Critérios de avaliação de vulnerabilidade (V)

Tempo de Operação ⁶	Existência de <i>As Built</i> ⁷	Confiabilidade das estruturas vertedouras ⁸	Tomada d'água ⁹	Percolação ¹⁰	Deformações, Afundamentos, Assentamentos ¹¹	Deterioração dos Taludes e Paramentos ¹²
> 30 anos (0_)	Existe <i>As Built</i> e Avaliação de Desempenho	Muito satisfatória (2)	Satisfatória Controle a montante (1)	Totalmente controlada pelo sistema de drenagem (1)	Inexistente (0)	Inexistente (1)
10-30 anos	Existe <i>As Built</i> (3)	Satisfatório (3)	Satisfatória Controle a jusante (2)	Sinais de umedecimento a jusante, taludes ou ombreiras	Pequenos abatimentos da crista (2)	Falhas no <i>rip-rap</i> e na proteção de jusante (3)
5-10 anos	Apenas projeto básico (5)	Suficiente (6)	Aceitável (3)	Zonas úmidas no talude de jusante, ombreiras e jusante	Ondulações pronunciadas, fissuras (6)	Falha nas proteções, drenagem insuficiente e sulcos nos taludes (7)
> 5 anos	Não existe projeto (7)	Não satisfatório (10)	Deficiente (5)	Surgência nos taludes, ombreiras e a jusante (10)	Depressão na crista, afundamentos nos taludes ou fundação / trincas (10)	Depressão no <i>rip-rap</i> , escorregamentos, sulcos profundos de erosão, vegetação (10)

Fonte: Adaptado de Fontenelle *et al.* (2018).

O Potencial de Risco (PR) é então calculado por meio da Equação (5.1):

$$PR = \frac{(P + V)}{2} \times I \quad (5.1)$$

em que:

- PR – potencial de risco;
- P – periculosidade;
- V – vulnerabilidade; e
- I – importância estratégica.

Após o cálculo do PR, aplica-se o valor obtido aos critérios apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8, a fim de determinar a faixa de classificação de risco em que se encontra a barragem.

Tabela 5.7 – Importância Estratégica (I)

Volume útil (A)	População a jusante (B)	Custo da barragem (C)
Grande > 800 hm ³ (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
Médio: 200 a 800 hm ³ (1,5)	Média (2,0)	Médio (1,2)
Baixo <200 hm ³ (1)	Pequena (1,0)	Pequeno (1,0)

Fonte: Adaptado de Fontenelle *et al.* (2018).

Tabela 5.8 – Classificação quanto à classe de risco da barragem baseada no valor do PR

Classe	PR	
A	> 65 (ou Vi =10)	alto
B	40 a 65	médio
C	25 a 40	normal
D	15 a 25	baixo
E	< 15	muito baixo

Fonte: Adaptado de Fontenelle *et al.* (2018).

Segundo (Almeida, 1998), falar de “risco” é falar, simultaneamente, de oportunidade e benefícios e de incerteza e prejuízos. Grandeza multidimensional, tem múltiplos significados na linguagem corrente e na terminologia técnico-científica. É um indicador de segurança e um operador de decisão, bem como uma etiqueta da sociedade atual, sujeita a uma realidade variável e menos segura e a um reconhecimento cada vez mais severo do grau de vulnerabilidade da sociedade humana face ao ambiente.

O risco pode ser uma forma de justificar o adiar de decisões relativas à segurança do público ou pode ser o indicador eficaz para implementar novas medidas de proteção. O risco está associado ao receio e ao pavor mas também a benefícios e a vantagens positivas. A avaliação quantitativa do risco baseia-se fundamentalmente em análises do risco das barragens envolvidas e na avaliação das consequências (danos) a jusante.

Conforme Perini (2009), a avaliação de riscos ainda se encontra em fase de aperfeiçoamento para aplicação em segurança de barragens, necessitando maiores estudos. Entretanto, abordagens com base nos riscos já vem sendo consideradas por várias organizações como o Comitê Australiano de Grandes Barragens (ANCOLD), o Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), o *U.S. Bureau of Reclamation (USBR)*, o *British Columbia Hydro (BC Hydro)* e até mesmo em legislações de países como África do Sul, Holanda, e no Brasil, pela Eletrobrás (2003).

Conforme Menescal et al. (2005 *apud* Salmon, 1995), os principais elementos da avaliação de risco de segurança de barragens são:

1. Listar todos os modos e sequências de ruptura concebíveis (identificação de ameaças).
2. Elencar estes modos e selecionar aqueles que são possíveis de acontecer.
3. Exibir estes modos em uma árvore de eventos com a lógica que melhor representa a realidade física dos modos de ruptura potenciais.
4. Estimar as probabilidades em cada ramo da árvore de eventos; alguns ramos levam à ruptura, outros não.
5. Executar os processos de cálculo para conseguir a probabilidade (ou probabilidades) de vários tipos de ruptura.
6. Revisar os ramos críticos da árvore de eventos para ver qual das probabilidades atribuídas precisam de refinamento adicional.
7. Documentar o processo inteiro de uma maneira transparente, especialmente as razões para a indicação de probabilidades, de forma que todos os passos sejam fáceis para revisar.
8. Determinar as consequências dos vários modos de ruptura.
9. Determinar o risco associando probabilidades de ruptura e consequências.

Uma dificuldade óbvia com esta abordagem é a atribuição de probabilidades. As probabilidades que a resposta da barragem às cargas aplicadas ou condições levarão à ruptura também devem ser estimadas. Estas probabilidades devem ser estimadas por engenheiros experientes, peritos na área em questão e familiarizados com a barragem e com todas as investigações e estudos prévios à sua disposição.

Menescal e Vieira (1999) apresentam um exemplo de procedimento a ser adotado para o estudo do risco em sangradouro de barragens.

Os principais benefícios de uma avaliação de risco são:

- Um processo estruturado para o uso consistente e efetivo de juízo de engenharia (cenários de ruína, árvores de eventos, probabilidades estimadas etc.)
- A oportunidade para descrição e quantificação explícita do juízo de engenharia.
- Uma avaliação da importância relativa de perigos, para subsidiar decisões no requisito para estudos adicionais e melhoria da segurança.
- Uma consideração equilibrada de todos os fatores, proporcional com sua contribuição para a probabilidade de ruína, inclusive aquelas não agradáveis para análise, porque a avaliação segue a partir das condições, peculiaridades, vulnerabilidades e modos de ruína associados, únicos para cada barragem individualmente.
- Um método consistente por comparar a segurança (risco) relativa de barragens.
- Uma base mais formal para priorizar melhorias da segurança de barragens.
- A melhor resposta disponível para a pergunta, “quão segura é nossa barragem?”.

De maneira geral, o risco ao vale a jusante de barragens (R_{VALE}) pode ser calculado como a probabilidade de ocorrência de um evento adverso (P_{EVENTO}), como uma cheia extraordinária, por exemplo, combinada com a probabilidade de ruptura dada a ocorrência deste evento ($\frac{P_{RUPTURA}}{EVENTO}$). Assim, no caso específico de barragens, a quantificação do risco é expressa pela Equação (5.2) (VISEU; ALMEIDA, 2011).

$$R_{VALE} = P_{EVENTO} \times \frac{P_{RUPTURA}}{EVENTO} \times \text{Consequências da ruptura} \quad (5.2)$$

As consequências da ruptura dependem basicamente do grau de perigo associado à cheia, do grau de exposição e da suscetibilidade à destruição ao qual estão sujeitos os indivíduos e os bens a jusante (VISEU; ALMEIDA, 2011).

No que diz aos vales a jusante de barragens, verifica-se ainda que a noção de risco se refere a uma dupla realidade: por um lado, refere ao risco de ruptura de uma barragem (que se relaciona com a análise do risco associado à barragem) e, por outro, ao risco em que incorrem os vales a jusante da mesma, pelo fato deste poder eventualmente colapsar (que se relaciona com a análise do risco no vale a jusante de barragens (Viseu, 2010).

Alicerçado na metodologia da COGERH, este método é utilizado para classificação das barragens de usos múltiplos no âmbito da União. Segundo ANDERÁOS, ARAÚJO e NUNES (2013), a Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012, estabelece os critérios de classificação quanto à Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) para a determinação do nível de risco utilizando a Matriz de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado, constante do Anexo I da Resolução Agência Nacional de Águas (ANA) no 236/2017.

Quanto à CRI, esta é calculada a partir da soma dos seguintes critérios para classificação: Características Técnicas (CT), Estado de Conservação (EC) e Plano de Segurança da Barragem (PS), com os parâmetros e pontuações dispostos nas Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11. Para o cálculo do DPA, adotam-se os parâmetros e pontuações da Tabela 5.12.

Tabela 5.9 – Características Técnicas (CT)

Aspecto	Descrição da característica técnica				
Altura (a)	< 15 m (0)	15 a 30 m (1)	30 a 60 m (2)	> 60 m	
Comprimento (b)	< 200 m	> 200 m			
Material de construção (c)	Concreto convencional (1)	Alvenaria de pedra, concreto ciclópico, concreto rolado (2)	Terra homogênea, enrocamento, terra enrocamento (3)		
Tipo de fundação (d)	Rocha sã (1)	Rocha altamente dura com tratamento (2)	Rocha alterada sem tratamento, ou fraturada com tratamento (3)	Rocha alterada mole, saprolito, solo compacto (4)	Solo residual, aluvião (5)
Idade da barragem (e)	30 a 50 anos (1)	10 a 30 anos (2)	5 a 10 anos (3)	< 5 anos ou > 50 anos, ou sem informação (4)	
Vazão de projeto (f)	Decamilenar ou CMP – $T_R = 10.000$ anos	Milenar - $T_R = 1.000$ anos (5)	$T_R - 500$ anos (8)	$T_R < 500$ anos ou desconhecido / estudo não-confiável (10)	

Fonte: Adaptado de Fontenelle *et al.* (2018).

Legenda: CMP = cheia máxima provável; T_R = tempo de retorno.

Tabela 5.10 – Estado de Conservação (EC)

Aspecto	Descrição do estado de conservação		
Estruturas extravasoras (g)	Estruturas civis e hidroeletromecânicas em pleno funcionamento, canais de aproximação, de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos (0)	Estruturas civis e hidroeletromecânicas preparadas para operação, mas sem suprimento de energia de emergência, canais ou vertedouro (soleira livre) com erosões ou obstrução, mas sem risco à estrutura vertente (4)	Estruturas civis comprometidas ou hidroeletromecânicas com problemas, com redução da capacidade de vazão e medidas corretivas de implantação, canais ou vertedouros (soleira livre) com erosão e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente (7)
Estruturas de adução (h)	Estruturas civis e hidroeletromecânicas em condições adequadas de manutenção	Estruturas civis comprometidas ou hidroeletromecânicas com problemas, e redução da capacidade vazão	Estruturas civis comprometidas ou hidroeletromecânicas com problemas, com redução da capacidade de vazão e sem medidas corretivas (6)
			Estruturas civis e hidroeletromecânicas com problemas, com redução da capacidade de vazão e sem medidas corretivas, canais ou vertedouro (soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas (10)

Aspecto		Descrição do estado de conservação			
Percolação (i)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Unidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas ou monitoradas (3)	Unidade ou surgência a jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente (8)	
Deformações e recalques (j)	Inexistente (0)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável, gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial e comprometimento da segurança (8)	
Deterioração dos taludes/paramentos (l)	Inexistente (0)	Falha na proteção de taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizado, Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva (5)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7)	
Eclusa (m)	Não possui (0)	Estruturas civis e hidroeletromecânicas bem mantidas e funcionando (1)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas, e medidas corretivas em implantação (2)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas, sem medidas corretivas (4)	

Fonte: Adaptado de CNRH (2012).

Tabela 5.11 – Plano de Segurança da Barragem (PS)

Aspecto		Descrição da condição			
Existência de documentação de projeto (n)	Projeto executivo e " como construído " (0)	Projeto executivo ou " como construído " (2)	Projeto básico (4)	Anteprojeto conceitual (6)	Inexistência de documentação de projeto (8)
Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem (0)	Possui estruturas organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0)	Possui técnica responsável pela segurança da barragem (4)	Não possui estruturas organizacional e responsável técnica pela segurança da barragem (8)		
Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança	Possui e aplica procedimentos de inspeção e	possui e aplica ape-	Possui e não aplica procedi-	Não possui e não aplica	

Aspecto		Descrição da condição		
e de monitoramento (p)	monitoramento (0)	nas procedimentos de inspeção (3)	mentos de inspeção e monitoramento (5)	procedimentos para monitoramento e inspeções (6)
Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q)	Sim ou Verde-douro tipo soleira livre (0)	Não (6)		
Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r)	Emite regularmente os relatórios (0)	Não emite os relatórios (5)		

Fonte: Adaptado de Fontenelle *et al.* (2018).

Tabela 5.12 – Dano Potencial Associado (DPA)

Volume total da barragem (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
Pequeno < 5 milhões m ³ (1)	Inexistente: não existem pessoas permanentes, residentes ou temporárias, transitando na área afetada a jusante (0)	Significativo: área afetada da barragem não é de interesse ambiental nem protegida em legislação específica, ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais (3)	Inexistente ou não existem instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem
Médio 5-75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas há estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou é protegida por legislação específica) (5)	BAIXO (pequena concentração de instalações residenciais, comerciais, agrícolas, industriais ou infraestruturas na área afetada da barragem, ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)
Grande 75-200 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante, mas existe rodovia municipal, estadual, federal, e/ou outro empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (8)		ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestruturas e serviços de lazer e turismo na área afetada a jusante, ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
Muito Grande > 200 milhões de m ³ (5)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante, e vidas humanas poderão ser atingidas) (12)		

Fonte: Adaptado de Fontenelle *et al.* (2018).

De acordo com a soma dos pontos de CRI e DPA, determina-se o resultado final da avaliação, segundo os critérios apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Classificação das barragens segundo a metodologia do CNRH

1 - CATEGORIA DE RISCO (CRI)		PONTOS
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC+PS		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTA	≥ 60 OU EC = 8 ^(*)
	MÉDIO	35 a 60
	BAIXO	≤ 35
2- DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		PONTOS
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 16
	MÉDIO	$10 < DP < 16$
	BAIXO	≤ 10
RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:		
CATEGORIA DE RISCO		
DANO POTENCIAL ASSOCIADO		

Fonte: Adaptado de CNRH (2012) e Fontenelle *et al.* (2018).

(*) Pontuação (8) em qualquer coluna de Estado de conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

5.2. Plano de Ação de Emergência (PAE) - Mitigação de Risco em Barragem

As barragens induzem riscos e, em caso de acidente, podem gerar efeitos e consequências graves. Quando tais situações ocorrem, é necessário atenuar as consequências, sendo fundamental socorrer as pessoas e proteger os bens em perigo.

A Lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estipula, como um dos instrumentos desta política, a elaboração do Plano de Segurança da Barragem, que deve em determinados casos, conter o PAE.

Assim, a Entidade Fiscalizadora poderá determinar a elaboração do PAE em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem, devendo exigí-lo sempre para a barragem classificada como de dano potencial associado (DPA) alto, em observância ao Art. 11 da Lei nº 12.334/2010.

O PAE é um documento que deve ser adaptado à fase de vida da obra, às circunstâncias de operação e às suas condições de segurança. É, por isso, um documento datado que deve ser periodicamente revisado, nomeadamente, sempre que haja lugar a alterações dos dados dos intervenientes e, ainda, na sequência da realização de exercícios de teste ou da ocorrência de situações de emergência, que justifiquem alterações ao plano. A revisão e atualização do PAE é da responsabilidade do Empreendedor.

O PAE é um documento formal, a ser elaborado pelo Empreendedor, no qual deverão ser estabelecidas as ações a serem executadas pelo mesmo em caso de situação de emergência, bem como identificados os agentes a serem notificados dessa ocorrência (Art. 12 da Lei nº 12.334/2010).

O PAE deverá contemplar, pelo menos: *i*) identificação e análise das possíveis situações de emergência; *ii*) procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem; *iii*) procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação; e *iv*) estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

No PAE, deverá estar igualmente definida a Zona de Autossalvamento (ZAS), ou seja, a região a jusante da barragem em que se considera não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente. Os critérios para definição da ZAS variam de país para país (ANA, 2016).

Segundo resolução nº 236 da ANA, o PSB deverá estar disponível no próprio local da barragem, no escritório regional do empreendedor, caso exista, bem como em sua sede. O PAE será exigido para barragens de Classes A e B e deverá contemplar o previsto no artigo 12 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e seu nível de detalhamento deve seguir o estabelecido na Tabela 6.15.

O PAE deverá ser elaborado, para barragens novas, antes do início do primeiro enchimento, a partir de quando deverá estar disponível para utilização. O PAE deverá ser atualizado anualmente nos seguintes aspectos: endereços, telefones e e-mails dos contatos contidos no Fluxograma de Notificação; responsabilidades gerais no PAE; listagem de recursos materiais e logísticos disponíveis a serem utilizados em situação de emergência; e outras informações que tenham se alterado no período.

A revisão do PAE implica reavaliação da ocupação a jusante e da eventual necessidade de elaboração de novo mapa de inundação. O PAE, quando exigido, deverá estar disponível nos seguintes locais:

- I – na residência do coordenador do PAE;
- II – nas prefeituras dos municípios abrangidos pelo PAE;
- III – nos organismos de Defesa Civil dos municípios e estados abrangidos pelo PAE; e
- IV – nas instalações dos empreendedores de barragens localizados na área afetada por um possível rompimento.

O empreendedor deve atender às solicitações de informações adicionais de autoridades públicas, para fins de esclarecimento do conteúdo do PAE.

Ao se detectar uma situação que possivelmente comprometa a segurança da barragem e/ou de áreas no vale a jusante, dever-se-á avaliá-la e classificá-la, de acordo com o Nível de Resposta, conforme código de cores padrão em:

- I- Nível de Resposta 0 (verde): quando a situação encontrada ou a ação de eventos externos à barragem não compromete a sua segurança, mas deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo;
- II- Nível de Resposta 1 (amarelo): quando a situação encontrada ou a ação de eventos externos à barragem não compromete a sua segurança no curto prazo, mas deve ser controlada, monitorada ou reparada;
- III- Nível de Resposta 2 (laranja): quando a situação encontrada ou a ação de eventos externos à barragem represente ameaça à segurança da barragem no curto prazo, devendo ser tomadas providências para a eliminação do problema;
- IV- Nível de Resposta 3 (vermelho): quando a situação encontrada ou a ação de eventos externos à barragem represente alta probabilidade de ruptura, devendo ser tomadas medidas para prevenção e redução dos danos decorrentes do colapso da barragem.

A convenção adotada neste artigo deve ser utilizada na comunicação entre o empreendedor e as autoridades competentes sobre a situação de emergência em potencial da barragem e o disposto nesse acima deve, no que couber, estar compatibilizado com o NPGB. Cabe ao empreendedor da barragem:

- I- providenciar a elaboração do PAE;
- II- promover treinamentos internos, no máximo a cada dois anos, e manter os respectivos registros das atividades;

- III- participar de simulações de situações de emergência, em conjunto com prefeituras, Defesa Civil e população potencialmente afetada na ZAS;
- IV- designar, formalmente, o Coordenador do PAE podendo ser o próprio empreendedor;
- V - detectar, avaliar e classificar as situações de emergência em potencial, de acordo com os Níveis de Resposta;
- VI - emitir declaração de início e encerramento de emergência, obrigatoriamente para os Níveis de Resposta 2 e 3 (laranja e vermelho);
- VII - executar as ações previstas no Fluxograma de Notificação do PAE;
- VIII - alertar a população potencialmente afetada na ZAS, caso se declare Nível de Resposta 2 e 3 (laranja e vermelho), sem prejuízo das demais ações previstas no PAE e das ações das autoridades públicas competentes;
- IX - estabelecer, em conjunto com a Defesa Civil, estratégias de comunicação e de orientação à população potencialmente afetada na ZAS sobre procedimentos a serem adotados nas situações do inciso anterior;
- X - providenciar a elaboração do relatório de encerramento de emergência (PSB e PAE), conforme o tratado nesta resolução e sempre quando exigido.

As barragens em estudo, deverão ser classificadas, conforme a Matriz disposta no Anexo I, segundo a Categoria de Risco e o Dano Potencial Associado, com o objetivo de estabelecer a necessidade de elaboração do Plano de Ação de Emergência – PAE (Tabela 5.14).

Tabela 5.14 – Matriz de classificação de barragens

CATEGORIA DE RISCO (CRI)	DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	A	C	D
BAIXO	A	D	D

Fonte: Adaptado da Resolução nº 236 da ANA (2017).

Tabela 5.15 – Conteúdo Mínimo e Nível de Detalhamento do Plano de Segurança de Barragem

VOLUMES	CONTEÚDO MÍNIMO
Volume I Informações Gerais	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificação do Empreendedor; 2. Caracterização do empreendimento; 3. Características técnicas do Projeto e Construção; 4. Indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos a ser resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes; 5. Estrutura organizacional, contatos dos responsáveis e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem; 6. Quando for o caso, indicação da entidade responsável pela regra operacional do reservatório; 7. Classificação da barragem quanto à Categoria de Risco e ao Dano Potencial Associado.
Volume II Documentação Técnica do Empreendimento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para barragens construídas antes de 21/09/2010: Projetos em nível básico e/ou executivo. Na inexistência destes, estudos simplificados de caracterização geotécnica do maciço, fundações e estruturas associadas, levantamento geométrico (topografia) e estudo hidrológico/hidráulico das estruturas de descarga; 2. Para barragens construídas após 21/09/2010: Projeto como construído (<i>As Built</i>); 3. Manuais dos equipamentos; 4. Licenças ambientais, outorgas e demais requerimentos legais.
Volume III Planos e Procedimentos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Regra operacional dos dispositivos de descarga; 2. Planejamento das manutenções; 3. Plano de monitoramento e instrumentação; 4. Planejamento das inspeções de segurança da barragem; 5. Cronograma de testes de equipam. hidráulicos, elétricos e mecânicos.
Volume IV Registros e Controles	<ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de Operação; 2. Registros de Manutenção; 3. Registros de Monitoramento e Instrumentação; 4. Registros dos testes de equipamentos hidráulicos, elétricos e mecânicos; 5. Relatórios de Inspeções de Segurança de Barragens, devendo conter: <ol style="list-style-type: none"> a) Identificação do representante legal do empreendedor; b) Identificação do responsável técnico pela elaboração do Relatório e respectiva Anotação de Responsabilidade Técnica; c) Ficha de inspeção visual preenchida, englobando todas as estruturas da barragem e a indicação de anomalias;

VOLUMES	CONTEÚDO MÍNIMO
	<ul style="list-style-type: none"> d) Avaliação e registro, inclusive fotográfico, de todas as anomalias encontradas, avaliando suas causas, desenvolvimento e consequências para a segurança da barragem; e) Comparação com os resultados da Inspeção de Segurança Regular anterior; f) Avaliação das condições e dos registros da instrumentação existente; g) Classificação do NPGB (Normal, Atenção, Alerta ou Emergência); h) Assinatura do Responsável Técnico pela elaboração do Relatório; i) Ciente do representante legal do empreendedor.
<p>Volume V Revisão Periódica de Segurança da Barragem</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Resultado de Inspeção de Segurança Especial da barragem e de suas estruturas associadas; 2. Reavaliação do projeto existente com análise conclusiva da estabilidade da barragem, de acordo com critérios de projeto aplicáveis à época da revisão; 3. Atualização das séries e estudos hidrológicos e confrontação desses com a capacidade dos dispositivos de descarga existentes, se pertinente; 4. Reavaliação dos procedimentos de operação, manutenção, testes, instrumentação e monitoramento; 5. Reavaliação do Plano de Ação de Emergência- PAE, quando for o caso; 6. Revisão dos relatórios anteriores das Revisões Periódicas de Segurança de Barragem; 7. Considerações sobre eventual reavaliação da classificação quanto à Categoria de Risco e quanto ao Dano Potencial Associado; 8. Conclusões sobre a segurança da barragem; 9. Recomendações de melhorias a implementar para reforço da segurança da barragem; 10. Estimativa preliminar dos custos e prazos para implantação das recomendações; 11. Resumo Executivo, contendo: <ul style="list-style-type: none"> a) Identificação da barragem e empreendedor; b) Identificação do Responsável Técnico pela Revisão Periódica; c) Período de realização do trabalho; d) Listagem dos estudos realizados; e) Conclusões; f) Recomendações; g) Plano de ação de melhorias e cronograma de implantação das ações indicadas no trabalho.
<p>Volume VI Plano de Ação de Emergência</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apresentação e objetivo do PAE; 2. Identificação e contatos do Empreendedor, do Coordenador do PAE e das entidades constantes do Fluxograma de Notificação; 3. Descrição geral da barragem e estruturas associadas, incluindo acessos à barragem e características hidrológicas, geológicas e sísmicas; 4. Recursos materiais e logísticos na barragem; 5. Classificação das situações de emergência em potencial conforme Nível de Resposta; 6. Procedimentos de notificação (incluindo o Fluxograma de Notificação) e Sistema de Alerta;

VOLUMES	CONTEÚDO MÍNIMO
	7. Responsabilidades no PAE (empreendedor, Coordenador do PAE, equipe técnica e Defesa Civil); 8. Síntese do estudo de inundação com os respectivos mapas, indicação da ZAS e pontos vulneráveis potencialmente afetados; 9. Plano de Treinamento do PAE; 10. Meios e recursos disponíveis para serem utilizados em situações de emergência em potencial; 11. Formulários de declaração de início da emergência, de declaração de encerramento da emergência e de mensagem de notificação; 12. Relação das entidades públicas e privadas que receberam cópia do PAE com os respectivos protocolos de recebimento.

Fonte: Adaptado de Resolução nº 236 da ANA (2017).

Conforme Balbi (2008), as barragens apresentam uma grande capacidade potencial de causar danos sérios ao vale a jusante, devido ao grande volume de água ou rejeitos concentrados em seus reservatórios. Só no século XX foram registrados cerca de 200 acidentes graves com barragens no mundo, que causaram a morte de mais de 8.000 pessoas e deixaram outros milhares desabrigadas.

Incidentes e rupturas de consequências trágicas, ocorridos na Europa e nos Estados Unidos entre as décadas de 1950 e 70 (Malpasset, França, 1959; Vajont, Itália, 1963; Baldwin Hills e Teton, Estados Unidos, 1951 e 1976), tiveram grande importância para o desenvolvimento das políticas de segurança de barragens e de vales e dos estudos de ruptura e propagação em seus respectivos países, possibilitando um controle mais rigoroso do comportamento das barragens.

A Engenharia de monitoramento e observação de obras hidráulicas desenvolveu-se bastante nas últimas décadas, produzindo um importante avanço tecnológico, influenciando nos critérios de projeto, construção e exploração. Até os anos 50, existiam no mundo poucas regulamentações relativas à segurança de barragens e dos vales a jusante.

Nesse período, alguns acidentes na Europa e nos Estados Unidos deram origem a um controle do comportamento dessas estruturas com base em instrumentos legais. Até aquele momento, o campo da segurança de barragens considerava apenas a segurança das próprias estruturas, sem incluir a hipótese de um provável cenário de acidente, como uma ruptura do barramento. O vale a jusante era considerado imperturbável.

A partir de então, entrou-se no que Almeida (1999) chama de segunda e terceira fases na evolução dos regulamentos de segurança de barragens, quando se começou a conside-

rar a segurança do vale a jusante, seus riscos potenciais de inundação, estudo de perdas econômicas e de vidas humanas. A gestão de riscos e emergências passou a ser considerada, motivando a elaboração de Planos de Ações Emergenciais (PAE).

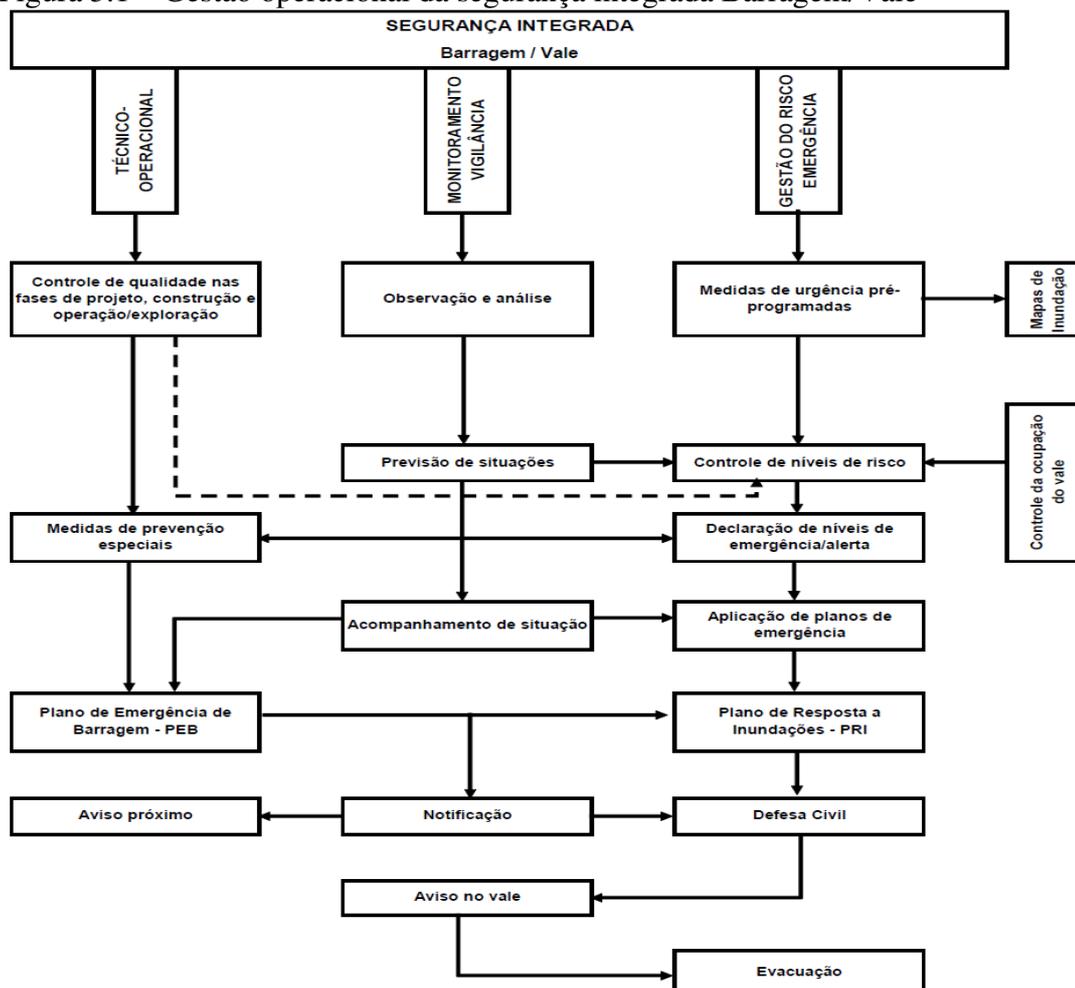
Durante as décadas de 70 e 80, nos Estados Unidos, agências federais, como o Bureau of Reclamation (USBR), produziram um elevado número de recomendações e procedimentos técnicos aplicáveis às barragens, destacando-se os critérios para fixação das cheias de projeto tendo em conta os efeitos no vale a jusante e os planos de emergências e de evacuação. Na Europa, a França e a Espanha apresentaram suas primeiras regulamentações referentes à segurança de barragens em 1966 e 1967, respectivamente, mas foi a década de 90 a mais marcante no desenvolvimento desses documentos.

Nesse período, vários países europeus promulgaram ou iniciaram estudos de novas regulamentações ou normas técnicas de segurança considerando as consequências nos vales a jusante e a elaboração de planos de emergência e de sistemas de alerta às populações. Foi o caso de Portugal, em 1990, Suécia, Finlândia e Noruega, em 1997, e a própria França e a Espanha, com a revisão de seus regulamentos, em 1994 e 1996, respectivamente.

Como não existe risco zero, é necessário gerenciá-lo por meio de ações orientadas a mantê-lo em níveis socialmente aceitáveis. Essa gestão é tratada de forma distinta em cada país, ou melhor, em cada grupo de pessoas. As soluções são muito específicas e dependem da forma como as autoridades e as populações percebem os riscos e dos recursos disponíveis para se prepararem (estruturas de previsão de desastres, de defesa civil ou recursos financeiros).

Essas estratégias influenciam diretamente o grau de vulnerabilidade do vale. Os procedimentos para o gerenciamento do risco e as respostas a situações de emergência geralmente são materializados em documentos chamados Planos de Ações Emergenciais ou Planos de Atendimento a Emergências (PAE), conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Gestão operacional da segurança integrada Barragem/Vale



Fonte: Adaptado de Almeida (2001).

Segundo Martins (2000), a possibilidade de proteger vidas humanas em caso de uma ruptura de barragem depende de três fatores: o tipo da barragem (terra ou concreto), a distância entre ela e as áreas habitadas e a existência de sistemas de alerta. Uma sociedade que deseja um sistema de alerta civil eficiente tem no PAE uma ferramenta essencial, na qual são identificados e compilados em documento único os procedimentos e ações que devem ser tomados para mitigar riscos e responder com eficácia às emergências resultantes de desastres que possam ameaçar a segurança das populações.

O sucesso dos PAEs em certos países se deve ao fato de estarem acostumados a lidar com ameaças frequentes de algum tipo de fenômeno natural (climáticos, terremotos, vulcões) ou de guerras e terrorismo, e ao seu grau de desenvolvimento econômico e cultural.

Segundo o guia da Organização das Nações Unidas (United Nations) para redução de perdas devido a inundações (UNITED NATIONS, 2002), as inundações, dentre todos os

desastres naturais do mundo, têm o maior potencial de causar danos. Elas lideram todos os desastres no número de pessoas afetadas e nas perdas econômicas resultantes, com números que chegam a taxas alarmantes.

Após o estudo da ruptura da barragem, com a determinação dos níveis de inundação e dos tempos para o caminhamento da onda gerada pela ruptura da barragem, deverá ser elaborado um Plano de Ações Emergenciais (PAE), a menos que as consequências da ruptura sejam baixas. Deverá ser dada a maior divulgação possível deste PAE para os órgãos e instituições que dele devem tomar conhecimento, principalmente as prefeituras das cidades que poderão ser atingidas. Este plano deverá ser implementado e testado.

O PAE deverá ser regularmente atualizado, em termos das instituições e pessoas que deverão avisar ou ser avisadas, no caso de uma emergência com a estrutura da barragem. Esta etapa é de responsabilidade da operadora da obra, e deverá ser realizada continuamente.

Revisões dos cálculos e do PAE deverão ser realizadas periodicamente, com o intuito de aprimorar os cálculos desenvolvidos até aquele instante, introduzindo nos cálculos as novas construções, as novas normas de projeto e de zoneamento, alterações institucionais, e outras informações consideradas relevantes para a proteção das populações ribeirinhas, bem como de sua economia (Eletrobrás, 2003; CBDB, 1999).

Nos Estados Unidos, a Agência Federal de Gestão de Emergências (FEMA – Federal Emergency Management Agency), em seu guia técnico relativo ao planejamento de emergências para proprietários de barragens (FEMA, 1998), se preocupa em definir as responsabilidades dos envolvidos em cada ambiente. Assim, o PAE, que é tratado no guia, é de responsabilidade do proprietário da barragem e trata das ações que devem ser tomadas por ele na gestão de emergência. O Estado ou as autoridades locais de gestão de emergências deverão dispor de algum tipo de plano para a comunidade potencialmente atingida, seja um Plano Local de Operações Emergenciais ou um Plano de Alerta e Evacuação.

A Diretriz Básica de Planejamento de Proteção de Civil ante Risco de Inundações Espanhola (ESPANHA, 1995) considera dois níveis de planejamento: Estatal e de Comunidades Autônomas (integrados aos Planos de Ações de Âmbito Municipal). Fazem parte desta estrutura geral os Planos de Emergência de Barragens (PEPs – Planes de Emergência de Presas) elaborados pelos proprietários das mesmas.

Esses planos são integrados aos correspondentes Planos de Comunidades Autônomas e, em caso de emergência de interesse nacional, ao Plano Estatal. O planejamento de emergências ante o risco de ruptura de barragens se fundamenta (i) na elaboração dos PEPs; (ii) na previsão das atividades de proteção de pessoas e bens, a serem tratados nos Planos Estatais, nos

Planos das Comunidades Autônomas e nos Planos Ações Municipais; e (iii) no estabelecimento de sistemas de notificação de incidentes e de alerta e alarme que permitam à população e às organizações envolvidas intervir em tempo real.

No Canadá, a BCHydro também trabalha com dois planos distintos. Um mais simples, contendo apenas as informações realmente importantes para que os órgãos de resposta elaborem seus próprios planos, é entregue para as entidades ligadas aos serviços de emergência dos municípios, e outro, mais detalhado, contendo os estudos de ruptura e propagação, fica na empresa com toda a memória de cálculo (FUSARO, 2004).

No que diz respeito ao plano de emergência associado ao risco de habitar em vales a jusante de barragens, verifica-se que a elaboração de um único plano de emergência, envolvendo a barragem e a respetiva zona do vale a jusante, não se afigura como a solução mais adequada. Na verdade, existem razões de ordem prática que evidenciam vantagens inequívocas no desenvolvimento de dois planos de emergência, distintos, mas complementares Viseu (2006):

- O PEI, cujo desenvolvimento é da responsabilidade do Dono da Obra, está centrado no controlo da segurança da barragem;
- O PEE, cujo desenvolvimento é da responsabilidade do Sistema de Proteção civil, está centrado no controlo do risco no vale a jusante.

O Bureau of Reclamation dos Estados Unidos (USBR) trabalha, para suas barragens, com o conceito de “Early Warning System”, ou Sistema de Alerta Antecipado, e o define como consistindo de cinco fases (USBR, 1995):

Sob responsabilidade do operador e do proprietário estão: (a) a Detecção; (b) a Tomada de Decisão; e (c) a Notificação. Sob responsabilidade das autoridades de proteção da população estão os processos de (a) Alerta e Alarme; e (b) Evacuação.

Estas ações de planeamento de emergência correspondem, na verdade, às diferentes fases que caracterizam o PEI e o PEE. Assim, afigura-se que o PEI deve dar resposta às três primeiras fases da “detecção”, da “tomada de decisão” e da “notificação”, às quais se seguem as outras duas, de “aviso” e de “evacuação” da população, que deverão ser essencialmente consideradas como pertencentes ao campo de ação do PEE (Viseu, 2006).

5.2.1. *Plano de Emergência Interno (PEI)*

Em Portugal, o Plano de Emergência da Barragem, chamado de Plano de Emergência Interno (PEI), deve ser elaborado pelos responsáveis pela operação da barragem, técnicos em diversas especialidades. É um documento onde o conjunto de situações desencadeadas por potenciais eventos anômalos perigosos para a barragem em risco deverá estar caracterizado e as ações de resposta para evitar ou minimizar os efeitos de um acidente deverão estar fixadas. O objetivo final do plano é notificar todos os envolvidos no processo e orientar na execução das ações que devem ser tomadas imediatamente após o evento.

5.2.1.1. *Detecção: Sistema de Identificação das Ocorrências Excepcionais e das Circunstâncias Anômalas*

O tipo mais comum de ocorrências excepcionais e de circunstâncias anômalas a considerar no PEI engloba as ocorrências excepcionais naturais exteriores à barragem, nomeadamente as seguintes:

- cheias naturais provocadas por precipitações intensas;
- cheias induzidas por ruptura de barragem a montante;
- cheias induzidas por deslizamentos de encostas na albufeira;
- sismos, e
- as ocorrências excepcionais externas provocadas associadas a ações criminosas (sabotagem, ameaça de bomba ou ato de guerrilha).

As ocorrências excepcionais listadas anteriormente (associadas a eventos externos) podem dar origem a deteriorações. Estas últimas podem ainda ficar a dever-se a circunstâncias anômalas, associadas a eventos internos (valores excessivos de assentamentos do corpo da barragem, fraca resistência mecânica ou hidráulica da fundação, por exemplo).

As deteriorações ocorrem não só no corpo da barragem e na sua fundação, como ainda nos órgãos de segurança e seu equipamento de operação (bem como nos sistemas de alerta e de aviso e nos equipamentos associados ao sistema de observação da barragem e de monitorização de cheias e sismos), pelo que devem estar, adicionalmente, catalogadas a nível do PEI as seguintes situações:

- falha de órgãos de segurança ou de equipamento de operação;

- falha dos sistemas de alerta e de aviso ou dos equipamentos de medição e aquisição (associados aos sistemas de observação da barragem e de monitorização de eventos hidrológicos e sísmicos); e
- anomalias relacionadas com o comportamento estrutural.

5.2.1.2. *Tomada de Decisão*

O objetivo principal do Plano de Ação é o de pré-definir medidas e ações com vista a que o Diretor do PEI possa, não só controlar o incidente ou acidente (estabelecendo medidas de intervenção preventivas e corretivas, por forma a garantir que a barragem volte a ter um nível de segurança adequado), como, também, minimizar os efeitos do acidente no vale a jusante (implementando ações de resposta).

Assim, uma vez classificado o nível de alerta associado à ocorrência excepcional ou à circunstância anómala, deve o Diretor do PEI:

- implementar ações de resposta à emergência correspondentes ao nível de alerta escolhido;
- implementar medidas de intervenção preventivas e corretivas correspondentes ao tipo de ocorrência excepcional ou de circunstância anómala.

As principais ações de resposta a desencadear pelo Diretor do PEI são: monitorar a situação, classificar o nível de alerta, registar no livro técnico toda a situação, alertar e, quando previsto, avisar. Para além destas ações é necessário implementar medidas de intervenção preventivas (essencialmente medidas operativas) ou corretivas (essencialmente obras de estabilização e reforço) para controlar a situação alarmante, que estão tradicionalmente associadas ao controlo da segurança da barragem.

As medidas de intervenção preventivas são essencialmente medidas operativas, e constam de:

- baixar o nível de água na albufeira da barragem em risco, condicionar a sua exploração ou mesmo esvaziá-la ;
- solicitar às barragens a montante (quando existem) que retenham o máximo de água possível e reduzam as suas descargas;
- solicitar às barragens a jusante (quando existem) que descarreguem o máximo de água possível, para aumentar o respetivo volume de encaixe.

As medidas de intervenção corretivas são essencialmente materializadas por obras de estabilização e de reforço do corpo ou da fundação da barragem. Também fazem igualmente parte deste tipo de intervenções as obras de drenagem e de limpeza da albufeira e das linhas de água a jusante assim como a reparação e substituição dos órgãos hidromecânicos.

Na Tabela 5.16, é ilustrada a caracterização genérica das situações que acionem os diversos níveis de alerta relacionada com probabilidade de acidente, situação de exploração de diferentes níveis.

Tabela 5.16 – Caracterização genérica de cenários que acionam os diversos níveis de alerta

Nível de Alerta	Situação
AZUL	Probabilidade de acidente desprezível Situação controlável – controle da segurança – aviso de descarga às populações na Zona de Auto Salvamento (ZAS) Incidentes que não afetam a segurança (só a funcionalidade); anomalias no sistema de monitoramento Cheias ou descargas controláveis; sismos que originam acelerações muito baixas no local da barragem Situação normal de exploração Responsabilidade: Proprietário da barragem
AMARELO	Probabilidade de acidente baixa Situação controlável – controle de segurança – alerta da Defesa Civil e aviso de descarga às populações da ZAS Incidentes que podem vir a afetar a segurança / acidentes Cheias ou descargas controláveis que implicam cuidados a jusante, mas não provocam grandes inundações em centros populacionais; sismos que originam acelerações baixas no local da barragem Eventual interrupção da operação Responsabilidade: Proprietário da barragem
LARANJA	Probabilidade de acidente elevada Situação que pode ser incontrollável – alerta da Defesa Civil e aviso de prontidão às populações na ZAS Acidentes que põem em risco a segurança Cheias ou descargas que provocam grandes inundações em centros populacionais; sismos que originam acelerações moderadas no local da barragem Interrupção da operação Responsabilidade: a ser definida pelas autoridades governamentais e proprietário da barragem

Nível de Alerta	Situação
VERMELHO	<p style="text-align: center;">Acidente inevitável - catástrofe iminente</p> <p style="text-align: center;">Situação incontrolável – alerta da Defesa Civil e aviso de evacuação às populações na ZAS</p> <p style="text-align: center;">Acidentes graves. Catástrofe</p> <p style="text-align: center;">Cheias que envolvem o galgamento da barragem; vazões extremamente elevadas devido à ruptura da barragem ou de taludes no reservatório que provocam grandes inundações em centros populacionais; sismos que originam acelerações elevadas no local da barragem</p> <p style="text-align: center;">Interrupção da operação</p> <p style="text-align: center;">Responsabilidade: a ser definida pelas autoridades governamentais e proprietário da barragem</p>

Fonte: Viseu *et al.* (2003).

5.2.1.3. Notificação

O objetivo dos sistemas de alerta e de aviso é o de assegurar a notificação dos principais intervenientes nas ações de emergência e, revelando-se necessário, o aviso à população, sendo conveniente distinguir o sistema de alerta do sistema de aviso.

Numa situação de incidente ou acidente, o sistema de alerta, a nível do PEI, é estabelecido entre os agentes responsáveis pela segurança da barragem (nível interno de alerta) ou entre estes e o Sistema de Proteção Civil, responsável pela segurança do vale a jusante (restantes níveis de alerta).

Faz-se notar que a nível do PEE existe um outro sistema de alerta. Com efeito, o alerta deve partir do Diretor PEI para o Sistema de Proteção Civil. É a este último que cumpre a obrigação de notificar os agentes de proteção civil (incluindo polícia, bombeiros, serviços médicos etc.), utilizando os respectivos meios de alerta, definidos no âmbito do PEE.

No âmbito do projeto NATO-FLOODRISK (LNEC, 1997), nomeadamente no capítulo de Gestão de risco e emergência a jusante de barragem, em consonância com RSB, Artº 32, apresentou sugestão sobre Estrutura e Constituição do PAE, que a seguir são descritas.

Estrutura e Constituição do PEI

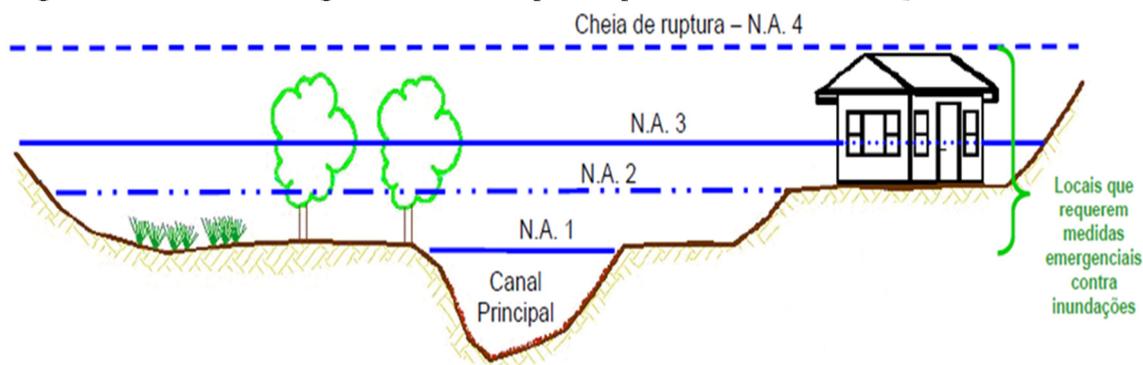
- Introdução;
- Responsabilidade e Autoridade;
- Desenvolvimento da Ação;
- Sistema de comunicação;
- Ações mitigadoras e de segurança;
- Organização interna;

- Informação à comunicação e ao público;
- Relatório de Acidente e Incidente;
- Formação, Treinos, Atualização e Revisão; e
- Documento dos cenários potenciais de risco hidrodinâmico.

5.2.2. Plano de Emergência Externo (PEE)

O Plano de Emergência Externo (PEE) está centrado na gestão da emergência no vale a jusante e seu desenvolvimento deve ser responsabilidade das autoridades de Defesa Civil. É um documento onde se identificam as ações que devem ser tomadas, a partir dos indicadores de ameaças e da notificação advinda do PEB ou PEI, para assegurar a segurança no vale a jusante, tendo em vista uma rápida e adequada intervenção das autoridades e da população potencialmente afetada, no caso da ocorrência de uma inundação, como ilustrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Níveis de água de interesse para o planejamento da Proteção Civil



Fonte: Adaptado de Balbi (2008).

Na Figura 6.2 o N.A. 1 (Nível de Água), não causa perigo. O N.A.2, representa o nível d'água que geralmente inunda a planície principal do rio, a qual, muitas vezes, é tomada pela ocupação humana, seja com construções fixas ou áreas de lazer. O N.A.3, corresponde ao nível das cheias naturais de maior porte, como as com grandes tempos de retorno, ou as Cheias Máximas Prováveis (CMP), que pode atingir as construções. O N.A. 4 representa uma cheia de ruptura cuja grande profundidade atingida é apenas uma de suas características principais.

5.2.2.1. *Aviso*

O sistema de aviso é estabelecido para notificar a população no vale a jusante. O aviso à população é uma atribuição do Sistema de Proteção Civil. Contudo, dada a rapidez de propagação da cheia induzida, pode revelar-se conveniente, em alguns vales a jusante, que seja o Diretor do PEI a fazer o aviso à população na ZAS. Os meios de aviso mais diretos são (Viseu, 2006):

- alarmes domésticos, recorrendo a contatos diretos através dos telefones fixos e telemóveis (nos casos mais evoluídos, o uso de telefones pode ser materializado através de chamadas automáticas controladas por um sistema interligado com o sistema de vigilância da barragem);
- alarmes públicos através de sinais sonoros (sirenes fixas e megafones em viaturas móveis);
- os meios de comunicação social (mensagens ao público através de boletins de rádio e televisão);
- publicação e afixação de comunicados de aviso;
- aviso “porta a porta”.

Assim, na zona de autossalvamento (ZAS), o tempo disponível para os agentes de proteção civil atuarem é escasso, sendo a implementação dos meios de aviso à população uma responsabilidade do Dono da Obra que pode optar pela automatização total dos sistemas de aviso (por sirenes, por exemplo).

Na zona de intervenção principal (ZIP), o tempo de aviso tem dimensão suficiente para permitir a atuação dos agentes de proteção civil que podem fazer uso dos seus recursos para o aviso (carros equipados com megafones, por exemplo); a evacuação da população em risco é nesta zona uma prioridade destes agentes.

Na zona de intervenção secundária (ZIS), o tempo de aviso e a distância são de molde a oferecer aos agentes de proteção civil, opções múltiplas (nomeadamente, os recursos aos meios de comunicação social para efetuar o aviso às populações); a evacuação da população em risco pode ainda ser necessária, mas numa prioridade inferior à da ZIP.

5.2.2.2. *Evacuação*

A peça-chave do plano de evacuação é o mapa de inundação onde os limites da área de risco definem um perímetro delineado, segundo a terminologia da Proteção Civil, pela Linha de Proteção e Segurança (LPS), a qual deve estar devidamente assinalada no terreno. De acordo

com Santos e Gamboa (2003), é no mapa de inundação que se deve adicionalmente esboçar o plano de evacuação do PEE com a indicação clara das zonas e corredores de evacuação. Almeida (1999) apresenta a seguinte sugestão para elaboração do PEE:

Estrutura e Constituição do PEE

Introdução;

Caracterização dos riscos;

Atuação em fase de emergência: execução do plano, âmbito de atuação pelo responsável de PEE; organismo de apoio e intervenção e missão dos agentes a definir pelo SNPC;

Situação normal (nível 0): sistema de acompanhamento de cheias; definição de nível de alerta e emergência e testes do plano;

Situações de alerta e de emergência (níveis 1,2, ou 3): fase de mobilização, alerta do sistema de proteção civil, Medidas específicas de atuação no âmbito do Sistema de Proteção Civil e Aviso às populações;

Fase de emergência mais elevada: Plano de evacuação de populações tendo em conta os cenários potenciais de risco hidrodinâmico;

Fase pós-emergência: ações de apoio e reabilitação, análise da eficácia do plano e proposta de eventuais melhorias no mesmo;

Definição de responsabilidades operacionais e institucionais na execução do plano e na interação com outras entidades;

Coordenação das ações (instruções específicas);

Administração e Logística;

Sistema de Comunicações (descrição, localização, testes de fiabilidade e manutenção);

Informação pública (coordenação, responsabilidade e interface, conteúdo das informações, seleção de meios, preparação das mensagens em situação de risco, divulgação das medidas de alerta e evacuação);

Anexos Técnicos (anexos específicos para barragem, vale ou bacia hidrográfica).

5.2.3. Estimativa de impacto no vale a jusante

A avaliação da situação do vale a jusante das barragens em estudo, onde se pretende apresentar uma proposta de plano de emergência, permite caracterizar a ocupação do solo no vale a jusante da barragem, identificando recursos e vulnerabilidades. Esse estudo permite definir as zonas que deverão ser priorizadas no desenvolvimento e implementação de planos de

emergência, sistemas de aviso à população e a sua preparação tendo em vista as ações da proteção civil, autossalvamento e outras autoridades com responsabilidade na gestão emergencial no vale.

Os agentes da defesa civil devem se informar da situação existente no município como, estrutura, organização, preparo da comunidade, treinamentos, ações anteriores e os problemas ou dificuldades que existem para lidar com emergências. Devem ser levantados todos os desastres e emergências que poderão acontecer, para os quais as comunidades e municípios deverão estar preparados.

As metodologias referentes a este item, os danos a jusante, são agrupados em duas situações, sendo primeira que tem a ver com perdas de vidas humanas e segunda que tem a ver com perdas de bens materiais, dependendo de vários fatores.

Graham (1997) apresenta as seguintes conclusões gerais retiradas da análise destes acidentes:

- Influência da altura das barragens

- a ruptura de barragens com altura inferior a 6 m provocou 2% das vítimas;
- a ruptura de barragens com altura entre 6 m e 15 m provocou 86% das vítimas.

- Influência da localização das pessoas no vale a jusante

- 50% das vítimas mortais estavam localizadas a distâncias inferiores a 4 800 m da barragem acidentada;
- 99% das vítimas mortais estavam localizadas a distâncias inferiores a 24 km da barragem acidentada (informação baseada em 16 dos 23 acidentes que provocaram 87% do número total de vítimas reportado por Graham).

- Risco estatístico

- média de vítimas mortais por ano resultantes de acidentes em barragens dos EUA: nove; ou seja, para 23 700 barragens existentes nesse país em 1997, 0,00038 (ou $3,8 \times 10^{-4}$) vidas/ano/barragem.

Relativamente à metodologia de estimativa de número de pessoas em risco (NPR), Graham (1997) estabeleceu a diferença entre NPR com aviso e NPR sem aviso.

- Percentagem do número real de vítimas mortais relativa a NPR (sem tempo de aviso)

- Em barragens de aterro o colapso por erosão interna resultou em valores da ordem de 1 a 2% (para NPR > 50 habitantes).
- Em acidentes provocados por galgamento os valores obtidos são da ordem de 15 a 25%.
- Em alguns casos específicos o valor da NPR era bastante elevado mas o número de vítimas foi muito reduzido (1 a 5 vítimas).

- Possível efeito do tempo de aviso no valor da percentagem

- Ruptura da barragem de Baldwin Hills (1963), por erosão interna; tempo de aviso: 1 h e 18 min; a relação foi de 5/16 500 ou seja 0,03%.
- Ruptura da barragem de Teton (1976), por erosão interna; tempo de aviso: 1 h e 15 min; a relação foi de 11/25 000 ou seja 0,04% (sendo 5 das 11 vítimas motivadas por causas colaterais e não pelo efeito da inundação).
- Colapso de uma barragem em Delta (Utah) em 1983, por colapso estrutural; tempo de aviso: superior a 1 h; a relação foi de 1/500 ou seja 0,2%.

Concluindo, o tempo de aviso às populações é um dos fatores mais relevantes a ter em conta no cálculo do número estimado de vítimas resultantes da ruptura de uma barragem; o outro fator é obviamente a causa do acidente.

As perdas de bens materiais resultam, em geral, da destruição de edifícios, do corte de vias de comunicação, da danificação ou destruição de outras infraestruturas estratégicas e dos prejuízos decorrentes da interrupção de atividades económicas ou sociais no vale.

A maioria dos custos decorrentes da cheia depende dos fatores de agressividade da cheia (caracterizados na carta de risco hidrodinâmico) e das características específicas das infraestruturas e das atividades económicas instaladas em cada vale. As variáveis base do modelo caracterizam, para cada quadrícula:

Zonas agrícolas (tipo e número de áreas da cultura, de cabeças de gado, de máquinas e alfaias agrícolas e de prédios rústicos);

Zonas florestais (tipo de área florestal e prédios rústicos);

Zonas residenciais (número de casos térreos, de um andar ou de mais andares, edifícios que podem agrupar um conjunto grande de pessoas);

Zonas industriais (tipo de fábricas);

Zonas comerciais (tipo de empresas);

Zonas de infraestruturas (estradas, redes de eletricidade, caminhos de ferro, escolas, hospitais, zonas públicas);

Zonas especiais (depósitos de produtos tóxicos, inflamáveis, entre outros).

Viseu (2006) alerta que as características do vale a jusante (por exemplo o uso do solo) evoluem com o tempo, surgem novas deteriorações nas barragens, as técnicas de simulação de cheias induzidas evoluem, novas exigências legislativas obrigam à adopção diferentes critérios de segurança e, finalmente, a sociedade pode tornar-se mais exigente no que diz respeito à apreciação do risco. Assim, torna-se necessário proceder ciclicamente à revisão da avaliação do risco nos vales a jusante das barragens.

A Tabela 5.17 ilustra as principais características do vale a jusante das barragens em estudo.

Tabela 5.17 – Características do vale a jusante das barragens

Barragem/ Vale	Município	Edificações Estimadas	Custo Estimado (ECV)	Pop. urbana	Pop. rural
Faveta/ Ri- beira de Pi- cos	Santa Cruz	1 Ponte	3,000,000.00	400	1100
		2 estradas	2,500,000.00		
		500ha regadio	50,000,000.00		
		1 escola	2,500,000.00		
		5 diques	7,500,000.00		
		50 casas	75,000,000.00		
		1 campo futebol	5,940,000.00		
		8 furos	32,000,000.00		
		5 poços	5,000,000.00		
F. Gorda/ Santa Cruz	Santa Cruz	2 estradas	2,500,000.00	300	80
		50 casas	75,000,000.00		
		2 furos	8,000,000.00		
		1 pontão	3,000,000.00		
		200 ha regadio	20,000,000.00		
		1 infraestr. agrícola	4,000,000.00		
		2 poços	2,000,000.00		
Flamengos	São Miguel	1 ponte	50,000,000.00	300	150
		2 estradas	2,500,000.00		
		1 campo futebol	5,000,000.00		
		1 jardim de infância	2,500,000.00		
		1 escola	4,500,000.00		
		1 delegação municipal	2,500,000.00		
		50 casas	75,000,000.00		
		4 furos	16,000,000.00		
		3 diques	4,500,000.00		
		4 poços	4,000,000.00		
		200ha de regadio	20,000,000.00		
Poilão/ Ri- beira Seca	Santa Cruz	2 estradas	2,500,000.00	360	600
		60 casas	90,000,000.00		
		1 unidade gestão	5,000,000.00		
		1 delegação do MAA	15,000,000.00		
		1 complexo de lazer	8,000,000.00		
		7 furos	28,000,000.00		
		10 poços	10,000,000.00		

Barragem/ Vale	Município	Edificações Estimadas	Custo Estimado (ECV)	Pop. urbana	Pop. rural
		500 há de regadio	50,000,000.00		
Sali- neiro/Rib.G. Santiago	Rib. G. Santi- ago	1 centro formação profis- sional 1 monumento histórico Câmara Municipal	18,000,000.00	500	80
		2 estradas	2,500,000.00		
		3 diques	4,500,000.00		
		3 poços	3,000,000.00		
		2 pousadas	40,000,000.00		
		1 igreja	25,000,000.00		
		70 casas	105,000,000.00		
		1 banco	15,000,000.00		
		4 restaurantes	25,000,000.00		
		1 fabrica de aguardente	50,000,000.00		
Saqui- nho/Charco	Santa Catarina	50 há de regadio	5,000,000.00	360	600
		5 poços	5,000,000.00		
		9 reservatórios	9,000,000.00		
		4 furos	16,000,000.00		
		5 diques	7,500,000.00		
		Levada	500,000.00		
		1 pousada	8,000,000.00		
		1 estrada	1,500,000.00		
		Sub total	1,048,440,000.00	1890	2095
		Custo estimado de barragens	2,400,000,000.00		
		Total geral em Escudos Caboverdeanos	3,448,440,000.00	ECV	
		Total geral em Euros	31,349,454.55	EUROS	

Fonte: elaborada pelo autor.

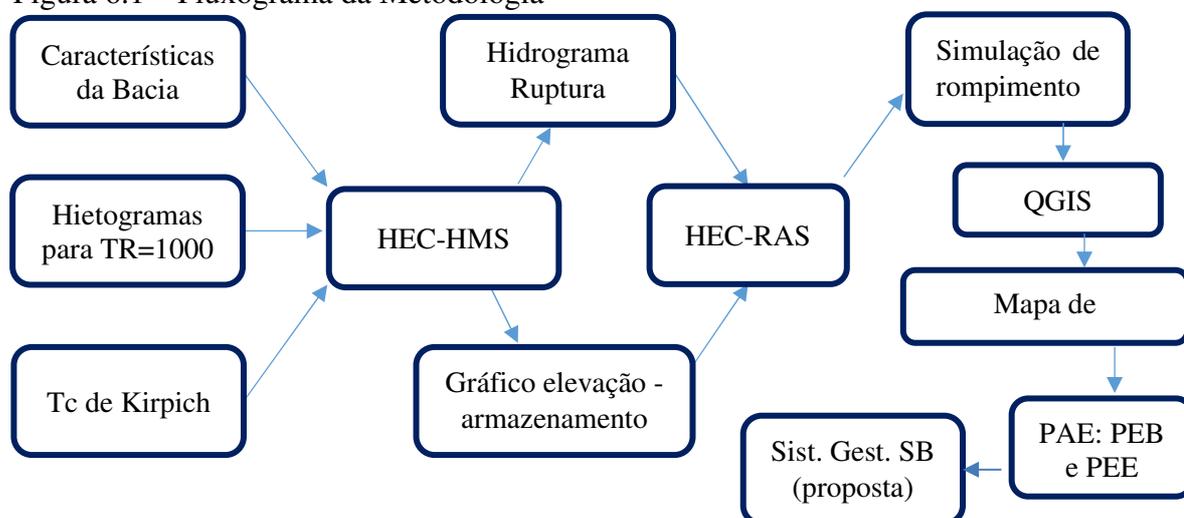
6. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho organiza-se de acordo com os seguintes pontos:

1. Revisão da legislação sobre Gestão de Segurança, Riscos e Atendimentos das Emergências de Barragens;
2. Seleção das barragens apresentadas no capítulo 8 e seus respectivos projetos, características da bacia hidrográfica e realizar uma modelagem hidrológica com recurso ao programa HEC-HMS;
3. Realizar uma modelagem hidráulica com recurso a software HEC-RAS para simulação de rompimento de ruptura das barragens em estudo e planeamento de emergências contra inundação provenientes de rupturas no vale a jusante e elaboração de mapas de inundação da área afetada;
4. Apresentar uma metodologia de cálculo de risco e fazer uma comparação relativa à experiência mundial na elaboração de Planos de Ações de Emergências-PAEs e apresentar uma proposta aplicável para Cabo Verde; e
5. Desenvolver um sistema de gestão de segurança de barragem proposta, aplicável em Cabo Verde com base na experiência internacional.

A Figura 6.1 ilustra o fluxograma referente a metodologia utilizada neste trabalho.

Figura 6.1 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: elaborado pelo autor.

6.1. Revisão da legislação sobre Gestão de Segurança, Risco e Emergência de Barragem

Neste item, faz-se uma comparação do que é apresentado na legislação brasileira referente à segurança de barragens e dos vales a jusante com a legislação de outros países. Foram enfatizadas as questões de gerenciamento de risco a jusante e da segurança operacional de barragens.

No trabalho de revisão das legislações foram consideradas essenciais as seguintes questões:

- a classificação do risco quanto às consequências de inundações a jusante;
- critérios para a aplicação da legislação;
- a definição da autoridade fiscalizadora;
- legislação de alguns países de segurança de barragem;
- visão de alguns países com experiência na gestão emergência após ruptura;
 - responsabilidades pela segurança da barragem; e
 - a existência de guias ou regulamentos para a elaboração dos PAEs.

As metodologias, estruturas e conteúdos para elaboração de PAEs são temas e abordagens de regulamentos de segurança de barragens de vários países que a seguir são apresentadas e referenciadas algumas delas, consideradas as mais experientes:

A experiência mundial mostra que os custos necessários à garantia da segurança de uma barragem são pequenos, se comparados com aqueles que se seguem em caso de ruptura. Mostra também que os países que sofreram com acidentes em barragens, sobretudo, Estados Unidos, França, Itália, Reino Unido, Canadá e Brasil recentemente (ANA, 2017), mudaram de rapidamente de planos de segurança de barragem e passaram a implementar e desenvolver os planos de ação de emergências de barragem (PAEs), para mitigar danos nos vales a jusante.

A França é um importante exemplo, considerando que seu Regulamento de Segurança de 1966 (reflexo do acidente de Malpasset) já tornava obrigatória a preparação de planos de alerta e socorro às populações a jusante de barragens, baseados em mapas de inundação (Almeida, 1999). Em 1967, a Espanha apresentou seu primeiro regulamento sobre o tema.

Outro exemplo importante de mudança de sistema de gestão de segurança de barragem é os Estados Unidos, em que as agências federais, nomeadamente o Bureau of Reclama-

tion (USBR) e a Federal Energy Regulatory Commission (FERC) produziram, durante as décadas de 1970 e 80, um elevado número de recomendações e procedimentos técnicos aplicáveis às barragens sob suas respectivas jurisdições.

Essas ações resultaram, principalmente, no “Presidential Memorandum”, de outubro de 1979, e nos “Federal Guidelines for Dam Safety”, de junho de 1979, que surgiram após a ruptura da barragem de Teton, 1976. Esses procedimentos passaram a ser estudados e adotados por agências ligadas à segurança de barragens de diversos países.

A organização Defesa Civil no Brasil teve início em 1942 e atualmente está organizada sob a forma do Sistema Nacional de Defesa Civil – SINDEC, composto por vários órgãos. A Secretaria Nacional de Defesa Civil – SEDEC é o órgão central desse Sistema, responsável por coordenar as ações de defesa civil em todo o território nacional.

Em Portugal, por exemplo, o Regulamento de Segurança de Barragens (PORTUGAL, 1990) foi revisado e sofreu algumas alterações, principalmente no que se refere à proteção civil e ao planejamento de ações emergenciais (PORTUGAL, 2007).

Cabo Verde também, tem alguma experiência na mitigação de situação de emergência, devido a frequentes inundações e existência do vulcão da Ilha do Fogo que já entrou em atividades algumas vezes e o mais recente em 2014. Por isso, em 2012, o Governo aprovou a Lei nº 12/VIII/2012 e revogou a Lei nº 100/V/1999, justamente para dar mais competência ao Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros (SNPCB) para lidar com situações de emergências.

Resumindo, foram priorizados, na revisão bibliográfica, a legislação dos países que já sofreram acidente e incidente de ruptura de barragem e que já implementaram e aplicaram um PAE, apresentando um modelo de plano de gestão de risco e emergência nos vales a jusante de barragem de uma forma mais detalhada e de fácil acesso e compreensão.

6.2. Modelagem hidrológica no HEC-HMS

Os dados que serviram de base à modelagem no HEC-HMS, tais como as características das bacias hidrográficas e tempo de concentração já foram apresentados no capítulo anterior, estudo hidrológica. Os valores de precipitação máxima utilizados para o cálculo da vazão de pico dos hidrogramas foram os mesmos utilizados pelos projetistas.

Uma vez que as barragens foram projetadas para uma cheia milenar, os procedimentos descritos foram realizados apenas para o tempo de retorno de 1.000 anos. As Figuras

de hietogramas retirados das memórias de cálculo das barragens foram apresentadas no capítulo 4, referente à modelagem hidrológica e foram calculadas automaticamente pelo software HEC-HMS, com o programa *Dam Break* inserido no pacote computacional do mesmo software.

Resumindo, para análise hidrológica foi aplicada a metodologia descrita a seguir. No elemento subbasin, foi informado a área da bacia, o método de perda e transformação adotado foi o SCS. O número CN foi adotado igual a 96, para o tipo de solo D e o tempo de concentração é calculado pela Equação de Kirpich.

Para o cálculo da cheia milenar foram utilizados os mesmos dados utilizados pelos projetistas das seis barragens, alterando apenas o tempo de concentração (Norvia/Cenor, 2013). Assim, gerou-se o hidrograma para o tempo de retorno de 1000 anos correspondente aos hietogramas já calculados no projeto original por convolução dos hietogramas com hidrograma unitário sintético do SCS, utilizando o modelo HEC-HMS.

Na modelagem chuva-vazão dos projetos executivos das seis barragens, bem como nas análises do presente trabalho, foi adotado o hidrograma unitário do SCS que é caracterizado pelo tempo de atraso (“lag time”) dado pela Equação (4.1), conforme definido por Woodward (2008).

Para estimar o tempo de concentração das bacias hidrográficas das três barragens de Cabo Verde, foram utilizadas as fórmulas de NERC, de Témez, de Chow/Kirpich, do Soil Conservation Service e de Giandotti, definidas com base nas Equações (4.2) a (4.7) (Silva e Fernandes, 2020).

Com base nos coeficientes de repartição apresentados na Tabela 4.3, calculados a partir da Equação (3.8) multiplicados pela precipitação ponderada durante 24 horas para período de retorno de 1.000 anos, fez-se a distribuição da precipitação para todas amostras.

Assim, a chuva no bloco foi estimada diminuindo-se a chuva total do período, da chuva total do período anterior. A chuva maior localiza-se no bloco central para uma duração D de 12 horas para uma duração total de 24 horas e para uma duração D de 6 horas para uma duração total de 12 horas, nas respectivas barragens, conforme descrito. A chuva seguinte localiza-se no bloco à direita e segue-se alternando os blocos, como descrito no capítulo 4.

6.3. Modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS

O objetivo de se utilizar modelos hidrodinâmicos de propagação de um hidrograma de ruptura é simular o movimento da onda de cheia ao longo do vale a jusante da barragem no intuito de avaliar os impactos produzidos pela onda e o potencial risco associado a este evento.

Morris (2000) define as seguintes informações como resultados essenciais que o modelo deve fornecer para qualquer ponto de interesse dentro da área atingida pela onda de cheia:

- Tempo de chegada da onda de ruptura;
- Nível máximo de água;
- Tempo até que se atinja este nível máximo;
- Profundidade e velocidade da onda de cheia;
- Duração da inundação.

A precisão da resposta fornecida varia de acordo com a opção de modelo escolhido, sendo divididos em modelos simplificados, hidrológicos, hidrodinâmicos unidimensionais (1D), hidrodinâmicos quasi-bidimensionais (quasi-2D), hidrodinâmicos bidimensionais (2D), (Leitão, 2018).

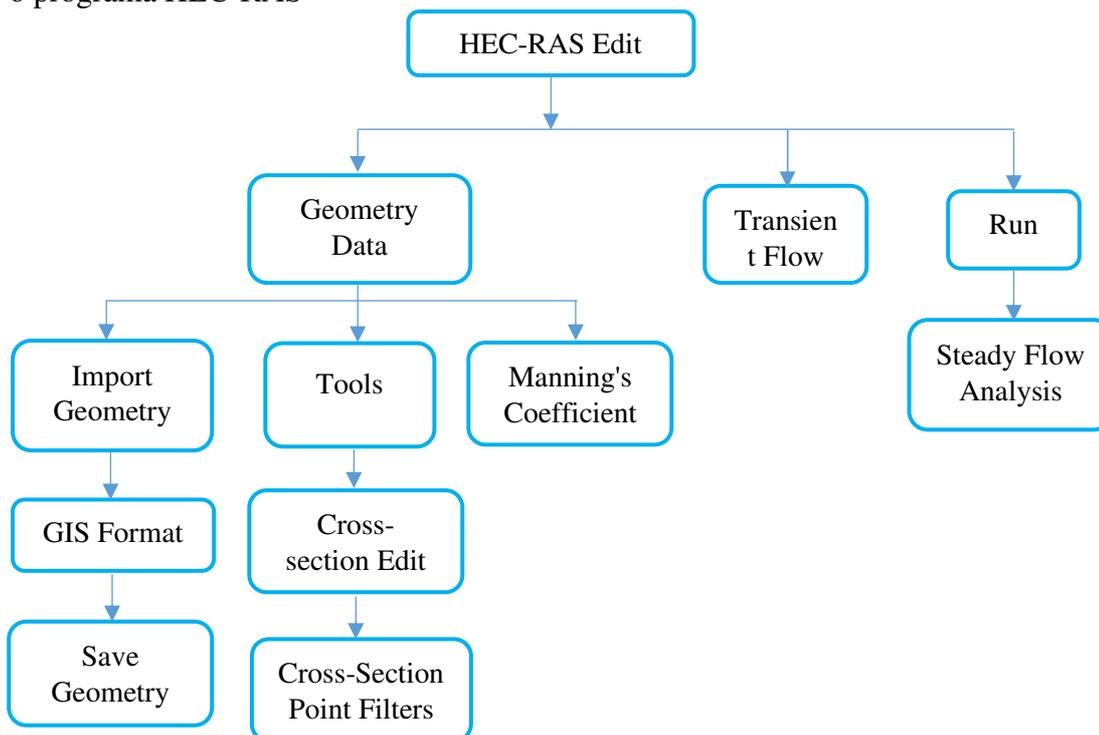
A Figura 6.2 mostra o esquema de criação e execução da simulação da mancha de inundação com o programa HEC-RAS.

A metodologia desenvolvida para análise hidráulica no software HEC-RAS é a seguinte: os dados (altimetria, barragem, bacias hidrográficas, hidrografia etc.), que permitiram a simulação de rompimento das barragens em estudo no modelo 2D no HEC-RAS, foram convertidos em formato padrão, shapefiles (.shp), através do programa QGIS, portanto geoprocessados e baseados em Modelos Digitais do Terreno (MDT), constituindo um modelo topográfico altimétrico resultantes de diversos tipos de informação geográfica tridimensional com especial destaque para dados altimétricos e hidrográficos, representados sobre a forma de estruturas matriciais com diferentes tipos de resolução espacial.

Estas informações resultam principalmente de dados tridimensionais adquiridos por processo de correlação fotogramétrica incluindo valores altimétricos de todos os objetos existentes no terreno.

Com base em tecnologias mais recentes, por exemplo, de varrimento por laser, obtêm-se dados altimétricos relativos a todos os objetos existentes no terreno com elevada resolução altimétrica e integrados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica e georreferenciados.

Figura 6.2 – Esquema para criação e execução de simulação da mancha inundação com o programa HEC-RAS



Fonte: elaborado pelo autor.

6.4. Metodologia para elaboração do PAE

A metodologia para elaboração do PAE/PEB aplicada seguiu o estabelecido no anexo VI da Resolução n  236 de 2017 da ANA da Lei n  12.334.

1. Apresentação e objetivo do PAE/PEB;
2. Identificação e contatos do Empreendedor, do Coordenador do PAE/PEB e das entidades constantes do Fluxograma de Notificação;
3. Descrição geral da barragem e estruturas associadas, incluindo acessos à barragem e características hidrológicas, geológicas e sísmicas;
4. Recursos materiais e logísticos na barragem;

5. Classificação das situações de emergência em potencial conforme Nível de Resposta;
6. Procedimentos de notificação (incluindo o Fluxograma de Notificação) e Sistema de Alerta;
7. Responsabilidades no PAE/PEB (empreendedor, Coordenador do PAE, equipe técnica e Defesa Civil);
8. Síntese do estudo de inundação com os respectivos mapas, indicação da ZAS e pontos vulneráveis potencialmente afetados;
9. Plano de Treinamento do PAE/PEB;
10. Meios e recursos disponíveis para serem utilizados em situações de emergência em potencial;
11. Formulários de declaração de início da emergência, de declaração de encerramento da emergência e de mensagem de notificação; e
12. Relação das entidades públicas e privadas que receberam cópia do PAE com os respectivos protocolos de recebimento.

A metodologia adotada para elaboração do PEE, é a seguinte:

- Introdução;
- Caracterização dos riscos;
- Atuação em fase de emergência: execução do plano, âmbito de atuação pelo responsável de PEE; organismo de apoio e intervenção e missão dos agentes a definir pelo SNPC;
- Situação normal (nível 0): sistema de acompanhamento de cheias; definição de nível de alerta e emergência e testes do plano;
- Situações de alerta e de emergência (níveis 1,2, ou 3): fase de mobilização, alerta do sistema de proteção civil, Medidas específicas de atuação no âmbito do Sistema de Proteção Civil e Aviso às populações;
- Fase de emergência mais elevada: Plano de evacuação de populações tendo em conta os cenários potenciais de risco hidrodinâmico;
- Fase pós-emergência: ações de apoio e reabilitação, análise da eficácia do plano e proposta de eventuais melhorias no mesmo;
- Definição de responsabilidades operacionais e institucionais na execução do plano e na interação com outras entidades;
- Coordenação das ações (instruções específicas);

- Administração e Logística;
- Sistema de Comunicações (descrição, localização, testes de fiabilidade e manutenção);
- Informação pública (coordenação, responsabilidade e interface, conteúdo das informações, seleção de meios, preparação das mensagens em situação de risco, divulgação das medidas de alerta e evacuação); e
- Anexos Técnicos (anexos específicos para barragem, vale ou bacia hidrográfica).

6.5. Sistema de Gestão de Segurança de Barragem

A revisão bibliográfica sobre legislação de segurança de barragem, apresentada no Capítulo 2, serve de apoio para desenvolvimento deste trabalho em termos de comparação de modelo de gestão de segurança de vários países do mundo e não só, mas também de seleção de um modelo mais prático e perfeitamente exequível e adaptável à realidade Caboverdeana.

7. ESTUDO DE CASO: SEIS BARRAGENS EM CABO VERDE

7.1. Localização e Caracterização da área de estudo

A República de Cabo Verde é um arquipélago saheliano, localizado no oceano atlântico, constituído por dez ilhas (das quais nove habitadas) e oito ilhéus, situado a cerca de 500 km a oeste da costa ocidental africana. O arquipélago encontra-se entre o trópico de Câncer e o equador, limitado pelos paralelos 17° 12' 5'' e 14° 48' de latitude norte e os meridianos 22° 44' e 25° 22' de longitude a oeste de Greenwich.

A superfície do arquipélago é de 4.033 km² e a sua Zona Económica Exclusiva (ZEE) estende-se por 734.000 km². As ilhas encontram-se divididas em dois grupos: Barlavento (de onde o vento sopra) (Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal e Boa Vista) e Sotavento (para onde o vento sopra) (Maio, Santiago, Fogo e Brava). Esta divisão deriva da posição das ilhas face aos ventos dominantes do Nordeste.

A altitude máxima é de 2.829 m na ilha do Fogo (pico do vulcão), seguida de 1.979 m na ilha de Santo Antão (Topo da Coroa) e de 1.394m (Pico de Antónia) na ilha de Santiago (ANAS, 2018).

Conforme PAGIRE (2010), Cabo Verde, pela sua localização, é um dos países do Sahel mais afetado pelos efeitos das secas dos anos setenta e que revelaram a sua vulnerabilidade, face à uma pluviometria largamente deficitária e irregular no espaço e no tempo.

Nestes três últimos anos (2017, 2018 e 2019), a precipitação acumulada foi muito baixa e irregular temporalmente, provocando situações de seca que tem causado situações de deficiência e carência hídrica em todo território nacional, com impactos negativos na economia, ambiente, sociedade a nível nacional.

A Figura 7.1 ilustra a média anual de precipitação por ilhas e efeito de altitude, sendo que a Ilha do Fogo (Pico do Vulcão) com maior altitude, 2,829 m, apresenta maior média anual de precipitação.

Figura 7.1 – Média anual de precipitações por Ilhas



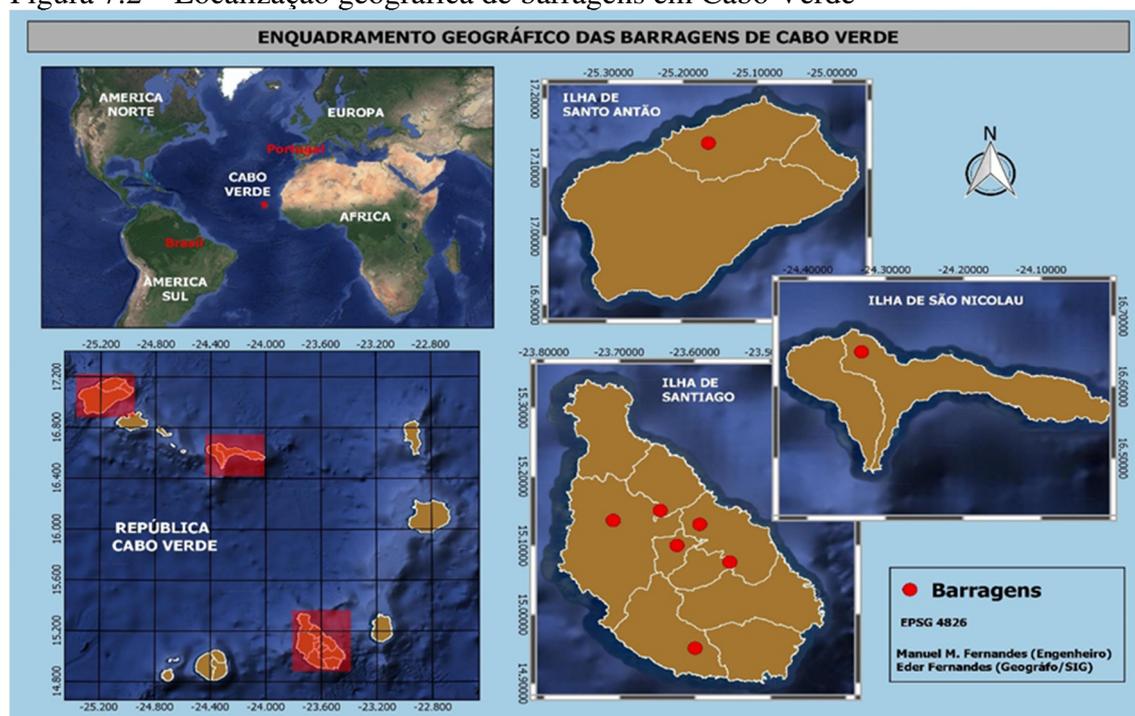
Fonte: Adaptado de INMG (2019).

Há quatro sistemas a determinar o clima na região e no arquipélago: (i) os anticiclones subtropicais dos Açores e de Santa Helena; (ii) as baixas pressões equatoriais; (iii) a Corrente Marítima das Canárias; e (iv) a depressão térmica sobre o continente Africano durante o verão. Estes fatores climáticos provocam uma grande variabilidade espaço-temporal na precipitação, incluindo episódios frequentes de secas e a presença de microclimas.

No decurso dos últimos anos, o clima de Cabo Verde foi caracterizado pelo aumento da aridez. Nota-se, em particular: i) a grande variabilidade das precipitações no espaço e no tempo, com uma tendência genérica pela regressão anual da pluviometria total; ii) a redução do número de dias de ocorrências de chuvas; iii) maiores frequências de chuvas intensas e devastadoras para as culturas e infraestruturas; e iv) a diferença climática entre as vertentes a sotavento e a barlavento, (PAGIRE, 2010).

Até 2019, Cabo Verde tinha nove barragens, sendo sete na Ilha de Santiago, uma na Ilha de Santo Antão e uma na Ilha de São Nicolau, conforme mostra a Figura 7.2.

Figura 7.2 – Localização geográfica de barragens em Cabo Verde



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: Nesta figura não está representada a barragem de Ribeira Principal em Santiago.

As seis barragens em estudo estão localizadas na Ilha de Santiago e todas são barragens de gravidade em alvenaria de pedra argamassada, exceto a de Saquinho que é em concreto arco gravidade. Todas as barragens são para armazenamento de águas superficiais para irrigação, visto que, em Cabo Verde uma das principais atividades econômicas é a agricultura.

Conforme os dados do INE (2010), a Ilha de Santiago é a mais populosa, com mais de metade da população total, e a maior das 10 Ilhas e com a maior área de terrenos agrícolas. A densidade média nesta ilha é de 189 hab./km². A projeção da população para 2020 de 743.317 habitantes.

Em Cabo Verde, não existem cursos de água superficiais permanentes. As características climáticas e geomorfológicas determinam que a maior parte dos vales sejam percorridos por cursos de água temporários, durante a estação chuvosa. As chuvas, muitas vezes intensas, geram grandes volumes com duração de algumas horas ou dias. Exceção deve ser feita à ilha de S. Antão, onde alguns cursos de água, alimentados pelas nascentes, mantêm um caudal apreciável durante todo o ano.

Pelo fato de que, em Cabo Verde, os relevos são muito acidentados, montanhoso e inclinados, as bacias hidrográficas também são muito inclinadas o que, por conseguinte, aumenta a velocidade de escoamento e tem um grande impacto no tempo de concentração (Silva e Fernandes, 2020).

Nas ilhas montanhosas, o testemunho de vales estreitos e profundos revelam a ação da erosão fluvial, de uma época antiga, caracterizada por fortes precipitações.

Em resumo, podemos apresentar o seguinte esquema estratigráfico para a ilha de Santiago que, com pouca variação, é representativo da maior parte das ilhas:

- um complexo antigo, anterior ao Mioceno;
- uma fase predominantemente explosiva, durante o Mioceno, após um período erosivo caracterizado por variações isostáticas importantes (sucessões de imersão e emersão);
- uma fase efusiva no Plioceno, correspondente à formação de estrato cones e, após uma fase erosiva, termina por sucessões de coladas basálticas de forte espessura;
- uma fase (Quaternário) de emissões piroclásticas difusas com algumas coladas basálticas a elas associadas;

A Figura 7.3 ilustra a localização das Ilhas de Cabo Verde dividido em duas regiões, a de Barlavento, que são as ilhas a Norte do país, e a de Sotavento, correspondendo às ilhas ao Sul.

Figura 7.3 – Localização geográfica de Cabo Verde



Fonte: Acervo pessoal do autor.

As condições climáticas são do tipo subtropical árido a semiárido, correspondente à zona saheliana. Esta zona compreende uma banda de anticiclones, que se mantém durante uma grande parte do ano e exerce um papel importante na circulação atmosférica, separando a zona quente da zona temperada. As ilhas são submetidas a precipitações muito variáveis e incertas, durante alguns dias, entre o mês de Julho e Outubro. O país sofre de secas persistentes com fortes impactos na sua economia, demografia e ambiente.

O clima é influenciado pela circulação de grandes correntes aéreas que modificam o carácter das estações aumentando a pluviometria durante a estação húmida (monções, subida da FIT - Frente Inter-Tropical), com ausência de precipitação durante a estação seca (harmatão).

A precipitação média anual é de 230 mm, muito irregularmente repartida no espaço e no tempo, com episódios cíclicos de secas, alternados com chuvas torrenciais. O relevo é um dos principais fatores climáticos e a precipitação é maior nas ilhas montanhosas (Fogo, Santiago, Brava, Santo Antão e S. Nicolau). Nas zonas situadas a altitudes superiores a 500 m, as precipitações podem atingir 700 mm, devido, em parte, à influência dos alísios.

As características climáticas das principais ilhas, tendo como base a combinação dos valores médios da temperatura e da pluviometria, podem ser resumidas nos seguintes: i) uma estação chuvosa e quente de Julho/Agosto a Outubro/Novembro; ii) uma estação seca e fria de Novembro/Dezembro a Março/Abril; e iii) uma estação seca e quente de Abril a Junho/Julho.

A característica insular de Cabo Verde permite-lhe beneficiar de uma humidade relativa importante, com um valor médio igual ou superior a 80%, nas regiões situadas a uma altitude superior a 600 m e inferior a 75% nas regiões de baixa altitude.

A evapotranspiração potencial, calculada pelo método de Penman, atinge 1650 mm em Trindade, 1180 mm em S. Jorge, 1145 mm em Santa Cruz e 1456 mm em Calheta (Maio), 1456 mm em S. Nicolau. Durante o mês de Maio observam-se valores mais elevados de ETP, coincidindo com o mês de menor pluviometria. A influência do vento e da temperatura afeta diretamente os valores de ETP. O efeito dessecante do harmattan contribui, também, para o aumento dos valores da evaporação e evapotranspiração.

A evolução da pluviometria, no decurso dos últimos 50 anos, conheceu uma evolução significativa sobre todas as ilhas de Cabo Verde. Apesar das variações interanuais muito importantes, a tendência mostra uma diminuição das precipitações médias e da sua variabilidade tanto nas zonas húmidas como nas zonas áridas. Assim zonas húmidas passaram a ser gradualmente sub-úmidas ou semiáridas (Mannaerts, 1995).

Durante o período de 1982/1998 as precipitações parecem ter chegado a valores mínimos e a média mostra uma tendência para inversão dos valores.

Os registos, também, ilustram uma variabilidade interanual significativa, com um coeficiente de variação acima de 50%. Cabo Verde é por vezes confrontado com chuvas intensas que causam inundações nos estuários de algumas bacias hidrográficas e provocam danos nas infraestruturas e nos terrenos agrícolas.

Levando em conta o relevo, o clima e o tipo de vegetação, podemos classificar as principais zonas bioclimáticas da seguinte forma:

- Zona árida – entre 0 a 200 m de altitude, com carácter desértico, pluviometria média inferior a 300mm. A vegetação, geralmente, é do tipo estepe herbácea.
- Zona semiárida – situada entre 200 a 400 m de altitude, com uma pluviometria média oscilando entre 300 e 400 mm. Embora seja marginal para agricultura, é aqui que os camponeses cultivam culturas de subsistência nos anos de boa pluviometria. A vegetação natural difere muito pouco da zona precedente.
- Zona semiúmida – entre 400 a 600 m de altitude, com uma pluviometria interanual que oscila entre 400 a 600 mm. Esta zona tem mais aptidão para a agricultura e nela podem-se encontrar espécies lenhosas, arbustivas e árvores disseminadas pelos campos agrícolas.
- Zona húmida – situada acima dos 700 m de altitude, com uma pluviometria média anual superior a 600 mm. Em termos de produção forrageira e agrícola é a zona mais produtiva. Nas principais ilhas agrícolas do país (Santo Antão, Santiago, São Nicolau e Fogo) estas zonas são de uma importância vital para a infiltração das águas das chuvas e a recarga dos aquíferos (PAGIRE, 2010).

Ao longo dos cinco séculos de sua existência a população cabo-verdiana conheceu uma evolução marcada ciclicamente, por eventos que, embora extrademográficos, determinaram e orientaram a sua estrutura e o seu crescimento. Os primeiros, e mais marcantes de todos, foram as secas e as fomes que, somente no século XX, até os anos 70, causaram a morte de, aproximadamente, 100.000 pessoas. Outrossim, os períodos de seca e fomes foram sempre acompanhados de fluxos migratórios importantes, estes, também, constituindo-se em fator regulador do crescimento populacional.

A hidrografia de Cabo Verde é constituída de leitos de escoamento ocasionais, ou sazonais, formando vales encaixados e escoamentos torrenciais, que normalmente desaguan

no mar. A natureza do relevo origina correntes de água rápidas e caudalosas, de pouca duração e importantes caudais de ponta.

O regime hidrológico torrencial a que o arquipélago se vê submetido traz, como consequência, um importante arrastamento de sólidos, fenómeno favorecido pela pouca vegetação, pendentes abruptas e solos pouco profundos.

Na época das chuvas as cheias podem ocasionar efeitos desastrosos. As correntes de água conseguem arrastar enormes blocos de basalto e um volume de materiais finos que alcança valores da ordem de 5.000 a 6.000 t/km²/ano. Por outro lado, constata-se periodicamente e, em especial, durante a época húmida, uma perda grande de solo cultivável acompanhado de um importante volume de água que se perde no mar (estimado em 181 milhões de m³/ano) (PAGIRE, 2010). Para minimizar esta perda de água foram construídas barragens para mobilização de água superficial.

Diferentes estudos, tentaram quantificar os recursos superficiais e avaliam o escoamento superficial entre 20 a 53% do valor da pluviometria. Adoptaremos a avaliação feita no estudo do plano diretor dos recursos hídricos.

Estudos mais recentes, levados a cabo no quadro da cooperação Japonesa (JICA, 2010), concluíram que a perda por escoamento superficial na ilha de Santiago é superior a perda por evaporação. Esta conclusão muda de forma significativa os dados do problema, designadamente, em termos de erosão e, sobretudo, a potencialidade de recuperação das águas superficiais. Assim, os recursos superficiais da ilha de Santiago, de acordo com esses estudos, são da ordem de 168,4 milhões de m³/ano.

Em Cabo Verde a exploração das águas superficiais é seriamente condicionada pelo seu tipo de escoamento, geralmente torrencial. Até à construção das barragens a captação e armazenamento das águas de escoamento superficial são práticas raras e a água mobilizada representa uma parcela muito insignificante do potencial existente, sendo que os melhores testemunhos da prática de captação de água das chuvas são as cisternas, concentradas, sobretudo, na ilha do Fogo, que captam a água que se escoia dos telhados e de superfícies impermeabilizadas. A água natural produzida em Cabo Verde é, pois, no essencial de origem subterrânea e dessalinizada.

Com a construção da barragem de Poilão a dinâmica de captação das águas superficiais vai registar outro incremento. Em 2009 a barragem de Poilão ficou completamente cheia, tendo armazenado um volume da ordem de 1,7 milhões de m³, o que representa menos de 1% do total do escoamento superficial estimado para a ilha de Santiago, e posteriormente em anos

seguintes, com a construção de mais barragens incrementou ainda mais a captação e armazenamento de águas superficiais.

Conforme referido anteriormente, Cabo Verde começou a construção da sua primeira grande barragem no ano de 2006, através da cooperação e financiamento do Governo da China (Barragem de Poilão na Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca em Santiago) na ausência de um Decreto-Lei sobre a segurança de barragens.

Posteriormente, devido a cooperação com o Governo de Portugal e através da linha de crédito BPI/SA, a partir de 2010, iniciou a construção de mais seis barragens, que são as de Faveta, Figueira Gorda, Saquinho e Salineiro em Santiago e, as de Canto Cagara em Santo Antão, Banca Furada em São Nicolau e através da linha de crédito do Banco Árabe para o Desenvolvimento (BADE), foi construída a Barragem de Flamengos na Bacia Hidrográfica com o mesmo nome e a Barragem de Ribeira Principal, ambos na Ilha de Santiago.

No arquipélago de Cabo Verde, nas ilhas planas como o Sal, Maio e Boa Vista, o declive das ribeiras não ultrapassa os 5%. Nas ilhas de Fogo e S. Antão localizam-se as maiores pendentes médias de todo o país. Os valores máximos situam-se na bacia de Volta Volta - ilha do Fogo e na Ribeira da Janela – ilha de Santo Antão.

A bacia de maior superfície é a de Rabil, com 199,2 km², localizada na ilha da Boa Vista. Nas ilhas restantes, as superfícies das bacias são inferiores a 70 km². Na ilha da Brava nenhuma bacia ultrapassa os 6 km². Na Tabela 7.1, está apresentada a localização dos postos pluviométricos.

Tabela 7.1 – Localização dos postos pluviométricos

Postos pluviométricos	Coordenadas		
	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Altitude/cota (m)
Flamengos	15,15	23,63	95
Serra da Malagueta	15,18	23,69	765
Torril de Boaventura	15,12	23,59	155
Assomada Portãozinho	15,06	23,40	550
S. Jorge dos Órgãos	15,03	23,37	319
Curralinho	15,02	23,38	950
Figueira de Portugal	14,59	23,35	373

Fonte: elaborada pelo autor.

As altitudes máximas das bacias alcançam valores de 2.600 m na ilha do Fogo, 800 m na ilha da Brava, 950 m em Santiago e 1.750 m em Santo Antão (Ribeira de Alto Mira). Exceção feita à bacia de Rabil, nas restantes ilhas, as ribeiras alcançam um comprimento axial

máximo de 18 km. A Figura 7.4 apresenta as principais Bacias Hidrográficas da Ilha de Santiago, onde também, se localizam as barragens em estudo.

Figura 7.4 – Características das principais bacias hidrográficas na Ilha de Santiago

Bacia Hidrográfica	Superfície km ²	Perímetro km
1 Ribeira Trindade	66.8	37.6
2 São Martinho	30.1	34.8
3 Ribeira Santa Ana	49.7	33.8
4 Ribeira Santa Clara	28.0	28.8
5 Ribeira Agua Belas	43.2	36.6
6 Ribeira Charco	31.9	25.8
7 Ribeira Barca	18.9	21.9
8 Ribeira Cuba	18.9	19.6
9 Ribeira Grande Tarrafal	23.0	25.5
10 Ribeira Principal	23.8	20.7
11 Ribeira dos Flamengo	30.8	32.5
12 Ribeira Santa Cruz	39.7	39.5
13 Ribeira Picos	49.7	41.2
14 Ribeira Seca	71.6	40.5
15 Ribeira São Domingos	33.1	34.1
16 Ribeira São Francisco	16.8	21.2



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2008).

Conforme Campos (2009), as bacias hidrográficas dominada pelas barragens em estudo, que são as bacias de Ribeira de Picos (Faveta), Santa Cruz (Figueira Gorda), Flamengos (barragem de Flamengos), Ribeira Seca (Poilão), Ribeira Grande de Santiago (Salineiro) e Charco (Saquinho), com áreas inferiores a 100 km², podem ser classificadas, segundo os seus tamanhos, como bacias hidrográficas médias por terem $2,5 \text{ km}^2 < A < 100 \text{ km}^2$, conforme ilustrado na Figura 7.4.

7.2. Características gerais das barragens estudadas

Neste trabalho, são apresentados detalhes de projeto específicos relacionados com cada barragem, bem como as respectivas figuras para ajudar na compreensão e interpretação dos resultados das barragens em estudo.

São descritas também os principais órgãos hidráulicos e hidromecânicos que fazem parte integrante do projeto construtivo tais como: Vertedouro, galeria de injeção e drenagem (exceto barragem de Flamengos), cortinas de impermeabilização e de drenagem, câmara de válvulas, estação elevatória ou de bombagem (barragem de Saquinho), tomadas de água, descarga de fundo etc. Refere-se também que todas as barragens construídas até ao momento em Cabo Verde, é para mobilização de águas superficiais para irrigação.

Os critérios de projetos dessas barragens são todos semelhantes, com a exceção de Saquinho que é em Betão arco-Gravidade, sendo aqui descritas alguns desses critérios:

- As formas adotadas são do tipo estruturas contínuas e homogêneas e estruturas com curvatura em planta por forma a tirar partido do efeito tridimensional;
- As obras a galeria de drenagem ao longo da inserção, que facilita o tratamento da fundação, a coleta de caudais drenados e a medição de subpressões na fundação;
- Em virtude do desenvolvimento e em função da localização/disposição dos diversos órgãos hidráulicos, o corpo da barragem será dividido em blocos, separados por juntas estruturais de contração. Para garantir a estanqueidade das juntas, as mesmas foram munidas de lâminas *waterstop* junto aos paramentos e junto à fundação, com capacidade para suportarem, pelo menos, 35 metros de coluna de água;
- A divisão em blocos permite reduzir os efeitos da retração do betão. Para melhor controlar este fenómeno, foram previstos betões com baixas dosagens de ligante e com substituição parcial do cimento por pozolanas naturais, com vista à redução do calor de hidratação libertado durante a cura;
- Em todas as barragens existem cortinas de impermeabilização e cortinas de drenagem devidamente dimensionadas para resistirem as pressões e subpressões de água a nível do corpo da barragem e a nível da fundação;
- Dimensionamento da barragem e sua fundação, incluindo o projeto de tratamento da fundação.

No capítulo 3, segurança de barragem, já se apresentou algumas das principais características das seis barragens em estudo, relacionadas com os critérios de verificação de segurança e modos de ruptura, ações e condições de estabilidade referentes às barragens de gravidade.

Geralmente, tendo sido feitos estudos e de acordo com as condições geológico-geotécnicas reconhecidas na fundação da barragem, nas características geomecânicas do maciço no local de implantação da obra e às tensões a suportar, preconiza-se a realização de um tratamento de contenção e consolidação da barragem.

O tratamento do maciço de fundação das Barragens em estudo, consistirá, genericamente, em cortinas de consolidação. Considerou-se que a consolidação do maciço e a ligação

betão-rocha será efetuada através da injeção de caldas de cimento, com origem, maioritariamente, na galeria geral de injeção e drenagem. A profundidade de tratamento de consolidação nas margens será de cerca de 3 a 5 metros.

Relativamente aos estudos geológicos-geotécnicos, existem relatórios anexos ao projeto construtivo com detalhes desta especialidade de projeto. Em geral, os estudos são todos semelhantes e apresentam a mesma metodologia, mas diferem nos resultados, obviamente (Norvia/Cenor, 2011).

Foram adotados os seguintes critérios:

- Caracterização geológica geotécnica do maciço rochoso;
- Prospecção Geofísica Perfis de Resistividade Eléctrica;
- Prospecção Mecânica;
- Grau de alteração (W);
- Grau de fraturamento (F);
- Percentagem de recuperação e índice RQD (*Rock Quality Designation*);
- Ensaio de absorção de água do tipo Lugeon;
- Ensaio Laboratoriais;
- Ângulo de atrito das descontinuidades;
- Hidrogeologia;
- Zoneamento Geológico-Geotécnico do Maciço Rochoso ;
- Perfil Geológico Interpretativo – Unidades Litoestratigráficas;
- Zoneamento Hidráulico;
- Zoneamento geotécnico;
- Caracterização geológico-geotécnico;
- Zoneamento Geológico-Geotécnico do maciço Rochoso;
- Cortina de Estanqueidade; e
- Definição do horizonte de fundação da barragem.

As características hidrogeológicas dos maciços rochosos refletem a influência de diversos fatores, destacando-se a topografia, a litologia e a estrutura geológica do local de implantação de barragem, conforme ilustrada na imagem da Figura 7.5.

A conjugação destes três fatores permite a definição de complexos hidrogeológicos distintos, tanto no que se refere ao tipo de permeabilidade como ao tipo de confinamento existente e ainda no tipo de escoamento e regime de percolação.

A Formação dos Flamengos, relativamente à hidrogeologia e recursos hídricos, por se tratar de uma formação com uma certa espessura e representatividade, de uma maneira geral apresenta uma produtividade relativamente baixa.

A Ilha de Santiago é a maior ilha do arquipélago de Cabo Verde, com 991 km² de superfície e 54,9 km de maior comprimento, e a terceira mais alta. O arquipélago situa-se a

cerca de 2000 km a Leste da localização atual do *rift* médio atlântico. A altitude média da ilha é de 278,5 metros, sendo a altitude máxima de 1.392 metros (monte do Pico da Antónia).

O relevo atual, dividido fundamentalmente em dois maciços importantes, as serras do Pico da Antónia e da Malagueta, resultou da ação erosiva do último grande edifício vulcânico erigido pelo Complexo Eruptivo do pico da Antónia (SILVA e FERNANDES, 2020).

Os materiais piroclásticos têm pequeno desenvolvimento no conjunto das formações tendo assim reduzida importância na modelação do terreno. O enorme aparelho vulcânico, que se inclui na tipologia dos vulcões escudo, apresenta, no fundo do mar, grandes dimensões, estando a sua base unida com aparelhos vulcânicos adjacentes.

Com efeito, trata-se de um grande aparelho vulcânico muito destruído, onde se destacam grandes depressões erosivas, como São Jorge dos Orgãos e planuras com pouca inclinação. Estas superfícies planas são de dois tipos, umas que correspondem à sobreposição sucessiva de derrames pouco inclinados (2° a 10°), as outras, as achadas, resultam da aplanção litoral, de idade quaternária (PAGIRE, 2004).

A Figura 7.5 apresenta uma amostra do solo extraída durante o ensaio do local de implantação da barragem de Figueira Gorda. Procedimento de ensaio (sondagem à rotação) semelhante foi aplicado a todas as barragens estudadas.

Figura 7.5 – Amostra do solo (tarolos) extraída durante o ensaio de fundação



Fonte: Norvia (2012).

Principais características das barragens	Barragens					
	Salineiro	Faveta	Saquinho	Figueira Gorda	Flamengos	Poilão
Vazão do projeto da cheia milenar: afluente (Qa) e efluente (Qe) (m ³ /s)	Qa=217.60 Qe=214.53	Qa=192,3 Qe=186,6	Qa=316,70 Qe=308,16	Qa=369,50 Qe=363,00	Qa ₁₀₀ =302 Qe ₁₀₀ =271	252 m ³ /s
Leis estatísticas utilizadas	Lei de Gumbel	Lei de Gumbel	Lei de Gumbel	Normal, L.normal, Gumbel, pearson III, L.Pearson III e Goodrich	Log Normal	
Postos pluviométricos	Figueira Portugal e Curralinho	Assom. Portãzinho, S.Jorge Órgãos e Curralinho	Serra Malagueta e Assom. Portãozinho	Toril de Boaventura, Flamengos e Assom. Portãozinho	Serra Malagueta e São Jorge Órgãos	São Jorge
Nome de localidade a jusante e respetiva população, (número)		Cidade Rib. Gr. Santiago: 1214	Faveta e Chã da Silva: 1399	Charco: 266	Ribeirão Boi: 388	Tagarra e Ponta Calhetona : 826

Fonte: elaborada pelo autor.

7.3. Barragem de Faveta

O local de implantação da Barragem de Faveta interessa à bacia hidrográfica da Ribeira dos picos, zona central da Ilha de Santiago, no conselho de São Salvador do Mundo, tendo como objetivo a irrigação das zonas da Faveta e Mato Forte. A Tabela 7.3 apresenta as principais características da bacia hidrográfica da Ribeira dos Picos.

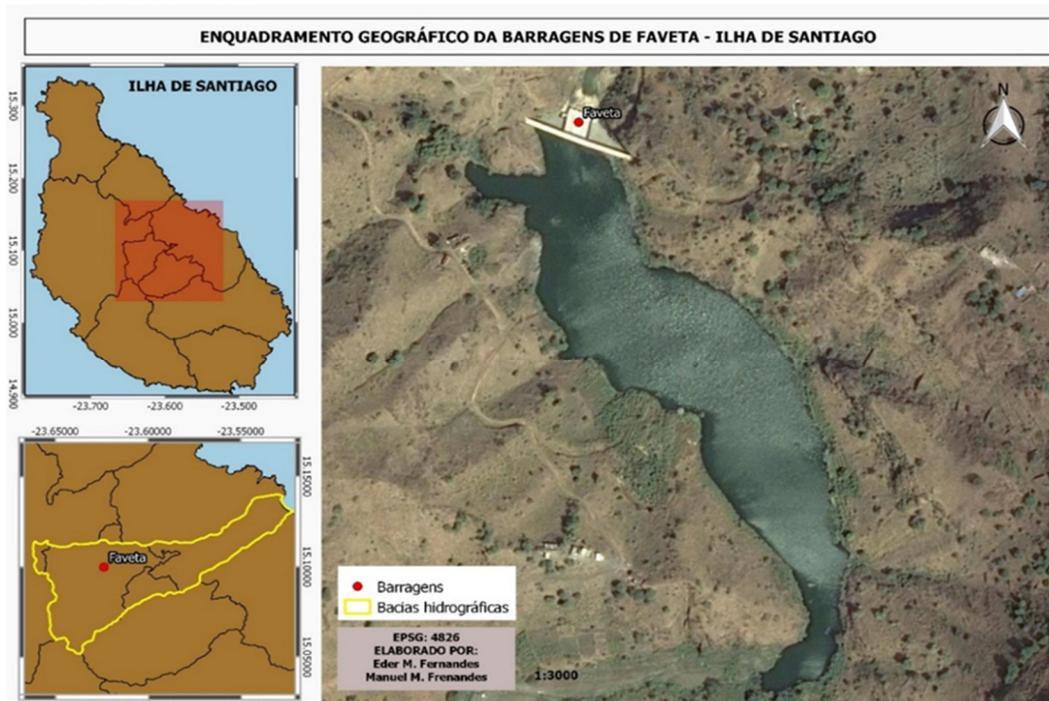
Tabela 7.3 – Principais características da bacia de Ribeira dos Picos

Barragem de Faveta	
Características da bacia hidrográfica	
Área total (km ²)	47,7
Área montante (km ²)	7,92
Perímetro (km)	14,68
Comprimento da linha de água principal (m)	6,951
Altitude mínima (m)	210,00
Altitude máxima (m)	1167,00
Altitude média (m)	488,53
Altura média (m)	278,53
Declive médio da bacia (%)	27,07
Declive médio da linha de água principal (m/m)	0,14
Declive entre 10 e 85% do comprimento da linha da água principal (m/km)	63,49

Fonte: elaborada pelo autor.

A bacia hidrográfica situa-se na vertente Centro Este da Ilha de Santiago, entre as cotas 210,00 e 1167 m, possuindo uma forma estreita e alongada na direção SW-NE, com uma área a montante da barragem de 7,92 km², conforme apresentado na Figura 7.6.

Figura 7.6 – Localização geográfica de barragem de Faveta e bacia hidrográfica de Ribeira de Picos



Fonte: elaborado pelo autor.

A Barragem de Faveta, construída de pedra argamassada, foi implantada ao longo de um alinhamento reto com 100,60 m de desenvolvimento de coroamento, medido sobre a

superfície de referência da barragem. É do tipo gravidade, com o paramento de montante vertical e o de jusante inclinado a 1,0V:0,8H. A obra tem 36,7 m de altura máxima acima da fundação (incluindo o tabuleiro pedonal), na zona do descarregador de cheias, que variará até 6,2m, nas extremidades de ambos os encontros. Fixou-se o coroamento da barragem à cota 235,10m.

Tratando-se de uma obra em alvenaria de pedra argamassada, garantiu-se a estanqueidade do corpo da barragem por meio de uma parede vertical com 0,50 m de espessura, em betão, situada a montante da obra e através de um sistema de drenagem localizado no interior da obra, o qual encaminha as águas afluentes para o interior da galeria de injeção e drenagem.

Em virtude do seu desenvolvimento e em função da localização/disposição dos diversos órgãos hidráulicos, o corpo da barragem foi dividido em 5 blocos, separados por 4 juntas estruturais de contração, numeradas por ordem crescente, da margem esquerda para a direita. As juntas não foram preenchidas, sendo a colocação de pedra argamassada de um bloco diretamente contra a pedra argamassada do bloco contíguo.

A divisão em blocos permite reduzir os efeitos da retração do betão. Para melhor controlar este fenómeno, foram previstos betões com baixas dosagens de ligante e com substituição parcial do cimento por pozolanas naturais que tem como objetivo de reduzir o calor de hidratação libertado durante a cura.

As juntas foram definidas por planos verticais e perpendiculares à superfície de referência da barragem. Para garantir a estanqueidade das juntas, as mesmas são munidas de lâminas *waterstop* junto aos paramentos e junto à fundação, com capacidade para suportarem cerca de 35 m de coluna de água.

A galeria de injeção e drenagem localiza-se no interior do corpo da barragem, percorrendo o bloco 3 (bloco central) e parte dos blocos adjacentes a este último, ou seja, os blocos 2 e 4. Transversalmente, a galeria é formada por uma seção retangular com 2,50 x 2,85 m, livres.

O descarregador de cheias é constituído, no troço inicial, por uma soleira em betão armado dividida em três vãos por dois pilares, também em betão armado. Estes permitem o apoio do tabuleiro pedonal. Cada pilar terá uma seção transversal formada por um retângulo com um semicírculo a montante.

O canal de descarga sobre o paramento de jusante da barragem, com 21 m de largura, é constituído por uma laje em betão armado, com 0,30m de espessura. O descarregador de cheias e o trampolim em salto de esqui estarão limitados por muros que terão um funcionamento em consola, em betão armado, com 0,3 m de espessura.

Sobre o descarregador de cheias da barragem é implantado um tabuleiro pré-fabricado para fins pedonais, em betão armado, ligando ambas as margens. O tabuleiro apoia no coroamento do corpo da barragem, em ambas as extremidades, e em dois pilares que descarrega na zona da soleira descarregadora. A rasante do tabuleiro rodoviário estará à cota 235,10. O perfil transversal do tabuleiro apresenta uma largura total de 4,0 m.

A seguir, são apontadas resumidamente as principais características da barragem de Faveta:

A) Finalidade

- Rega de terrenos agrícolas.

B) Hidrologia (bacia dominada pela barragem)

- Área da bacia hidrográfica: 7,92 km²;
- Vazão afluente da cheia de projeto do descarregador de cheias (Tr =1000 anos): 192,3 m³/s; e
- Vazão efluente da cheia de projeto do descarregador de cheias (Tr =1000 anos): 186,6 m³/s.

C) Albufeira

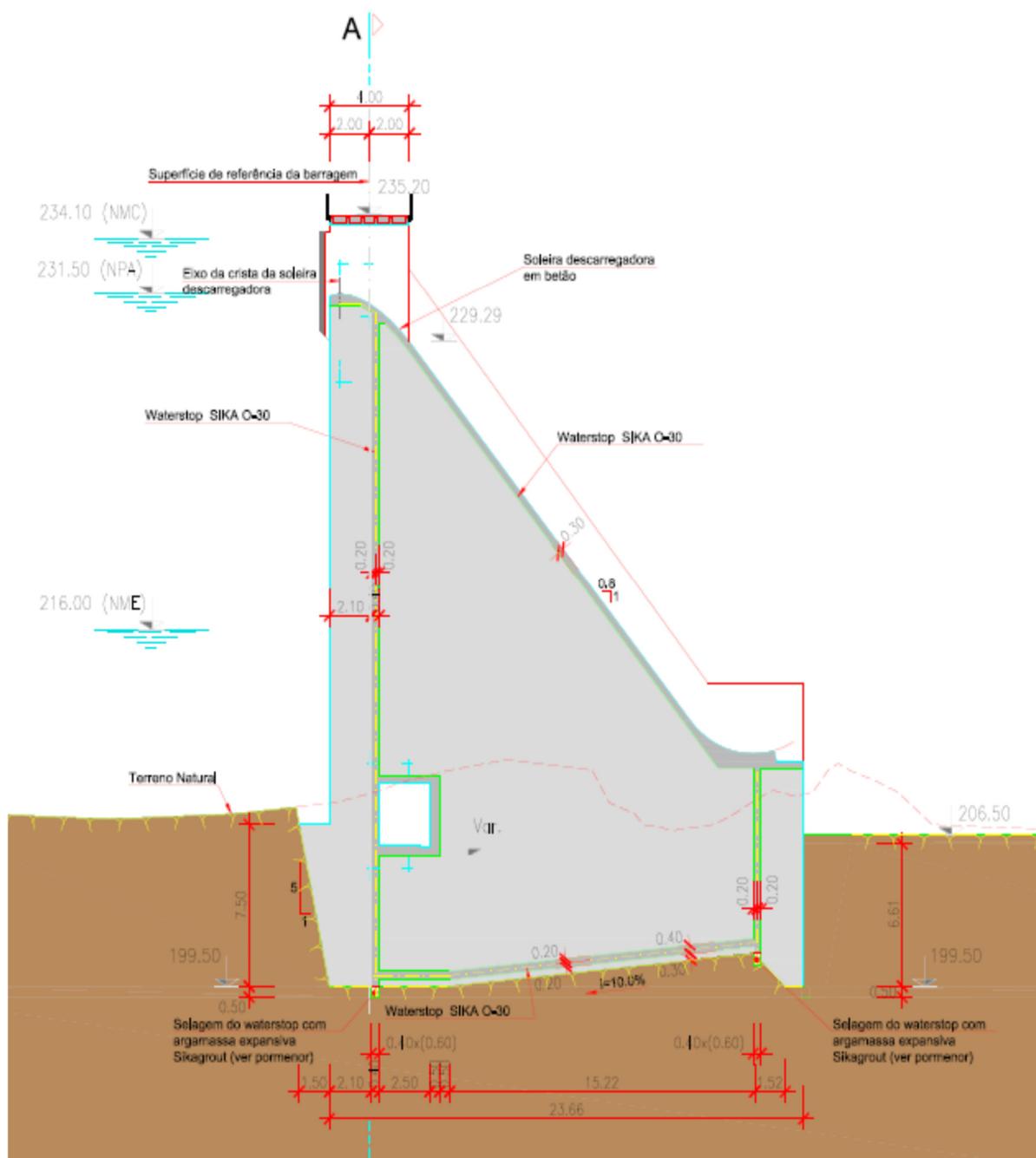
- Volume morto: 136 964 m³.
- Volume útil: 568 873 m³.
- Volume total: 705 837 m³.
- Nível mínimo de exploração (NME): 216,00.
- Nível de pleno armazenamento (NPA): 231,50.
- Nível de máxima cheia (NMC): 234,10.
- Área inundada à cota do NPA: 7,06 ha.

D) Barragem

- Tipo: Alvenaria.
- Cota do coroamento: 238,20.
- Cota do ponto mais baixo da fundação: 199,50.
- Altura máxima acima da fundação: 38,7 m.
- Desenvolvimento do coroamento: 100,60 m:
- Largura do tabuleiro pedonal sobre o coroamento: 4,0 m.

A Figura 7.7 ilustra o corte transversal da barragem pelo descarregador de cheias, apresentando diferentes cotas altimétricas desde Nível Mínimo de Exploração (NME), Nível de Pleno Armazenamento (NPA) e Nível de Máxima Cheia (NMC).

Figura 7.7 – Corte transversal da barragem de Faveta



Fonte: Norvia/Cenor (2013).

7.4. Barragem de Figueira Gorda

As principais características da bacia hidrográfica dominada pela Barragem de Figueira Gorda encontram-se compiladas na Tabela 7.4. A bacia hidrográfica de Santa Cruz situa-se na vertente nordeste da Ilha de Santiago, entre as cotas 65 e 700 m, possuindo uma forma

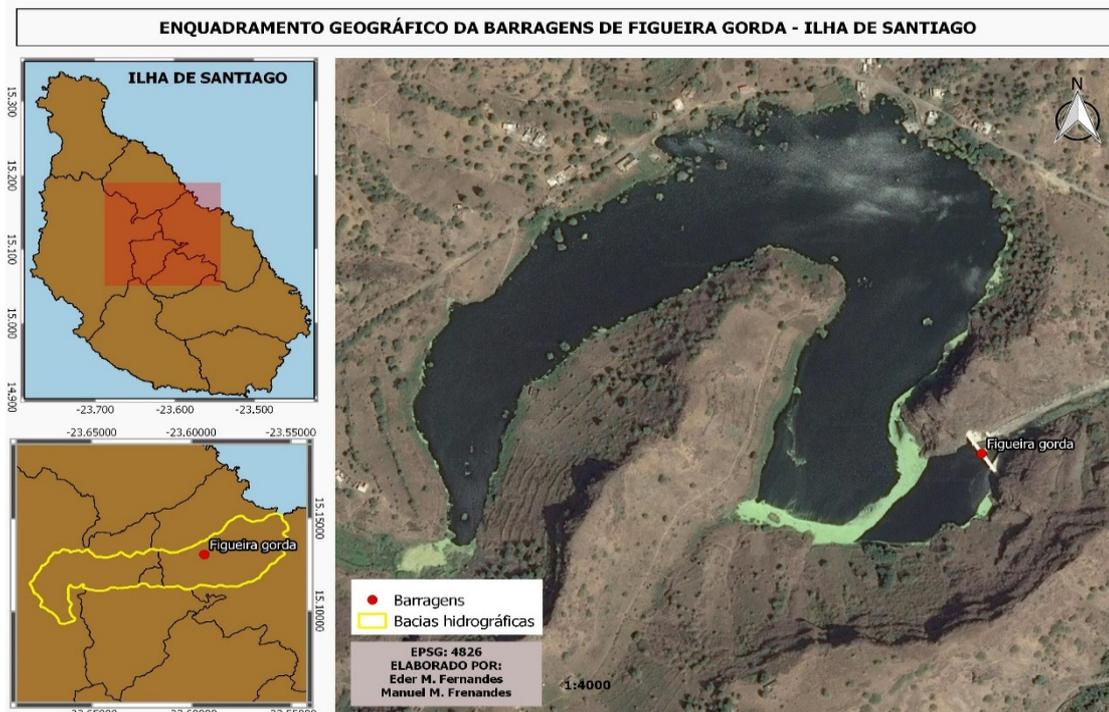
alongada na direção SW-NE, com uma área a montante de 20,20 km², sendo a área total da bacia hidrográfica é de 39,7 km², conforme ilustrado na Figura 7.8.

Tabela 7.4 – Principais características da bacia de Santa Cruz

Barragem de Figueira Gorda	
Características da bacia hidrográfica	
Área total (km ²)	39,7
Área montante (km ²)	20,2
Perímetro (km)	29,22
Comprimento da linha de água principal (m)	1591,51
Altitude mínima (m)	65,00
Altitude máxima (m)	700,00
Altitude média (m)	342,69
Altura média (m)	277,69
Declive médio da bacia (%)	0,033
Declive médio da linha de água principal (m/m)	59,73
Declive entre 10 e 85% do comprimento da linha da água principal (m/km)	39,7

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 7.8 – Localização geográfica da barragem e bacia hidrográfica de Figueira Gorda



Fonte: elaborado pelo autor.

A barragem de Figueira Gorda, foi construída em alvenaria de pedra argamassada, e implantada ao longo de um alinhamento reto com 60,5 m de desenvolvimento, medidos sobre

a superfície de referência da obra. A barragem é do tipo gravidade, com o paramento de montante vertical e o paramento de jusante com declive de 1,0V:0,8H. O coroamento situa-se à cota 95,20, correspondendo os níveis de pleno armazenamento (NPA) e de Máxima Cheia (NMC) respetivamente às cotas 91,00 e 94,20.

A barragem tem 32,7 m de altura máxima acima da fundação, dos quais cerca de 3 m corresponderão à profundidade de encastramento da fundação. Neste troço de maior altura, a fundação da barragem é constituída por uma recrava, a jusante.

Tratando-se de uma barragem em alvenaria de pedra argamassada, garante-se a estanqueidade do corpo da barragem por meio de uma parede vertical, em betão, com 0,50 m de espessura até à cota 82,50, transitando para 0,40 m de espessura acima desta última cota.

Na eventualidade da água passar através da parede de betão, existirá um sistema de drenagem localizado no corpo da barragem constituído por tubos Ø200 em PVC crepinados (perfurados), o qual encaminhará as águas afluentes para o interior da galeria de injeção e drenagem.

Em virtude do seu desenvolvimento e em função da localização/disposição dos diversos órgãos hidráulicos, o corpo da barragem será dividido em cinco blocos, separados por quatro juntas estruturais de contração, todas numeradas por ordem crescente da margem esquerda para a direita.

As juntas não foram preenchidas, prevendo-se a colocação de pedra argamassada de um bloco diretamente contra a pedra argamassada do bloco contíguo. Deverão prever-se entalhes entre as pedras de blocos contíguos, de forma a se conseguir mobilizar mais atrito na superfície das juntas. As juntas serão definidas por planos verticais e perpendiculares à superfície de referência da barragem.

Para garantir a estanqueidade das juntas, as mesmas serão munidas de lâminas *waterstop* junto aos paramentos e junto à fundação, com capacidade para suportarem, pelo menos, 35 metros de coluna de água. A divisão em blocos permitirá reduzir os efeitos da retração do betão.

Para melhor controlar este fenómeno, estão também previstos betões com baixas dosagens de ligante e com substituição parcial do cimento por pozolanas naturais, com vista à redução do calor de hidratação libertado durante a cura.

A galeria de injeção e drenagem, localizada no interior do corpo da barragem, irá percorrer parte dos blocos 2 e 4 e a totalidade do bloco 3. Transversalmente, a galeria será formada por uma seção retangular com 2,00 x 2,80 m, livres. A galeria será limitada a montante pela parede de estanqueidade da barragem.

No topo, será circunscrita por uma laje em betão, com 0,50 m de espessura e, a jusante, por uma parede com igual espessura, também em betão. A galeria será provida de, apenas, uma entrada no paramento de jusante da barragem, localizada na margem esquerda da obra, cuja plataforma de acesso se encontrará à cota 76,00 m.

O descarregador de cheias é constituído, no troço inicial, por uma soleira em betão armado dividida em quatro vãos por meio de três pilares, também em betão armado. Estes pilares permitem o apoio do tabuleiro localizado sobre o descarregador.

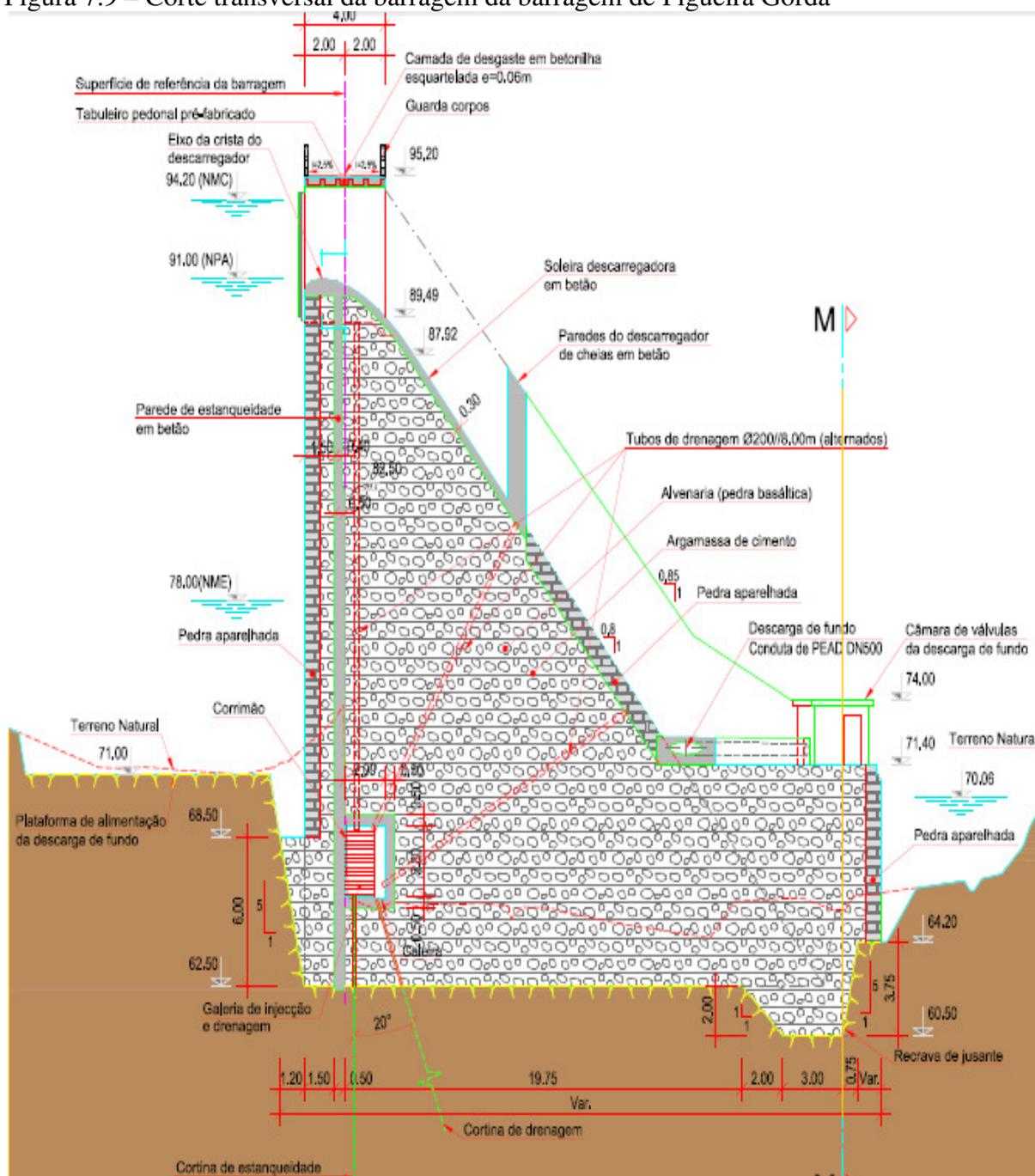
Cada pilar terá uma seção transversal formada por um retângulo e por um semicírculo com 0,5 m de raio, a montante. O canal de descarga sobre o paramento de jusante da barragem será convergente, de montante para jusante, e constituído por uma laje em betão armado, com 0,30m de espessura.

O descarregador de cheias e o trampolim em salto de esquí estarão limitados por muros que terão um funcionamento em consola, em betão armado, com 0,3 m de espessura. No troço final do canal de descarga e sobre o eixo da barragem executar-se-á um septo, em betão armado, com espessura variável entre 0,20 m, a montante, e 0,50 m, a jusante. Este septo central permitirá retificar as trajetórias do escoamento na extremidade de jusante do canal convergente e cortar a formação de ondas de choque transversais.

Sobre o descarregador de cheias da barragem foi implantado um tabuleiro pré-fabricado para fins pedonais, em betão armado, ligando ambas as margens. O tabuleiro apoia-se nos pilares de extremidade e em três pilares centrais que descarregarão na zona da soleira descarregadora. A rasante do tabuleiro pedonal estará à cota 95,20. O perfil transversal do tabuleiro apresentará uma largura total de 4,0 m.

Na Figura 7.9, está ilustrado o desenho geométrico da barragem de Figueira Gorda, corte transversal pelo vertedouro.

Figura 7.9 – Corte transversal da barragem da barragem de Figueira Gorda



Fonte: Norvia/Cenor (2013).

7.5. Barragem de Flamengos

O planeamento da construção da barragem de Flamengos é o resultado do estudo para a bacia hidrográfica de Flamengos e de Ribeira Principal em Cabo Verde. As duas bacias

hidrográficas, foram escolhidas na ilha mais populosa e com as melhores potenciais agrícolas (SANTIAGO).

O estudo diz respeito à identificação de estratégias de implementação valor das duas bacias hidrográficas, após um diagnóstico da situação e, em particular, significa ser usado para combater a erosão hídrica. Ele investe mais particularmente na mobilização racional de recursos hídricos para alimentar populações, agricultura irrigada e proteção ambiental. A área do projeto faz parte da ilha de San Domingo e está sujeita a um clima saeliano de transição, caracterizado por duas estações, uma chuvosa (julho a outubro) e uma seca (novembro a junho).

Os parâmetros climáticos são definidos para a área do projeto da seguinte forma:

- A evaporação em mm é calculada a partir de observações diárias para o ano de 2004 na estação de S. Jorge dos Orgãos;
- Temperaturas médias e mínimas máximas, bem como umidade relativa, são de observações feitas na estação Serra Malaguetta durante o período 1994-2001; e
- As velocidades e direções médias do vento são derivadas de observações de o ano de 2008, na estação Serra Malaguetta.

A barragem de Flamengos localiza-se na Ilha de Santiago na bacia hidrográfica de Ribeira de Flamengos, Conselho de São Miguel, e apresenta as características construtivas ilustradas na Tabela 7.5. A Tabela 7.6 apresenta as características da bacia hidrográfica da Ribeira de Flamengos, e a Figura 7.10, o corte transversal pelo vertedouro da barragem de Flamengos..

Tabela 7.5 – Principais características da barragem de Flamengos

Principais Características da barragem	Barragem de Flamengos
Ilha	Santiago
Conselho	Santa Catarina
Bacia Hidrográfica	Flamengos
Tipo de Barragem	Gravidade, alvenaria de pedra argamassada
Finalidade	Irrigação
Área da Bacia a montante (km ²)	21,90
Cota de Fundação (m)	155,20
Cota NME (m)	168,00
Cota NPA (m)	182,40
Cota NMC (m)	185,20
Cota de Coroamento (m)	187,70
Altura da Barragem (m)	32,50
Volume máximo de armazenamento (m ³)	852.600

Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor Cabo Verde (2011; 2013).

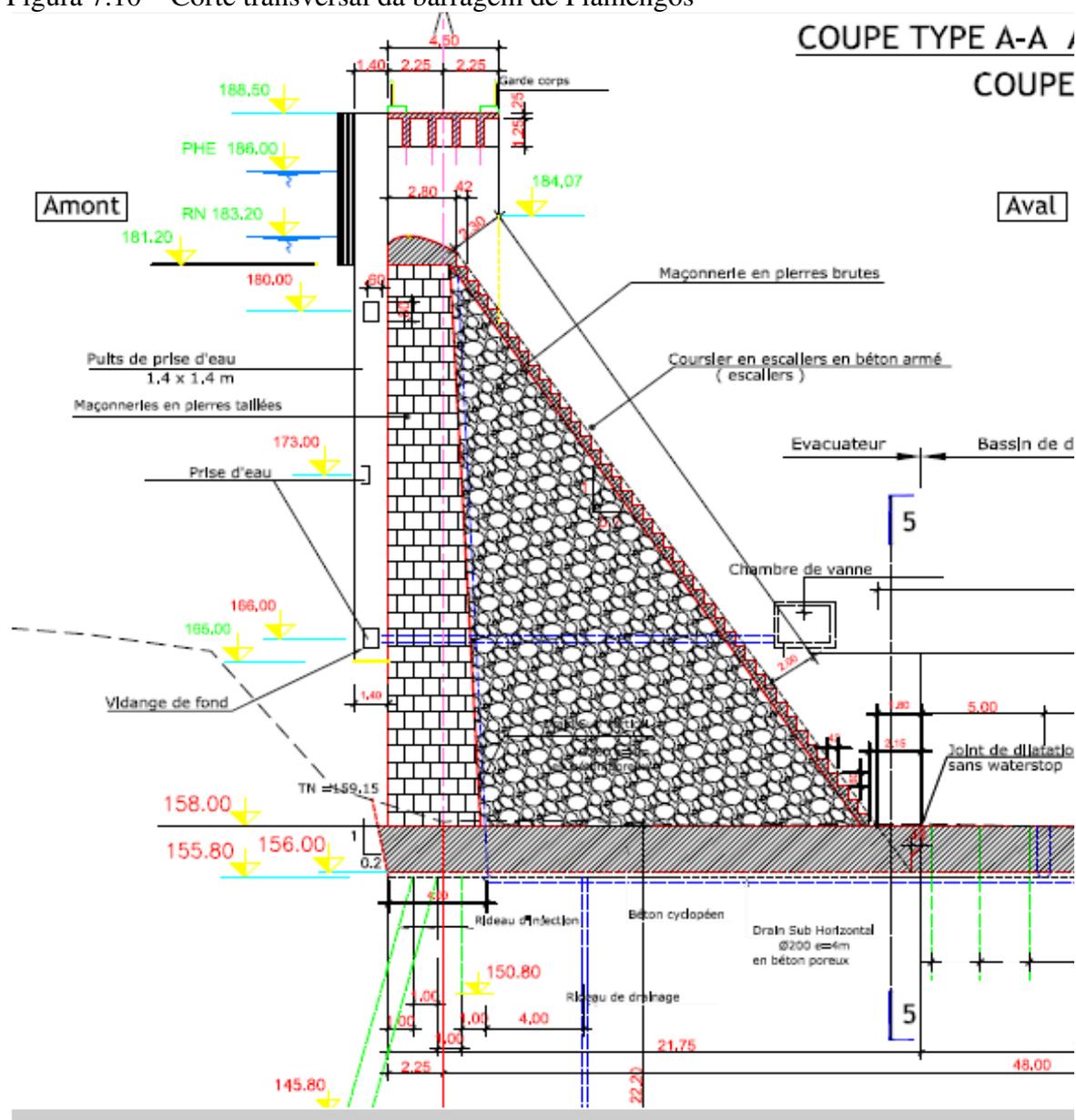
Legenda: NME = Nível mínimo de exploração; NPA = Nível Pleno de Armazenamento; e NMC=Nível de Máxima Cheia. (Nomenclatura utilizada em Cabo Verde).

Tabela 7.6 – Principais características da bacia de Flamengos

Barragem de Flamengos	
Características da bacia hidrográfica	
Área total (km ²)	30,9
Área montante (km ²)	21,9
Perímetro (km)	23,8
Comprimento da linha de água principal (m)	9,65
Altitude mínima, fundação da barragem (m)	155,20
Altitude máxima (m)	1069,00
Altitude média (m)	340,00
Declive entre 5 e 95% do comprim. da linha da água principal (m/km)	67,4

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 7.10 – Corte transversal da barragem de Flamengos



Fonte: Adaptado de PACE (2012).

7.6. Barragem de Salineiro

O local de implantação da Barragem de Salineiro interessa a bacia hidrográfica da Ribeira Grande, zona Sul da Ilha de Santiago, no conselho da Ribeira Grande de Santiago. A bacia hidrográfica da Ribeira Grande de Santiago, situada a Sul do pico da Antónia, está inserida na formação geológica PA–Pico da Antónia, Segundo Serralheiro, A., A., 1976.

Esta formação inclui os produtos das atividades explosivas e efusivas essencialmente de fácies terrestre sendo que a sua estratigrafia é a seguinte:

- piroclastos e escoadas intercaladas;
- mantos subaéreos e alguns níveis de piroclastos intercalados;
- fonólitos e traquitos; e
- séries espessas, essencialmente de mantos e alguns níveis de piroclastos.

As principais características da bacia hidrográfica dominada pela barragem do Salineiro encontram-se compiladas na Tabela 7.7, tendo a sua delimitação sido efetuada com base nas Cartas Militares 1:25 000. A bacia está localizada na vertente sudoeste da Ilha de Santiago, entre as cotas 238,00 e 954,00 m, possuindo uma forma estreita e bastante alongada na direção N-S, com uma área a montante da barragem de 8,36 km², sendo a área total da bacia de 15 km².

Tabela 7.7 – Características da bacia hidrográfica dominada pela barragem do Salineiro

Barragem de Flamengos	
Características da bacia hidrográfica	
Área total (km ²)	15
Área a montante (km ²)	8,36
Perímetro (km)	20,91
Comprimento da linha de água principal (m)	11977
Altitude mínima (m)	238,00
Altitude máxima (m)	954,00
Altitude média (m)	547,46
Altura média (m)	309,46
Declive médio da bacia (%)	8,18
Declive médio da linha de água principal (m/m)	0,06
Declive entre 10 e 85% do comprimento da linha da água principal (m/km)	47,54

Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2013).

A geometria adoptada para os taludes de escavação é definida tendo em conta o estado de alteração e fraturação do maciço interessado, a orientação das principais famílias de

diáclases e o tipo de taludes em causa (provisórios ou definitivos), bem como os condicionamentos geométricos relacionados com a morfologia do vale e as características das estruturas associadas.

A Barragem de Salineiro, em alvenaria de pedra argamassada, foi implantada ao longo de um alinhamento reto com 176,50 m de desenvolvimento, medidos sobre a superfície de referência da barragem. É do tipo gravidade, com o paramento de montante vertical e o de jusante inclinado 1,0V:0,8H. A construção da barragem de Salineiro tem 29,10 m de altura total, medida da cota mais baixa da fundação até ao tabuleiro rodoviário, na zona do descarregador de cheias, que variará até 8m e 6m nos encontros esquerdo e direito, respetivamente.

Nesta fase fixou-se o coroamento da barragem à cota 259,45 m. Tratando-se de uma obra em alvenaria de pedra argamassada, é garantida a estanqueidade do corpo da barragem por meio de uma parede vertical com 0,50 m de espessura, situada a montante da obra, em betão armado e, através de um sistema de drenagem localizado no interior da obra, o qual encaminhará as águas afluentes para o interior da galeria de injeção e drenagem.

Em virtude do seu desenvolvimento e em função da localização/disposição dos diversos órgãos hidráulicos, o corpo da barragem foi dividido em 9 blocos, separados por 8 juntas estruturais de contração, numeradas por ordem crescente, da margem esquerda para a direita. As juntas não foram preenchidas, sendo apenas a colocação de pedra argamassada de um bloco directamente contra a pedra argamassada do bloco contígua. Foram previstas entalhes entre as pedras de blocos contíguos, de forma a se conseguir mobilizar mais atrito na superfície das juntas.

A divisão em blocos permite reduzir os efeitos da retração do betão. Para melhor controlar este fenómeno, foram também, usados betões com baixas dosagens de ligante e com substituição parcial do cimento por pozolanas naturais, com vista à redução do calor de hidratação libertado durante a cura. As juntas são definidas por planos verticais e perpendiculares à superfície de referência da barragem.

Para garantir a estanqueidade do corpo da barragem, na fase de exploração, as juntas são munidas de lâminas *waterstop* junto aos paramentos e junto à fundação, com capacidade para suportarem cerca de 30 m de coluna de água. A galeria de injeção e drenagem localiza-se no interior do corpo da barragem, percorrendo quase a totalidade do perímetro da fundação. Transversalmente, a galeria é formada por uma seção retangular com 2,50 x 2,85 m, livres.

A galeria é limitada, a montante, pela parede de estanqueidade da barragem, por uma laje em betão com 0,50 m de espessura, na base, e por uma parede, também em betão, e igualmente com 0,50 m, a jusante. A laje de cobertura é materializada por meio de uma placa

pré-fabricada em betão armado, com 0,40 m de espessura, apoiada, a montante, num rasgo com 10 cm efetuado na parede de estanqueidade e, a jusante, na parede de betão.

A galeria foi provida de duas entradas no paramento de jusante, uma em cada extremidade da obra. As águas captadas na galeria de injeção e drenagem serão conduzidas por uma caleira situada a jusante da mesma até um poço de bombagem situado na base da referida galeria. No interior do poço foram instaladas duas bombas submersíveis, uma funcionando como reserva da outra.

Cada uma das bombas eleva um caudal de 5 l/s a 32 m da altura manométrica. Altura manométrica estabelecida para cada uma das bombas é da mesma ordem de grandeza que a altura da barragem, dado que se decidiu bombear os caudais de infiltração de volta para a albufeira. No descarregador de cheias da barragem foi construído um tabuleiro pré-fabricado para fins rodoviários, em betão armado, ligando ambas as margens.

O tabuleiro apoia-se na parte superior do corpo da barragem e em dois pilares apoiados diretamente na zona da soleira descarregadora. A rasante do tabuleiro rodoviário está à cota 260,10. O perfil transversal do tabuleiro apresenta uma largura total de 8,3 m, com uma faixa de rodagem com duas vias de 3,5 m, cada.

No presente projeto, optou-se pelo período de retorno de 1000 anos, que é o preconizado pelo Regulamento de Segurança de Barragens português, para barragens de betão (ou de alvenaria) com mais de 100 000 m³ de armazenamento e altura máxima acima da fundação compreendida entre 15 e 50 m, como é o caso da do Salineiro.

Dimensionou-se a descarga de fundo de forma a permitir o esvaziamento da albufeira num período de tempo não superior a duas semanas. Pretende-se que a velocidade máxima do escoamento na grelha de entrada (que tem uma seção quadrada de 1,00 m de lado) não seja superior a 2 m/s. Por sua vez, o órgão de regulação de caudal a jusante tem um diâmetro nominal não inferior a DN400, para evitar o seu encravamento com detritos sólidos ou sedimentos.

A Figura 7.11 ilustra corte transversal pelo vertedouro da barragem.

bacia hidrográfica dominada pela barragem do Saquinho encontra-se compilada na Tabela seguinte. A bacia situa-se na vertente noroeste da ilha de Santiago, entre as cotas 290,00 e 700,00 m, possuindo uma forma quase arredondada com uma área de 13,76 km², conforme ilustrada na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Principais características da bacia hidrográfica de Charco

Barragem de Saquinho	
Características da bacia hidrográfica	
Área total (km ²)	13,76
Perímetro (km)	16,55
Comprimento da linha de água principal (m)	5,742
Altitude mínima (m)	290,00
Altitude máxima (m)	700,00
Altitude média (m)	465,2
Altura média (m)	175,2
Declive médio da bacia (%)	14,79
Declive médio da linha de água principal (m/m)	0,07
Declive entre 10 e 85% do comprimento da linha da água principal (m/km)	64,79

Fonte: elaborado pelo autor.

A solução proposta para a barragem de Saquinho é a de um arco gravidade com uma altura máxima entre o coroamento e o ponto mais baixo da fundação de 40,0 m. A obra, em betão, foi implantada ao longo de um alinhamento com 59,58 m de raio de curvatura. O paramento de montante tem um declive de 10,0V:1,0H e o de jusante é constituído por degraus com 1,0V: 0,6 H. Fixou-se o coroamento da barragem à cota 317,00.

Em virtude do seu desenvolvimento e em função da localização/disposição dos diversos órgãos hidráulicos, o corpo da barragem é dividido em 5 blocos, separados por 4 juntas estruturais de contração, numeradas por ordem crescente, da margem esquerda para direita. As juntas não são preenchidas, com a betonagem de um bloco sendo feita diretamente contra o bloco contíguo. De forma a evitar deslocamentos diferenciais e a mobilizar um efeito de conjunto, foram feitas ligações entre os blocos, através de caixas de corte, em betão armado, com 0,30 m de espessura.

A divisão em blocos permite reduzir os efeitos da retração do betão em massa. Para melhor controlar este fenómeno, foram também previstos betões com baixas dosagens de ligantes e substituição libertado durante a cura. Transversalmente, a fundação dos blocos será constituída por recravas que contribuirão para aumentar a resistências as ações horizontais atuantes.

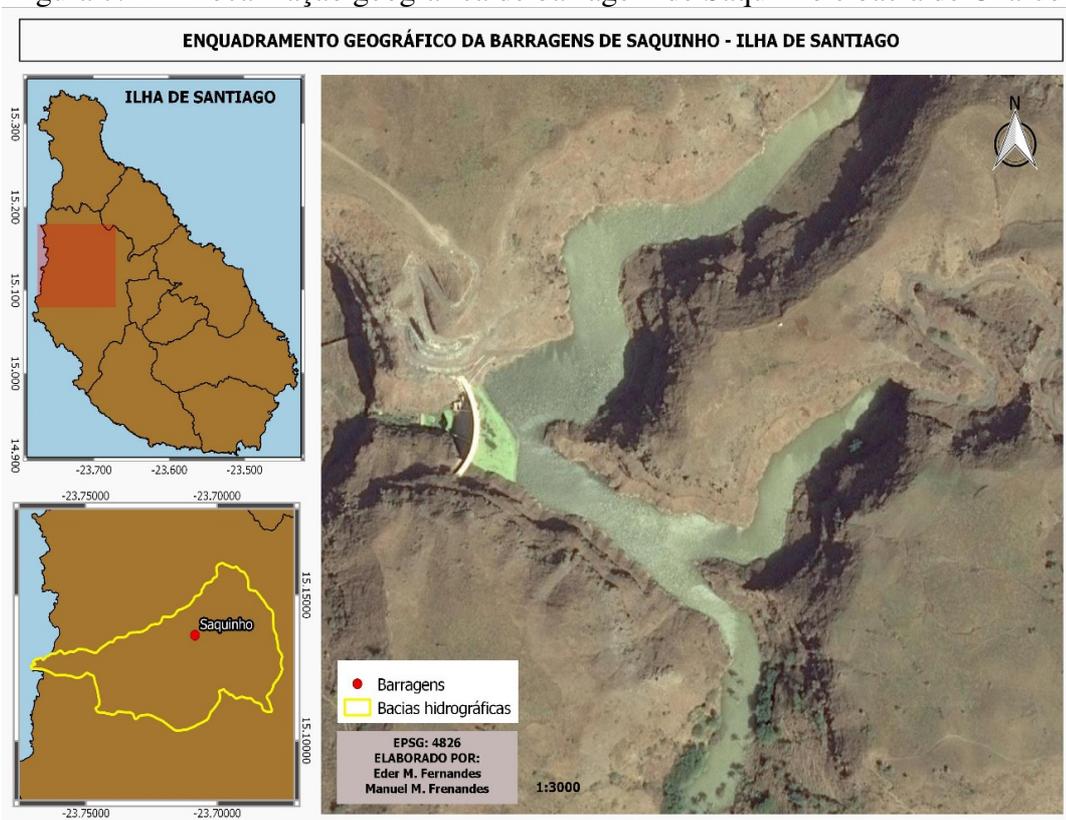
A estanqueidade do corpo da barragem, ao nível das juntas entre blocos, ficara garantida através da introdução de lâminas *waterstop*, com capacidade para resistirem a 40 m de

coluna de água. As lâminas estão localizados a 0,30 m do contorno exterior, com exceção das situadas na fundação, a 0,50 m da fronteira betão-fundação. Nas juntas J2 e J3, as lâminas também situam-se no topo superior, em que foram implantadas à cota 316,50. A selagem das lâminas na fundação fez-se através de valas preenchidas com argamassa expansiva.

O descarregador de cheias é constituído, no troço inicial, por uma soleira em betão armado, dividida por pilares em três vãos de 8,33m cada. Estes pilares permitem o apoio do tabuleiro e têm uma seção transversal formada por um retângulo e um semicírculo a montante de forma a não causar nenhuma resistência ao escoamento a partir da albufeira.

O canal de descarga sobre o parâmetro de jusante da barragem é convergente e tem o seu rasto constituído por degraus em betão armado. As dimensões dos degraus irão aumentando no sentido descendente até atingirem valores constantes de 0,6 (H);1,0(V). Na extremidade de jusante do canal, foi constituída uma bacia de dissipação de energia, parcialmente em betão armado e parcialmente em rocha à vista. Esta bacia tem em comprimento de 26m e a sua largura de rasto varia entre o máximo de cerca de 16,8m e o mínimo de 10m. A Figura 7.12 mostra a localização geográfica da barragem de Saquinho e da bacia hidrográfica de Charco.

Figura 7.12 – Localização geográfica de barragem de Saquinho e bacia de Charco



Fonte: elaborado pelo autor.

A estação elevatória, em betão armado, foi implantada no paramento de montante da barragem, no bloco 4. A câmara é acessível a partir do coroamento da barragem, e constitui o edifício de abrigo da estação elevatória, dentro da qual é instalada a maioria dos equipamentos hidromecânicos e eléctricos. Tem uma seção retangular com 4,0m por 10,0m de dimensões exteriores e é materializada, estruturalmente, por uma malha de pilares e vigas, também em betão armado. A câmara é limitada inferiormente e superiormente por lajes com 0,20m de espessura, em betão armado. O poço da estação é limitado pelo paramento de montante e paredes de 0,40m de espessura, tendo seção retangular interior de 6,20 x 2,20 m².

Neste projeto, optou-se pelo uso no cálculo do período de retorno de 1.000 anos, que é o preconizado pelo Regulamento de Segurança de Barragens Português, para barragens de betão com mais de 100.000 m³ de armazenamento e altura máximo acima da fundação compreendida entre 15 e 50 m, como é o caso da barragem do Saquinho.

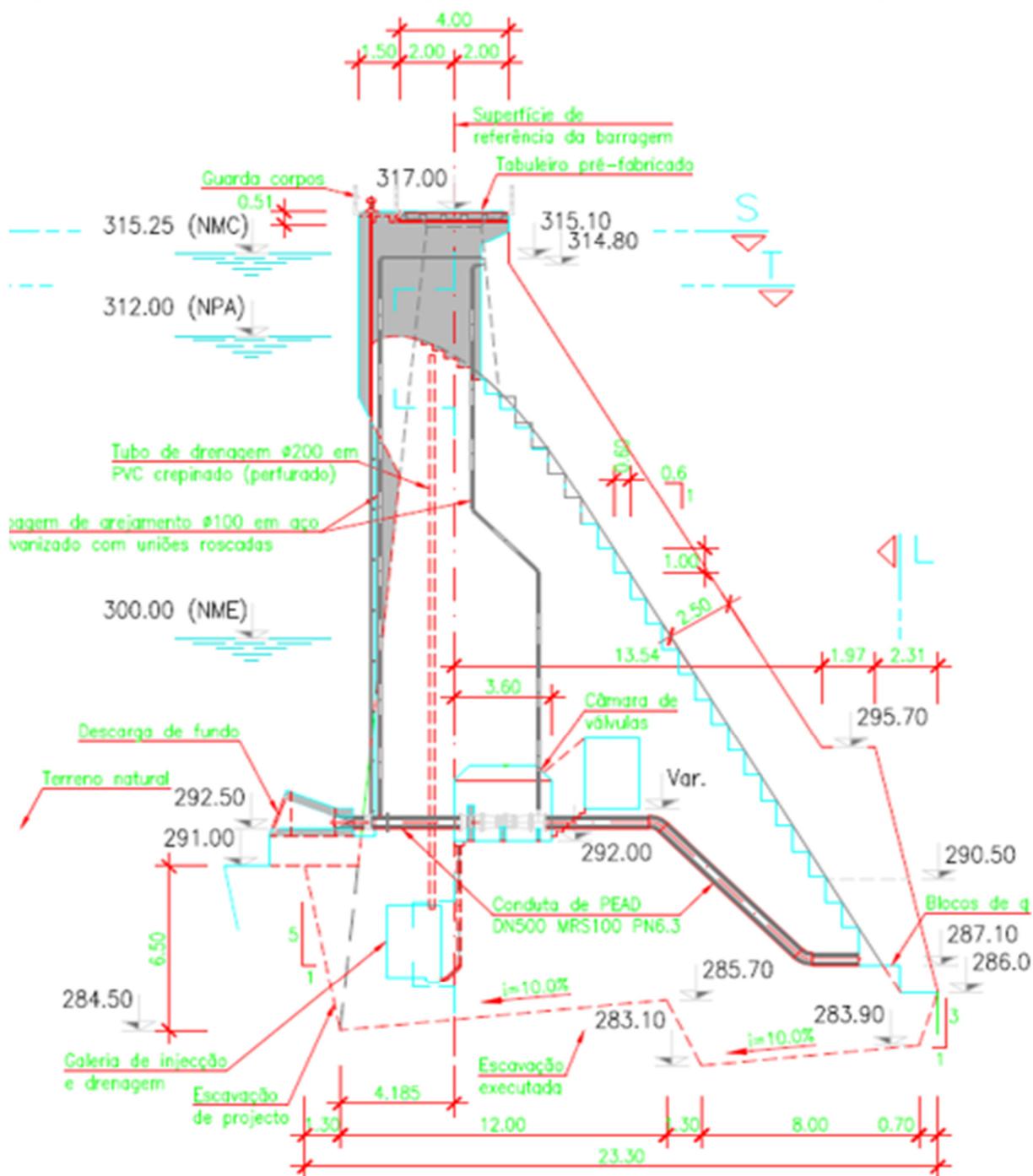
A descarga de fundo foi dimensionada de forma a permitir o esvaziamento da albufera num período de tempo não superior a duas semanas. As Figuras 7.13 e 7.14 ilustram a Barragem de Saquinho vertendo e desenho geométrico da seção transversal passando pela superfície de referência.

Figura 7.13 – Barragem de Saquinho vertendo



Fonte: Acervo pessoal do Autor.

Figura 7.14 – Corte transversal pela superfície de referência da barragem de Saquinho



Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2013).

7.8. Barragem de Poilão

A Barragem do Poilão tem por principal objetivo a retenção das águas superficiais e a sua posterior utilização na agricultura, localizada na Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca, na

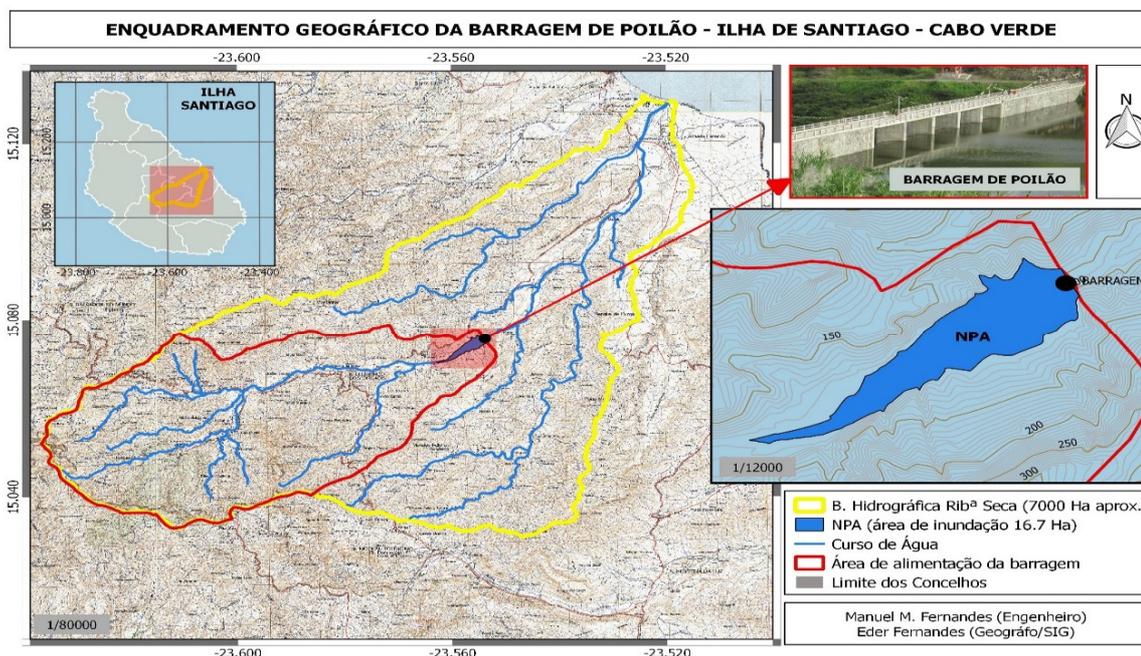
ilha de Santiago, no limite dos Conselhos de São Lourenço dos Órgãos e Santa Cruz. Em complemento, esta barragem trouxe uma expressiva mudança ecológica na localidade nomeadamente mudança paisagística e aumento de recursos hídricos no percurso inferior da bacia.

A grande carência da água de rega, na ilha de Santiago e particularmente na Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca, tido como uma das ribeiras mais importantes do país em termos de produção agrícola, terá encorajado a iniciativa de apostar nesta infraestrutura, que se torna realidade, graças à cooperação Sino - Cabo-Verdiana.

A Barragem do Poilão está localizada na Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca, Figura 7.15, na ilha de Santiago. Esta Ribeira engloba uma das mais importantes bacias da ilha, alongando de Pedra Badejo, numa direção a sudoeste e a uma distância, aproximadamente, de 16 Km para o interior. A maior largura da bacia hidrográfica é de 7 Km. O tamanho da área de recepção é de aproximadamente 72 km².

A altitude vai do nível médio da água do mar, até 1394 m, no Pico da Antónia, no extremo Oeste da bacia. As partes mais baixas do vale da Ribeira Seca são extensivamente cultivadas, constituindo numa das mais importantes áreas de cultivo do país.

Figura 7.15 – Localização da barragem de Poilão e bacia hidrográfica da Ribeira Seca



Fonte: elaborado pelo autor.

Como referido anteriormente, a Barragem deverá armazenar um total de 1,70 milhões de metros cúbicos, gerando um lago artificial, que na sua máxima extensão, poderá ascender a 17 hectares. A disponibilidade da água de rega será de 671.000 m³ anuais. A gestão da

água será feita, pelo Estado de Cabo Verde, através do Instituto Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos (INGRH), atualmente designada Agência Nacional de Água e Saneamento - ANAS.

Relativamente à geometria a Barragem de Poilão, classifica-se como sendo uma barragem de gravidade. Por sua dimensão e característica é uma grande barragem, visto que se trata de uma estrutura com uma altura superior a 15 m (medida a partir do ponto mais baixo da fundação), e por outro lado, a capacidade da albufeira é superior a 1 milhão de m³.

O clima da Ribeira Seca enquadra-se no âmbito do clima geral da ilha de Santiago. Em relação aos elementos que diretamente têm interferência no projeto, destacamos: a alternância de uma longa estação seca, geralmente de oito a nove meses e a concentração da estação húmida, de Agosto a Outubro.

Constitui elemento de realce, a concentração real das precipitações durante um número reduzido de dias. No entanto, existem anos de precipitação quase nula – são os anos de seca, que nas últimas décadas tem sido frequente. Também, persiste uma redução expressiva, dos quantitativos totais, anuais, nos últimos cem anos, para todo o arquipélago.

A Ribeira Seca é uma das principais bacias irrigadas da ilha de Santiago. Desde o início dos anos 60 do século passado XX, a exploração de águas subterrâneas vem sendo feita através dos poços. Recentemente, o sistema de exploração por furos passou a ser uma forma privilegiada de extração da água subterrânea. No entanto, a persistência da seca conduziu, a grande maioria dos furos e poços, a um processo de diminuição de caudal da água ou a um processo de salinização, pelo excesso de exploração. Neste último caso, sobretudo na zona do litoral. A Figura 7.16 ilustra a geometria e vistas da barragem de Poilão – de jusante e de montante e albufeira.

Figura 7.16 – Barragem de Poilão – vista de jusante (à esq.) e vista de montante e albufeira (à dir.).



Fonte: Acervo pessoal do Autor.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.1. Classificação das Barragens em termos Potencial de Risco (PR), Critério de Risco (CRI) e de Dano Potencial Associado (DPA)

Conforme estipulado na resolução da ANA nº 236 (2017) o PAE é exigido para barragens de Classes A e B, para barragens novas, antes do início do primeiro enchimento, a partir de quando deverá estar disponível para utilização.

Com base nesta recomendação da ANA, apresenta-se primeiramente, a seguir a classificação das barragens em estudo em termos de Potencial de Risco (PR), Categoria de Risco (CRI) e em termos de Dano Potencial Associado (DPA), conforme os critérios apresentados no capítulo da metodologia.

Conforme emanada no capítulo de Introdução, a primeira barragem construída em Cabo Verde, a barragem de Poilão, foi em 2006 na ausência de uma legislação sobre a segurança de barragens. As restantes barragens, Faveta, Figueira Gorda, Salineiro e Saquinho foram construídos em 2013 e a barragem de Flamengos em 2016.

A nível de inspeção realizadas e consideradas nestas avaliações e pontuação levou-se em contas o relatório de Agência Nacional de Água e Saneamento (ANAS) sobre inspeção destas barragens levado a cabo em 2018 e 2019, sendo que o número de anomalias verificadas durante a inspeção e os respetivos Níveis de Perigo (NP) que constam na lista de inspeção é de 0-5 para barragem de Flamengos e, (6-10), para restantes barragens.

O Laboratório de Engenharia Civil de Cabo Verde em parceria com o LNEC de Portugal, um produziu relatório decorrente das ações de formação e capacitação dos Engenheiros Nacionais em 2018, sobre observação, inspeções visuais e coleta de dados das barragens com vista ao controle de segurança.

As principais características destas barragens em estudo já foram apresentadas no Capítulo anterior, Caso de Estudo. O resultado dos cálculos de pontuação de NP das barragens se mostra na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Pontuação NPB das Barragens

Nível de perigo da anomalia	Barragem						
	Faveta	Figueira Gorda	Flamengos	Poilão	Salineiro	Saquinho	
NP	Peso da NP (a)	Peso das quantidades (b)					
Nenhum (0)	0	2	2	0	2	2	2
Atenção (1)	1	2	2	1	2	2	2
Alerta (2)	4	2	2	1	2	2	2
Emergência (3)	9	2	2	0	2	2	2
Pontuação NPB $\Sigma(a \times b)$		28	28	5	28	28	28

Fonte: elaborada pelo autor.

Nota: A Barragem de Flamengos apresenta (0-5) anomalias na lista de inspeção. Restantes Barragens apresentam (6-10) anomalias na lista de inspeção.

De acordo com os resultados da Tabela 8.1, a barragem de Flamengos teve uma pontuação NPB de 5 e as restantes barragens tiveram uma pontuação de NPB de 28. Sendo assim, de acordo com a Classificação da Barragem adotada a partir do NPB, a barragem de Flamengos é classificada em Aceitável e as restantes barragens classificadas como Preocupante, o que significa que a barragem de Flamengos, construída em 2017, não apresenta anomalias significativas e as restantes barragens, por serem mais antigas (de 2006 a 2014), apresentam algumas anomalias, situando-se no nível de Alerta.

Seguindo a metodologia para a classificação das barragens em termos de DPA desenvolvida pela CNRH (2012), seguem nas Tabelas 8.2 a Tabela 8.10, a referida classificação. A Periculosidade (P) é avaliada em função das características apresentadas na Tabela 5.5, cujos parâmetros principais são a dimensão dos reservatórios, tipo da barragem e vazão do projeto. As principais características das barragens em estudo e as informações utilizadas no cálculo das pontuações para determinar os parâmetros das tabelas seguintes estão apresentadas na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Periculosidade (P) das barragens em estudo

Barragem	Dimensão da barragem ¹	Reservatório ²	Tipo de barragem ³	Tipo de fundação ⁴	Vazão de projeto ⁵	Total
Faveta	3	3	6	4	2	18
F. Gorda	3	3	6	4	2	18
Flamengos	3	3	6	4	10	26
Poilão	3	3	6	4	10	26
Salineiro	3	3	6	4	2	18
Saquinho	3	3	4	4	2	18

Fonte: elaborada pelo autor.

As outras informações que serviram de base para determinar as pontuações da Vulnerabilidade (V), Tabela 8.3, constam das ações e formação realizadas (em 2018 e em 2019), a nível de acompanhamento, observação e controlo de segurança de barragens em Cabo Verde, organizado pela Agência Nacional de Água e Saneamento (ANAS), Laboratório de Engenharia Civil (LEC) e com forte apoio e colaboração dos Investigadores e Técnicos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) que resultou na produção de relatório e descrição dos aspetos relevantes destas ações de formação sobre o inspeção, observação e controlo de segurança destas barragens.

Por isso, as principais informações relacionadas com a determinação da Vulnerabilidade e outros parâmetros, desde tempo de operação, projeto base (incluindo *As Built*), que localmente chamamos de “Telas Finais”, órgãos hidráulicos e hidromecânicos, percolação, deformações e deterioração dos paramentos e taludes foram bem equacionados e calculados, conforme mostrado na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 – Vulnerabilidade (V) das barragens em estudo

Barragem	Tempo de ⁶ operação	Existência de projeto (<i>As Built</i>) ⁷	Confiabilidade das estruturas vertedouras ⁸	Tomada de água ⁹	Percolação ¹⁰	Deformações, afundamentos e assentamentos ¹¹	Deterioração dos taludes/ paramentos ¹²	Total
Faveta	2	3	3	3	10	2	7	30
F. Gorda	2	3	3	3	6	2	7	23
Flamengos	2	3	3	3	1	0	1	13
Poilão	1	5	3	3	6	2	7	27
Salineiro	2	3	3	3	4	2	7	24
Saquinho	2	3	3	3	6	2	7	26

Fonte: elaborada pelo autor.

Para determinar o parâmetro Importância Estratégica (I), apresentado na Tabela 8.4, foram considerados os critérios relacionados com a capacidade do reservatório, população das localidades a jusante (que constam da Tabela 5.7) e o custo das barragens. As pontuações aplicadas são mostradas a seguir:

Tabela 8.4 – Importância Estratégica (I) das barragens em estudo

Barragem	Volume útil, em hm ³ (A)	População a jusante (B)	Custo da barragem (C)	Total
Faveta	1	2.5	1.2	1.56667
F. Gorda	1	2	1.2	1.4
Flamengos	1	2.5	1.2	1.56667
Poilão	1	2.5	1.2	1.56667
Salineiro	1	2.5	1.2	1.56667
Saquinho	1	2.0	1.2	1.4

Fonte: elaborada pelo autor.

Tendo determinado os parâmetros anteriores tais como Periculosidade (P), Vulnerabilidade (V) e Importância Estratégica (I) e, com base na Equação (5.1), para o cálculo de Potencial de Risco (PR), apresenta-se na Tabela 8.5 o PR das barragens em estudo que resulta na classificação das respectivas barragens.

A barragem de Poilão com maior tempo de operação e inexistência do projeto *As Built*, pertence à classe B (Classe médio de PR com pontuação a situar-se entre 40 e 65) e as restantes barragens (Faveta, Figueira Gorda, Flamengos, Salineiro e Saquinho) pertencem à classe C (Classe normal de PR com pontuação a situar-se entre 25 a 40), conforme a tabela utilizada para esta classificação.

O resultado da classificação quanto à classe de risco baseadas no valor de Potencial de Risco (PR), conforme Tabela 5.13, das barragens em estudo, se encontra na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 – Classificação quanto à classe de risco baseada no valor de Potencial de Risco (PR) das barragens em estudo

Barragem	P	V	(P+V)/2	I	PR	Classe
Faveta	18	30	24	1.57	37.68	C
F. Gorda	18	26	22	1.4	30.8	C
Flamengos	26	13	19.5	1.57	30.615	C
Poilão	26	27	26.5	1.57	41.605	B
Salineiro	18	24	21	1.57	32.97	C
Saquinho	18	26	22	1.4	30.8	C

Fonte: elaborada pelo autor.

Com base nos critérios apresentados nas Tabelas 5.9 a 5.13 para o cálculo de Características Técnicas (CT), cujos aspectos centram-se na geometria, tipo de fundação e tipo de barragem, e o Estado de Conservação (EC), cujos aspectos centram-se sobre estruturas extravasores e de adução, percolação, deterioração e deformação e, Plano de Segurança (PS) em que os aspetos centram-se sobre os projetos incluindo *As Built*, calcula-se o Critério de Risco (CRI)

e Dano Potencial Associado (DPA), das barragens em estudo. O resultado dos cálculos se encontra nas Tabelas 8.6 a 8.9.

Tabela 8.6 – Características Técnicas (CT) das barragens em estudo

Barragem	Altura (a)	Comprimento (b)	Tipo de barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazão de projeto (f)	Total
Faveta	2	2	2	3	3	5	17
F. Gorda	2	2	2	3	3	5	17
Flamengos	2	2	2	3	3	10	22
Poilão	1	2	2	3	2	10	20
Salineiro	1	2	2	3	3	5	16
Saquinho	2	2	1	3	3	5	16

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8.7 – Estado de Conservação (EC) das barragens em estudo

Barragem	Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (g)	Confiab. das Estruturas de Adução (h)	Percolação (i)	Deformações/Recalques (j)	Deterioração talude/paramento (l)	Eclusa (m)	Total
Faveta	4	6	8	5	5	2	30
F. Gorda	4	6	8	5	5	2	30
Flamengos	0	0	5	1	5	1	12
Poilão	4	6	8	5	7	2	32
Salineiro	6	6	8	5	5	2	32
Saquinho	4	6	8	5	5	2	30

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8.8 – Plano de Segurança (PS) das barragens em estudo

Barragem	Existência de documentação de projeto (n)	Estrut. organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem (o)	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p)	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q)	Relat. de inspeção de segurança com análise/interpretação (r)	Total
Faveta	0	8	6	0	5	19
F. Gorda	0	8	6	0	5	19
Flamengos	0	8	6	0	5	19
Poilão	4	8	6	0	5	23
Salineiro	0	8	6	0	5	19
Saquinho	0	8	6	0	5	19

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8.9 – Dano Potencial Associado (DPA) das barragens em estudo

Barragem	Volume total do reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socio-econômico (d)	Total
Faveta					
F. Gorda	1	12	5	4	22
Flamengos	1	12	5	4	22
Poilão	1	12	5	4	22
Salineiro	1	12	5	4	22
Saquinho	1	12	5	4	22

Fonte: elaborada pelo autor.

De acordo com a soma dos pontos de CRI e DPA, determina-se a Tabela 8.10, com o resultado final da avaliação.

Tabela 8.10 – Classificação das barragens segundo a metodologia do CNRH, Brasil

1 - CATEGORIA DE RISCO (CRI)	Faveta	F. Gorda	Flamengos	Poilão	Salineiro	Saquinho
1 Características Técnicas (CT)	17	17	22	20	16	16
2 Estado de Conservação (EC)	30	30	12	32	32	30
3 Plano de Segurança de barragens (PS)	19	19	19	23	19	19
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC+PS	66	66	53	75	67	65
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO				CRI	
	ALTA				≥ 60 OU EC = 8 ^(*)	
	MÉDIO				35 a 60	
	BAIXO				≤ 35	
2- DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)	22	22	22	22	22	22
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOC.				DPA	
	ALTO				≥ 16	
	MÉDIO				10 < DP < 16	
	BAIXO				≤ 10	

RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:

CATEGORIA DE RISCO (CRI)	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Alta
DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

Fonte: elaborado pelo autor.

(*) Pontuação (8) em qualquer coluna de Estado de conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

Conforme aprestado na Tabela 8.10, as barragens de Faveta, Figueira Gorda, Poilão, Salineiro e Saquinho são classificadas em termos de Categoria de Risco (CRI) como sendo Alta com pontuação superior a 60, sendo a barragem de Flamengos classificada em Categoria de Risco Médio, com pontuação que varia entre 35 e 60.

Em termos de Dano Potencial Associado (DPA), todas as seis barragens em estudo somaram uma pontuação superior a 16, pelo que todas elas apresentam um Dano Potencial Associado (DPA) Alto, o que, conforme a resolução da ANA nº 136 e 2017, estas barragens enquadram no grupo das barragens que serão exigidos a elaboração de Plano de Ação de Emergência, conforme matriz de classificação apresentada na Tabela 8.11.

Tabela 8.11 – Matriz Categoria de Risco e Dano Potencial Associado

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	-
MÉDIO	B	B	-
BAIXO	-	-	-

Fonte: elaborada pelo autor.

8.2. Hidrogramas de ruptura das barragens

Na Tabela 8.12 e Figuras 8.1 a 8.6, estão ilustrados os resultados de simulação hidrológica pelo programa HEC-HMS (no *Dam Break*), obtidos para as barragens de Faveta, Flamengos, Figueira Gorda, Poilão, Salineiro e Saquinho.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que, para barragem de Faveta, a vazão efluente (*outflow*) passou de 1.683 m³/s para 225 m³/s o que corresponde uma descida de armazenamento (*storage*) de 727.000 m³ a uma elevação de 234.8 m, para 285.000 m³ e uma cota máxima (*elevation*) de 234.8 m para 210 m. Observa-se que a elevação de ruptura é superior ao Nível de Máxima Cheia (NMC=234,10 m).

Para a barragem de Flamengos, a vazão efluente (*outflow*) teve uma redução de 878,4 m³/s para 452 m³/s, o que corresponde um esvaziamento da barragem de um volume de armazenamento (*storage*) de 1208.000 m³ à uma elevação de 185.7 m, para 400.000 m³, com uma elevação superior ao Nível de Máxima Cheia, NMC, que é de 185,20 m.

Para barragem de Figueira Gorda a vazão efluente passou de 844 m³/s para 538 m³/s e o volume de armazenamento de 1952.000 m³ à cota de elevação de 94,7 m, para 435.000 m³, portanto superior ao Nível de Máxima Cheia, NMC, que é de 94,20 m.

Relativamente aos resultados obtidos para barragem de Poilão, com maior volume de armazenamento de todos, 1297.000 m³, tem uma vazão efluente (*outflow*) de 2886,8 m³/s à cota 121,6 m, superior à cota ao Nível de Máxima Cheia, NMC, que é de 120 m.

A barragem de Salineiro apresenta um volume de armazenamento (*storage*) no valor de 861.300 m³ à cota 258,4 m e uma vazão efluente no valor de 227,3 m³/s, à uma cota superior ao NMC, que é no valor de 258 m.

Finalmente a barragem de Saquinho com um volume de armazenamento inferior às outras barragens, no valor de 613.000 m³, correspondente a uma vazão efluente (*outflow*) no valor de 401 m³/s à uma cota de elevação no valor de 315,4 m superior ao NMC que é no valor de 315,25 m.

Com os resultados da simulação obtidos, todos hidrogramas de ruptura apresentam vazões efluentes à cota de elevação superiores às cotas de Nível de Máxima Cheia, NMC, das barragens em estudo. Estudos recentes com resultados semelhantes sobre a análise de risco de ruptura de barragens em Cabo Verde, foram desenvolvidos por, Silva e Fernandes, (2020), conforme ilustrados resumidamente na Tabela 8.12.

Tabela 8.12 – Resultados de simulação dos Hidrogramas de ruptura com o HEC-HMS

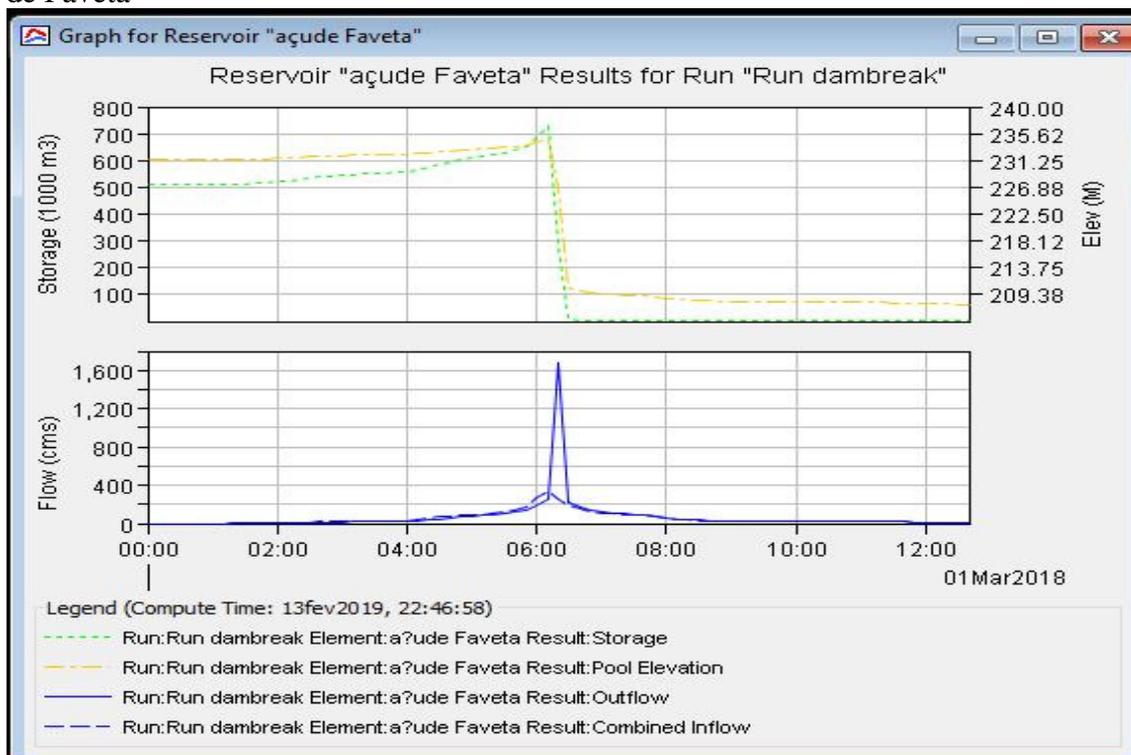
Barragem	Vazão afluente máx. (m ³ /s)	Tempo chegada (h)	Vazão de rup- tura (m ³ /s)	Vo- lume x 10 ³ (m ³)	Distân- cia (km)	Cota, NMC (m)	Eleva- ção máx. (m)	Veloci- dade máxima (m/s)
Faveta	328,4	2.1	1682,6	726,7	13.5	234,1	234,8	10
F. Gorda	570,7	2.9(1)	843.8	1952,1	5.5	94,2	94.7	8.9
Flamengos	438,6	2(1.7)	878.4	1207,7	7.6	185,2	185,7	9
Poilão	891,3	7(5.5)	2886.8	1297,2	7.5	120	121,6	5.1
Salineiro	166,8	0.5(0.45)	227.3	861,3	4.9	258	258,4	14.5
Saquinho	315,7	0.71	401.2	613,1	7.0	315,2	315,4	11.4

Fonte: elaborada pelo autor.

Nota: os valores entre parênteses são tempos efetivos de chegada de onda ao mar.

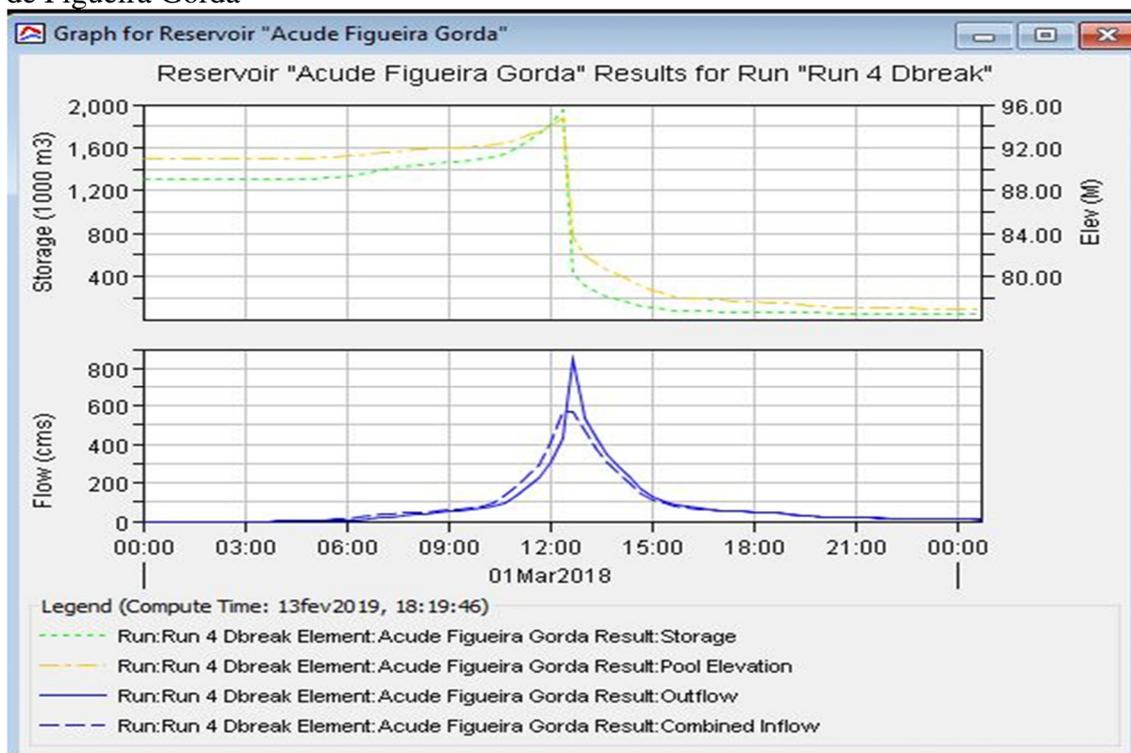
As principais características de hidrogramas de cheia de ruptura para período de retorno de 1.000 anos, calculados automaticamente pelo programa HEC-HMS (simulação no *Dam Break*), encontram-se mostradas nas Figuras 8.1 a 8.6.

Figura 8.1 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Faveta



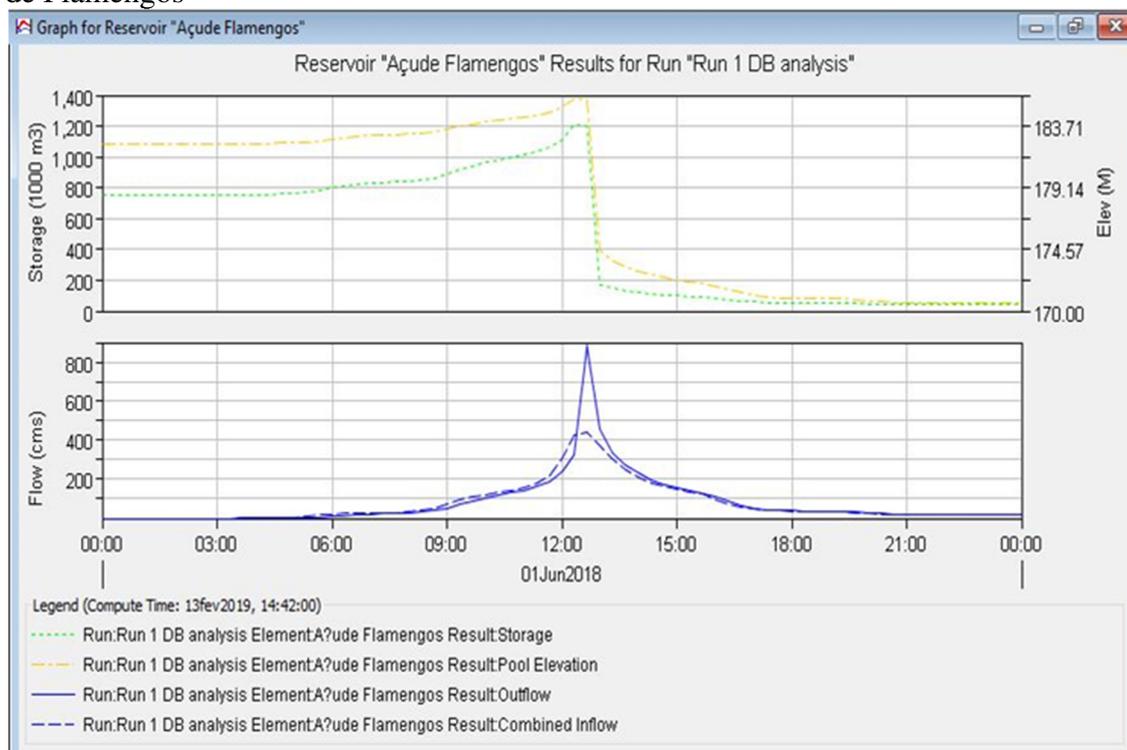
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.2 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Figueira Gorda



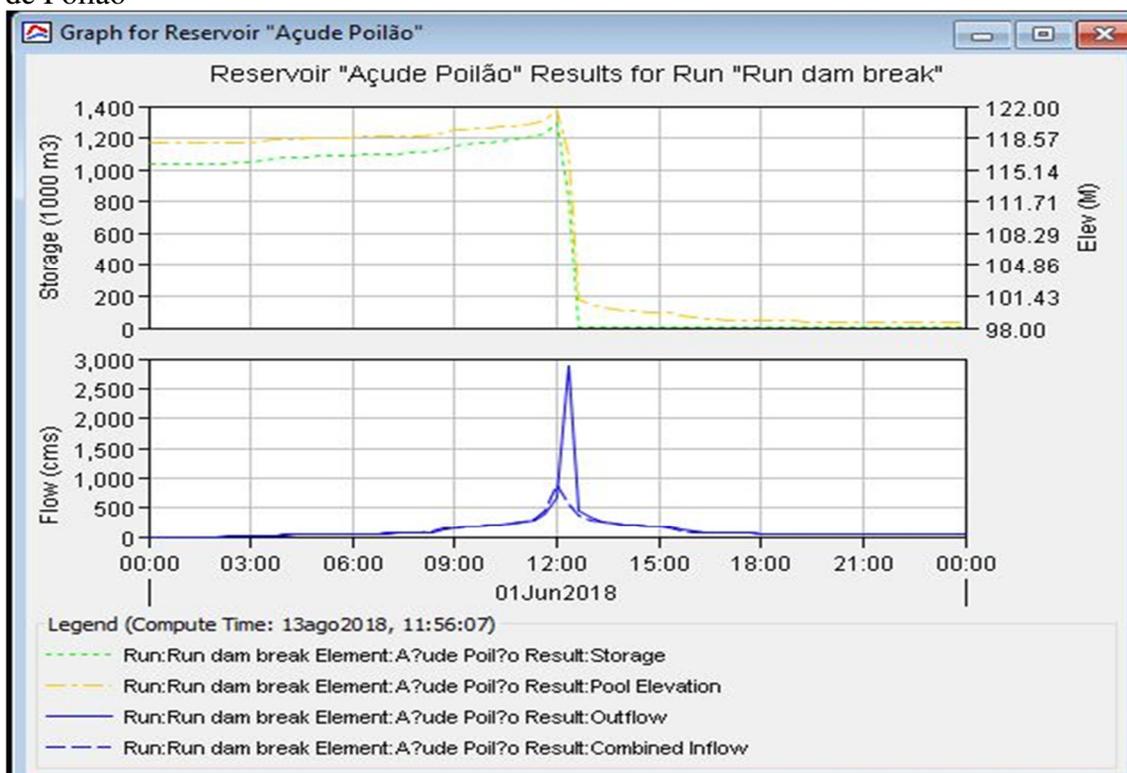
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.3 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Flamengos



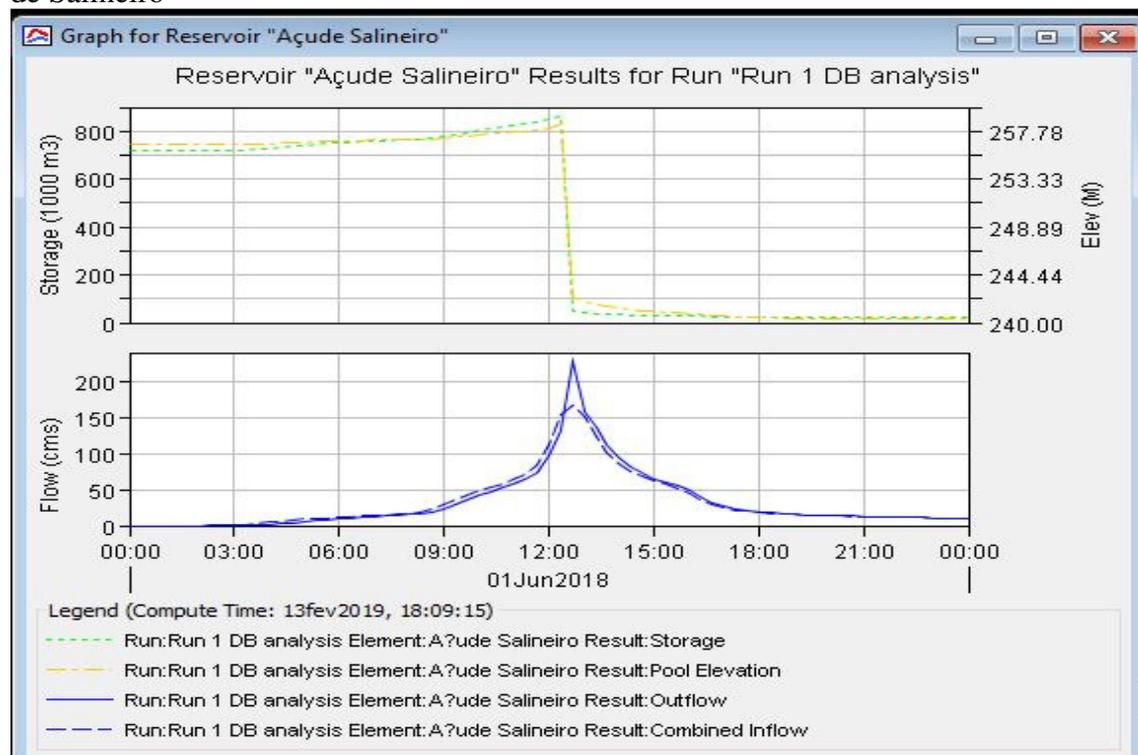
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.4 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Poilão



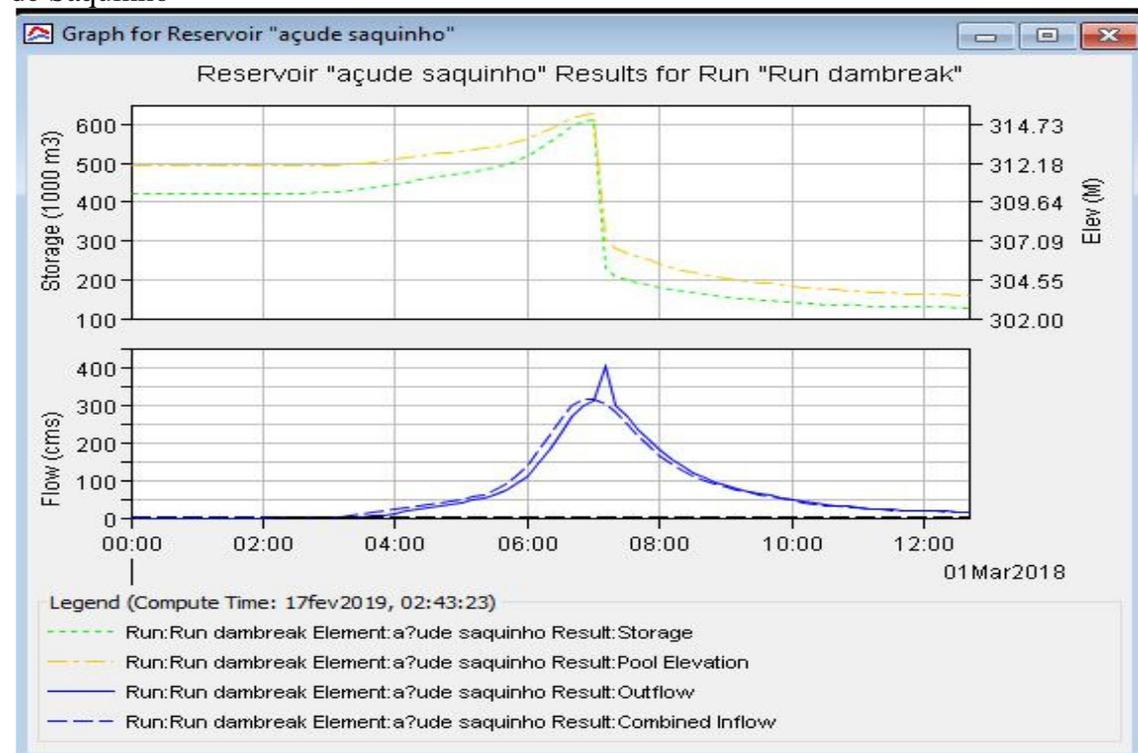
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.5 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Salineiro



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.6 – Hidrograma de ruptura para período de retorno de 1000 anos para barragem de Saquinho



Fonte: elaborado pelo autor.

8.3. Tempos de chegada e Velocidades de onda de inundação simulados no HEC-RAS

As Figuras 8.7 a 8.18 ilustram os gráficos de tempo de chegada (*Arrival time*) e velocidades de ondas de ruptura das barragens de Faveta, Flamengos, Figueira Gorda, Salineiro e Saquinho, com base na modelagem hidráulico-hidrológica, considerando o cenário de ruptura com a barragem à cota máxima *maximorum* (acima da cota de elevação de NMC), com uso dos *softwares* HEC-HMS e HEC-RAS.

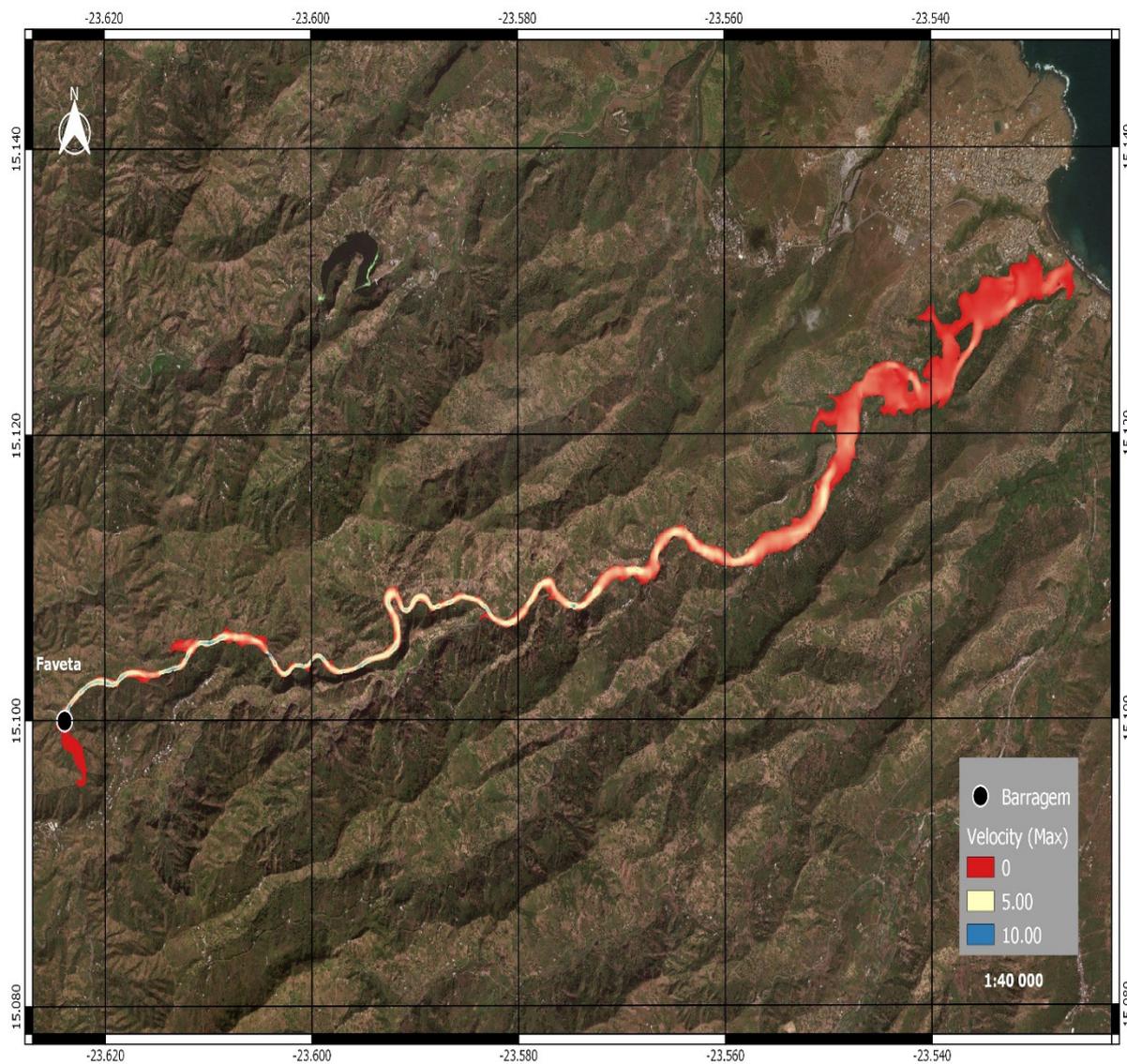
O tempo de chegada e a velocidade são parâmetros importantes para avaliação do impacto da onda de inundação no vale a jusante de barragens e são parâmetros que melhor se ajusta aos propósitos do planejamento de emergência já que são eles que condiciona o tempo disponível para os agentes de proteção civil atuarem a nível de atendimento das emergências.

Figura 8.7 – Barragem de Faveta - Tempo de Chegada (2.1 horas)



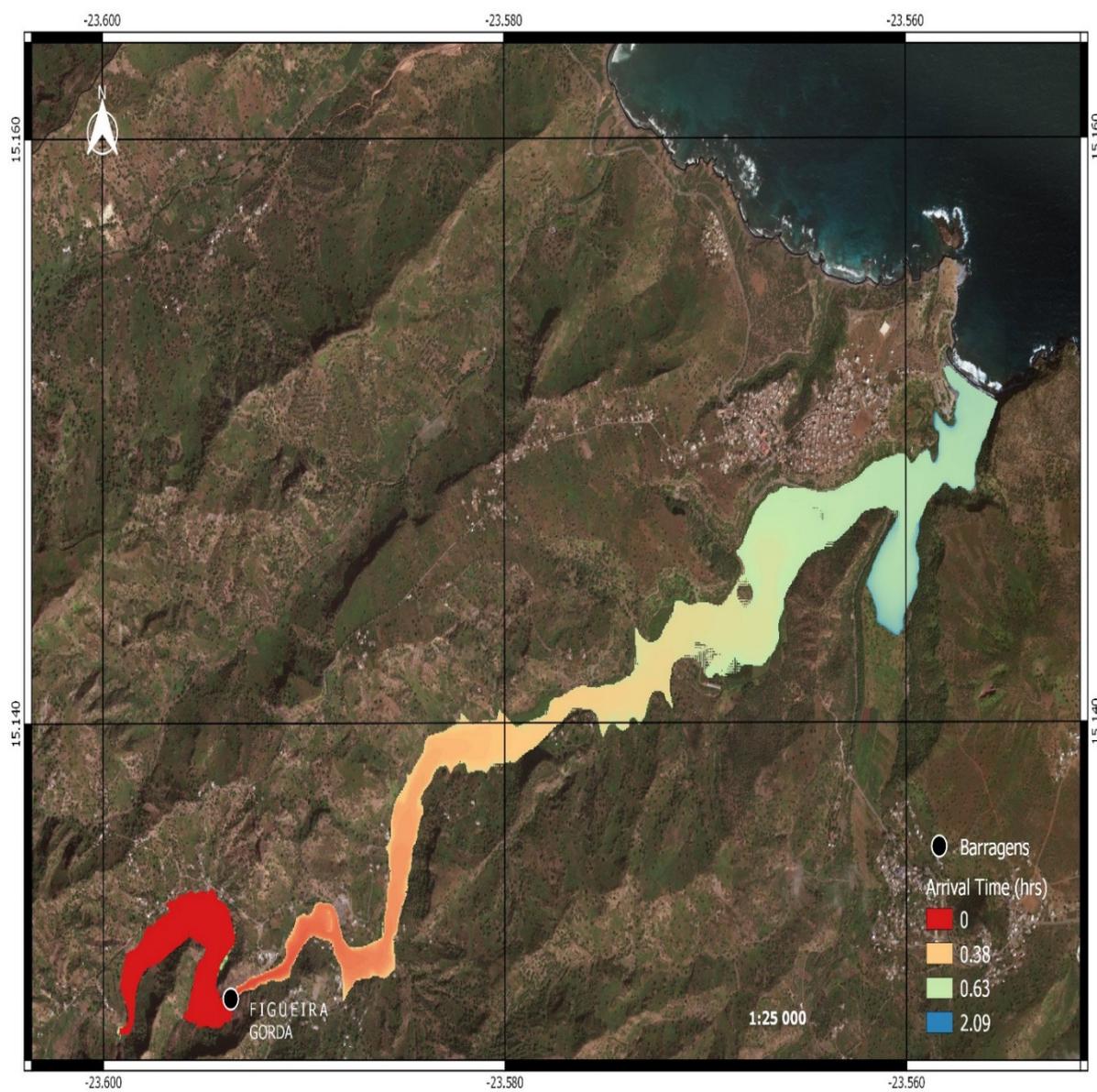
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.8 – Barragem de Faveta - Velocidade (10.1 m/s)



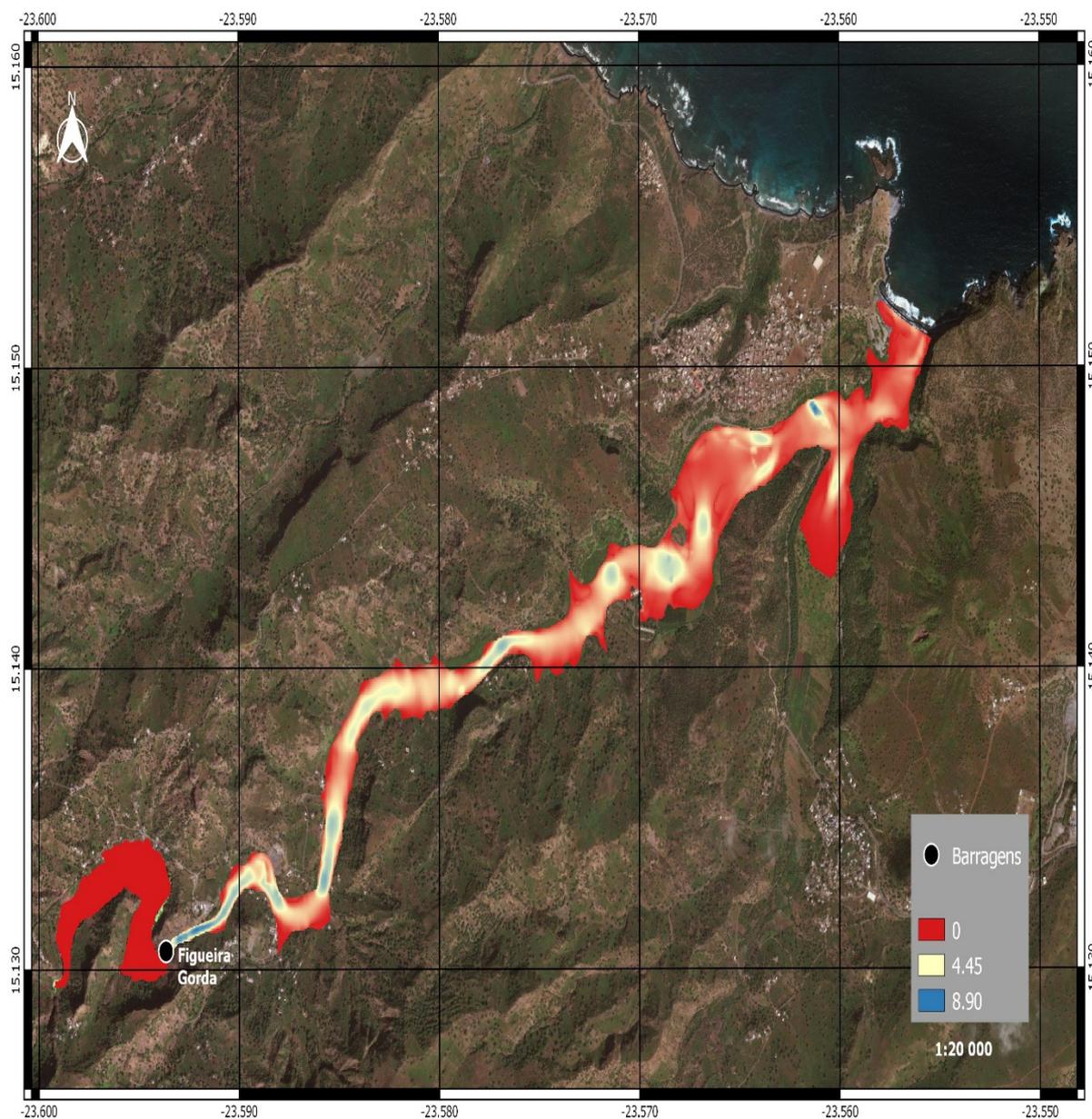
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.9 – Barragem de Figueira Gorda - Tempo de Chegada (1 hora)



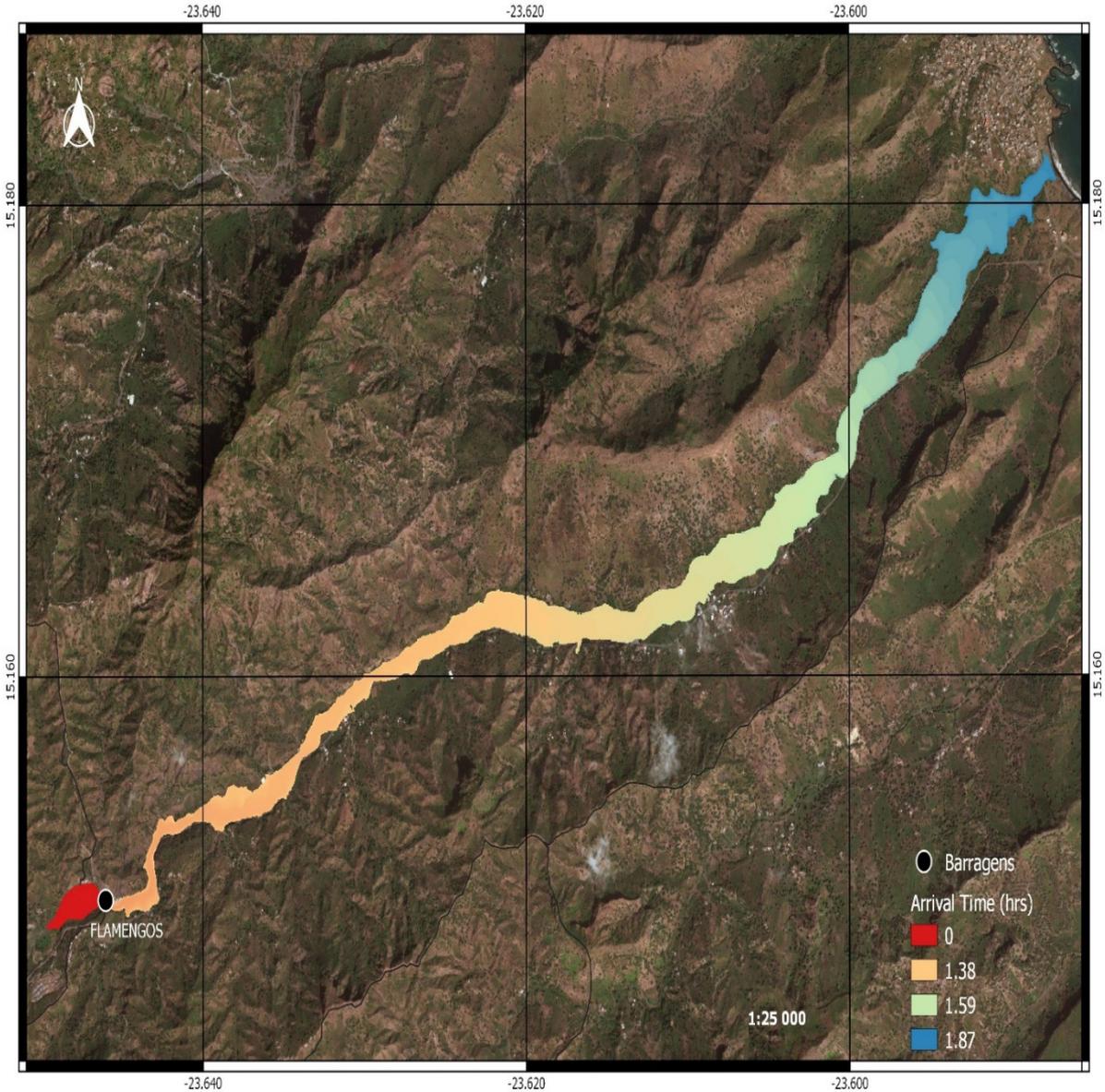
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.10 – Barragem de Figueira Gorda - Velocidade (8.9 m/s)



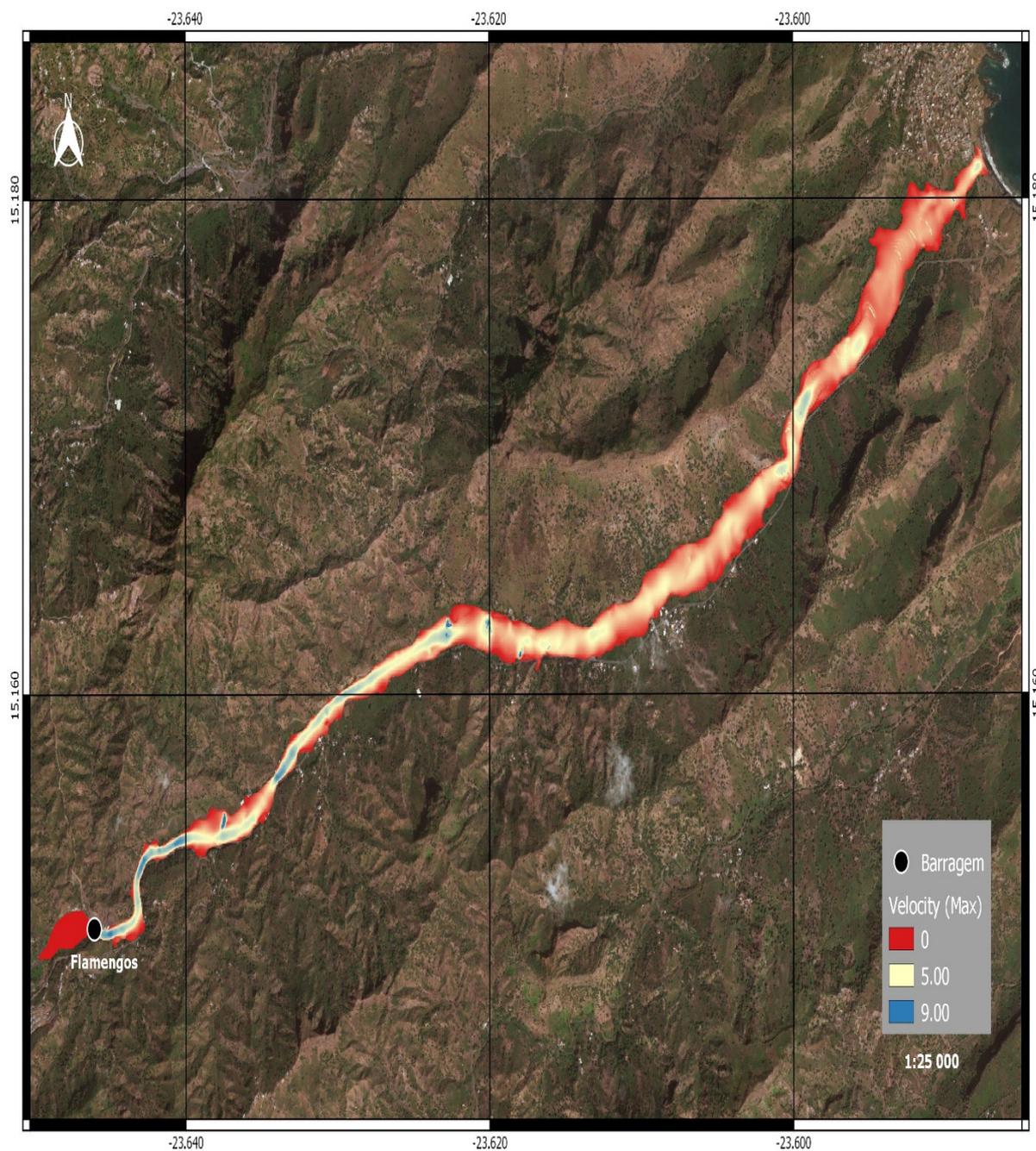
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.11 – Barragem de Flamengos - Tempo de Chegada (1.7 horas)



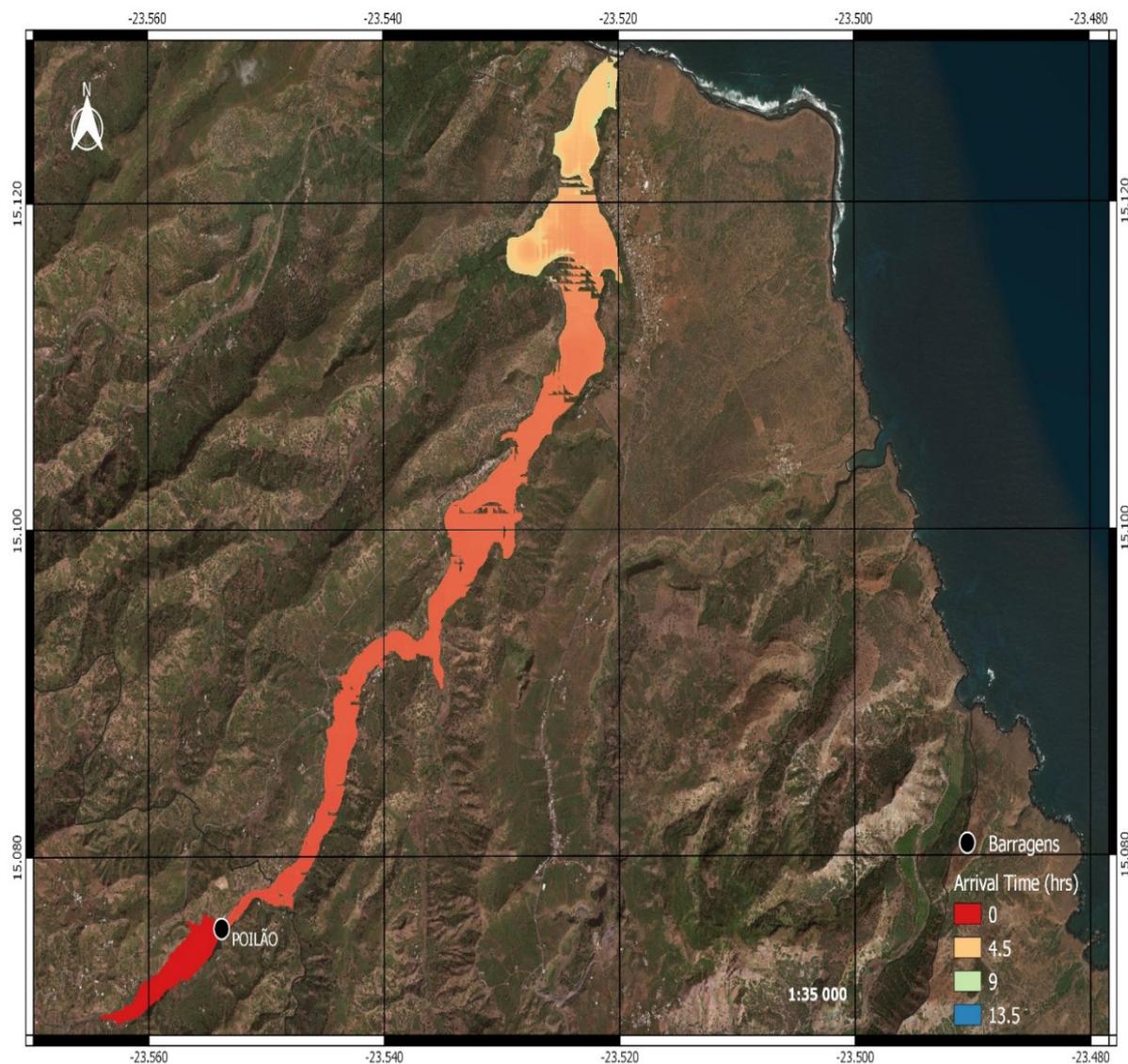
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.12 – Barragem de Flamengos - Velocidade (9 m/s)



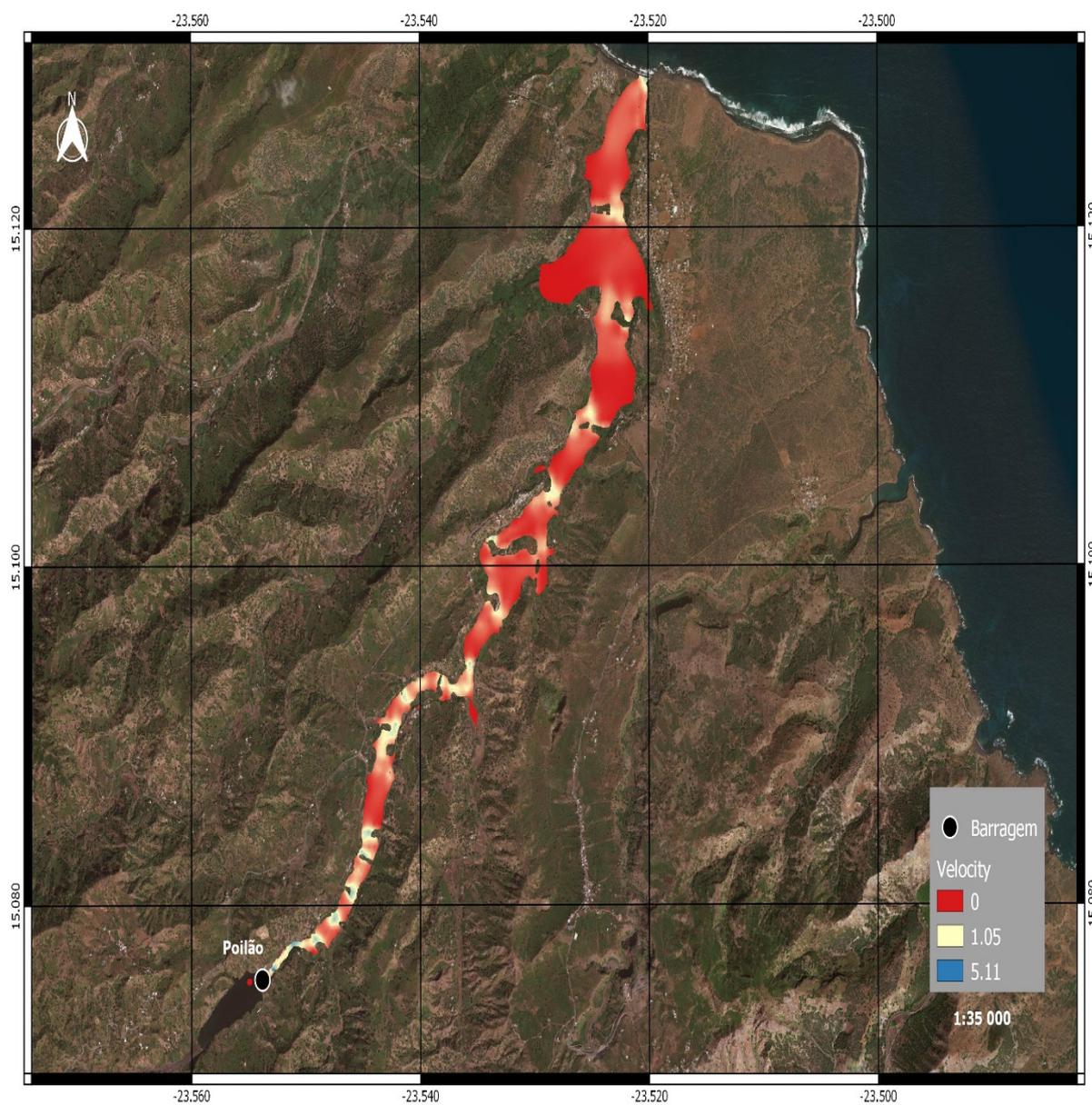
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.13 – Barragem de Poilão - Tempo de Chegada (7 horas)



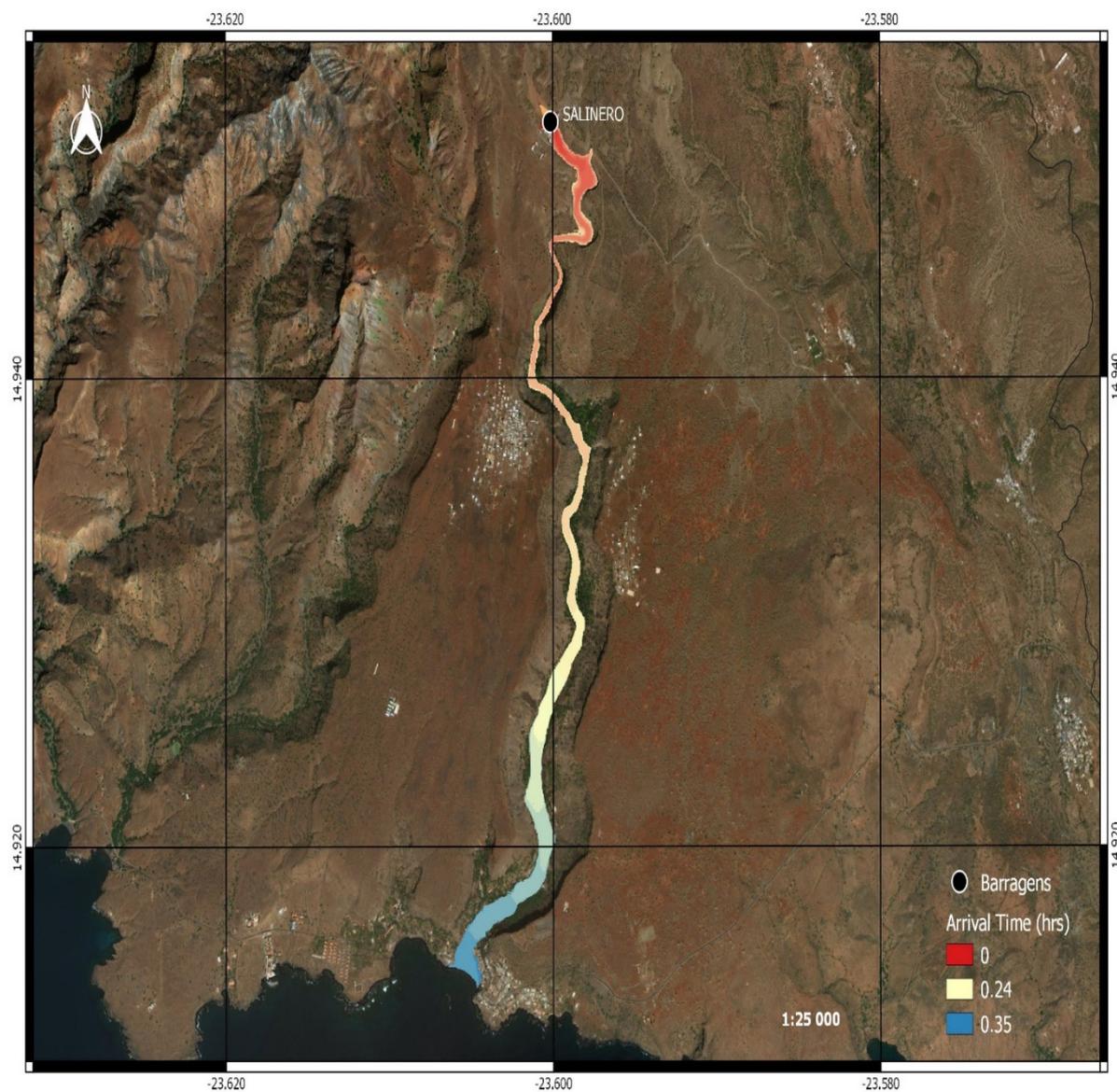
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.14 – Barragem de Poilão - Velocidade (5.1 m/s)



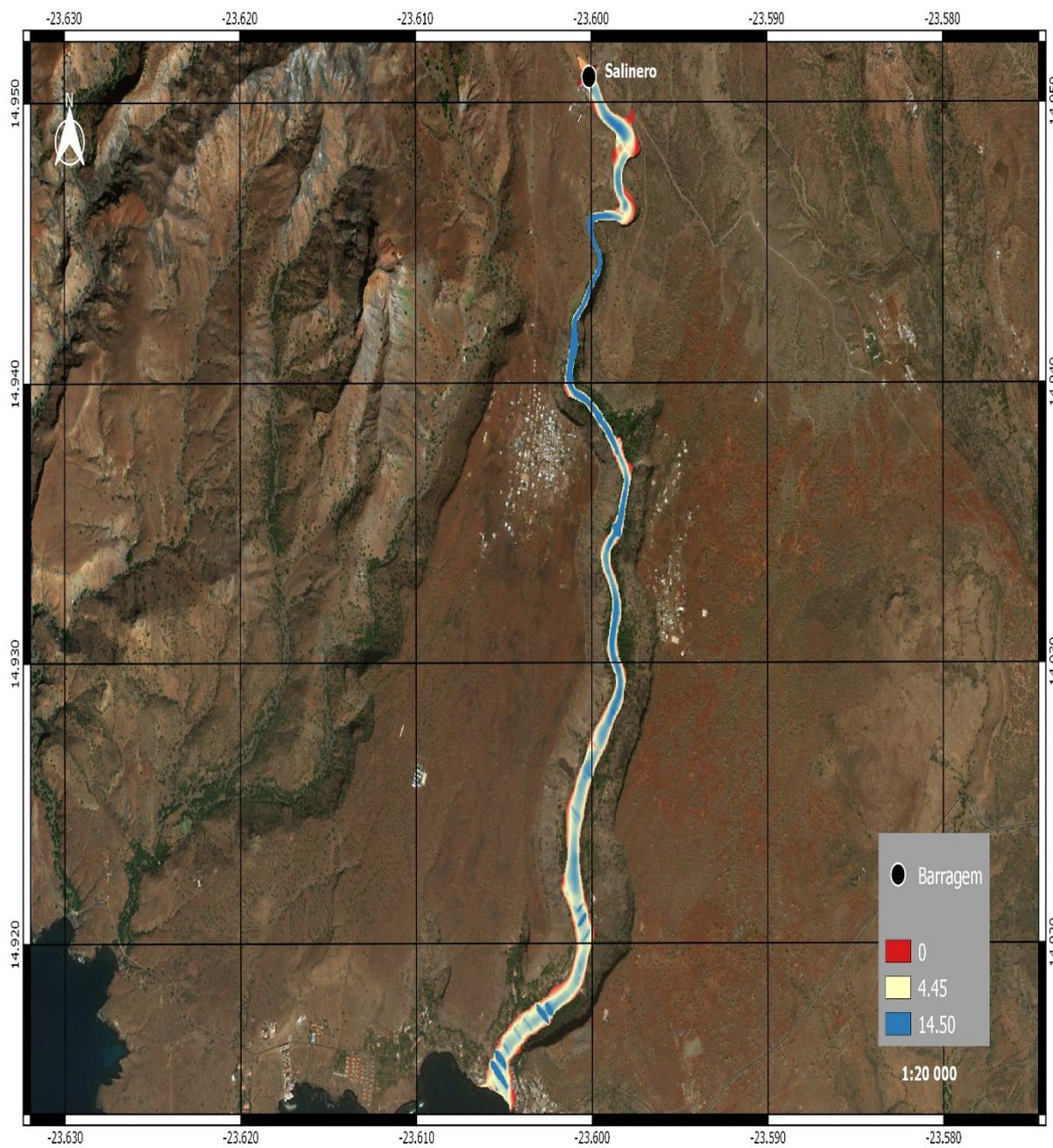
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.15 – Barragem de Salineiro - Tempo de Chegada (0,35 horas)



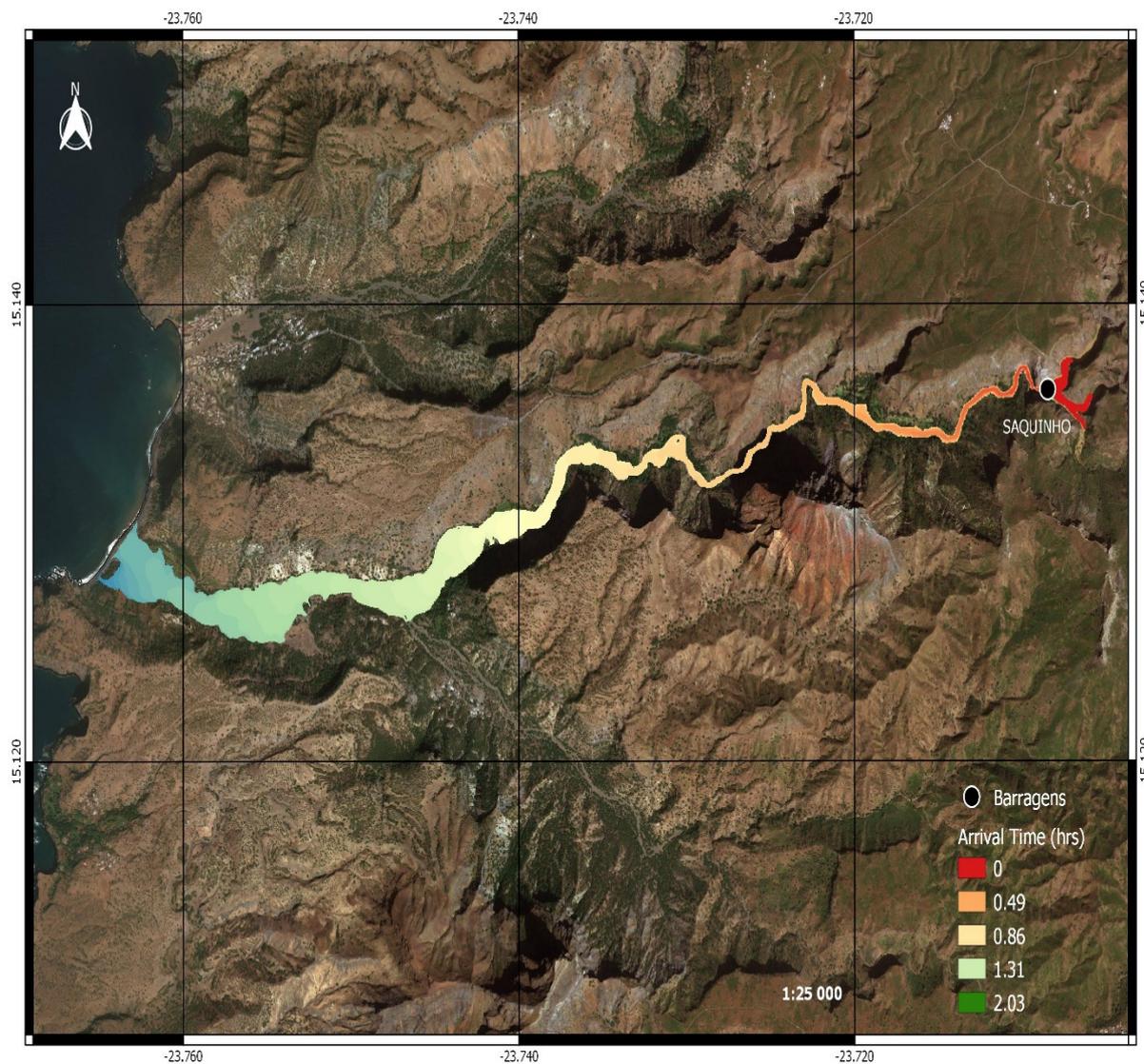
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.16 – Barragem de Salineiro - Velocidade (14,5 m/s)



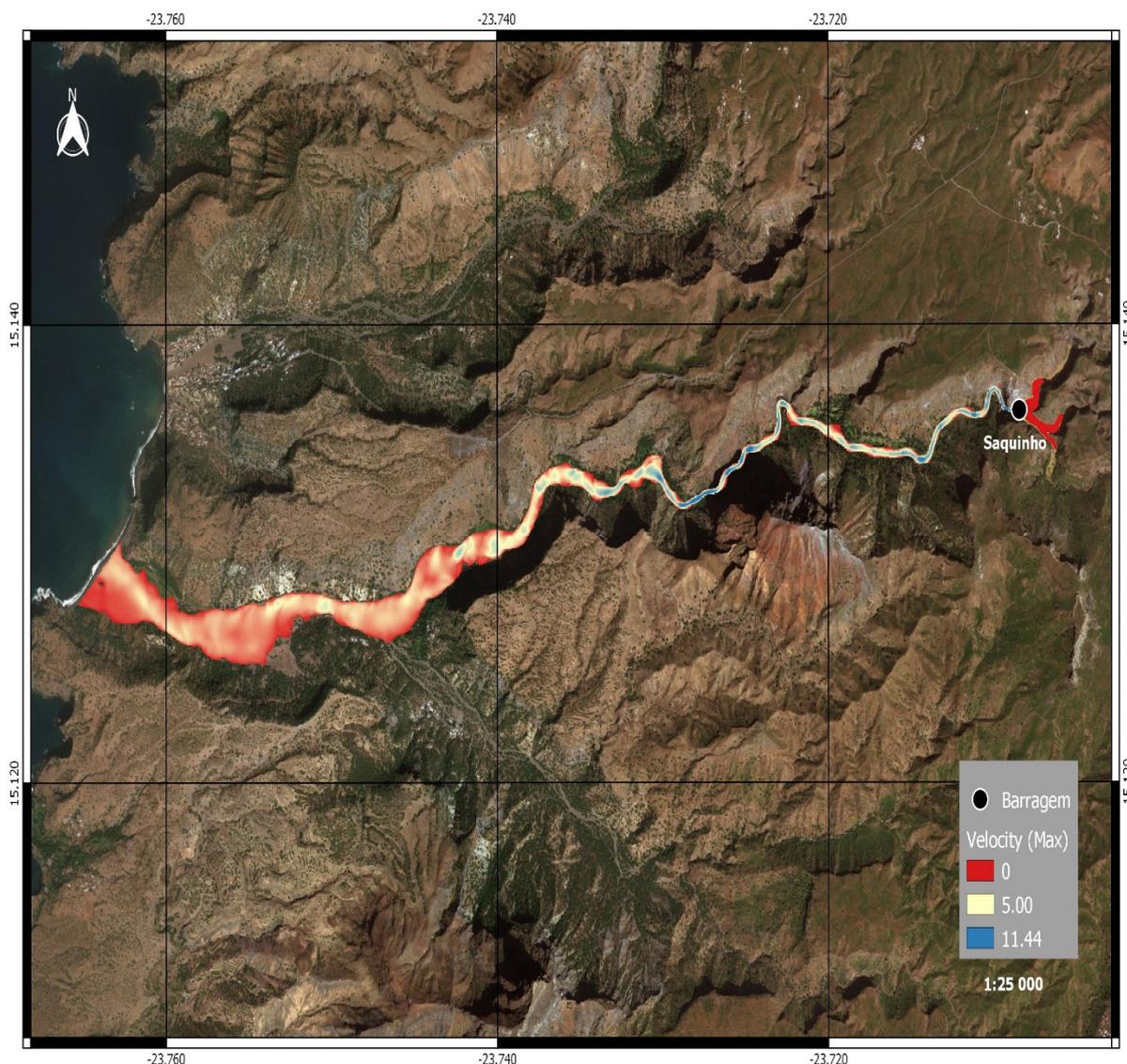
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.17 – Barragem de Saquinho - Tempo de Chegada (0,71 horas)



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.18 – Barragem de Saquinho - Velocidade (11,44 m/s)



Fonte: elaborado pelo autor.

Observando os gráficos dos resultados obtidos, a barragem de Faveta apresenta um tempo de chegada, t_{cheg} , no valor de 2,1 horas e uma velocidade de onda de ruptura no valor de 10 m/s. Esta barragem apresenta ainda uma distância ao longo do vale a jusante, portanto, o comprimento da linha de água principal da bacia hidrográfica de Ribeira de Picos, no valor de 13,5 km, a maior distância das barragens em estudo.

Por outro lado, a barragem de Salineiro apresenta uma menor distância (4,9 km), ao longo da linha de água principal da bacia hidrográfica de Ribeira Grande de Santiago, por isso o seu tempo de chegada de onda de ruptura ao mar, t_{cheg} , é muito reduzido, de 23 min com uma velocidade máxima de 14,5 m/s.

A barragem de Figueira Gorda, também tem uma distância da barragem ao mar muito reduzida com comprimento de 5,5 km, por isso o seu tempo de chegada da onda de ruptura ao mar é no valor de 1 hora (mas a onda de ruptura demora um tempo máximo de 2,9 horas a espalhar-se pelas ribeiras e planícies do vale a jusante) e velocidade é no valor de 8,9 m/s.

A barragem de Flamengos apresenta um tempo máximo de chegada de onda de ruptura no valor de 2 horas, mas demora apenas 1,7 horas a atingir a comunidade com uma velocidade de 9 m/s.

A barragem de Poilão apresenta o maior tempo de chegada de onda de ruptura no valor de 7 horas, mas a onda demora 5,5 horas para atingir a comunidade e 13 horas para espalhamento completo nas planícies, a uma velocidade de 5,1 m/s.

Em função do tempo de chegada da onda de ruptura e velocidade às comunidades à jusante, foram caracterizadas três zonas diferentes para cada vale a jusante:

- Zona com $t_{\text{cheg}} \leq 30$ min;
- Zona com $30 \text{ min.} \leq t_{\text{cheg}} \leq 1$ hora e 2 horas; e
- Zona com $t_{\text{cheg}} \geq 2$ horas.

Na Tabela 8.13, estão apresentados, resumidamente, os tempos de chegadas e velocidades da onda de ruptura das barragens em estudo.

Tabela 8.13 – Tempos de chega e velocidades de onda de ruptura

Barragem	Tempo chegada	Vazão de ruptura	Vazão de chegada	Distância	Velocidade máxima
	(h)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(km)	(m/s)
Faveta	2.1	1682	192.3	13.5	10
F. Gorda	2.9(1)	843.8	369.5	5.5	8.9
Flamengos	2(1.7)	878.2	302	7.6	9
Poilão	7(5.5)	2886.8	252	7.5	5.1
Salineiro	0.5(0.45)	227.3	217.6	4.9	14.5
Saquinho	0.71	401.2	316.7	7.0	11.44

Fonte: elaborada pelo autor.

8.4. Plano de Ação de Emergência – PAE

Esta seção apresenta um Plano de Ação Emergencial – PAE, que compreende uma proposta para o Dono de Obra (que se designa por PEB ou PEI) e uma segunda proposta para

Proteção Civil (que se designa por PEE), conforme as recomendações das legislações internacionais, como, por exemplo, aquelas vigentes no Brasil e em Portugal.

Conforme referido na metodologia, o Plano de Ação de Emergência que se segue, designa-se por PEB e é laborada de acordo com o anexo VI da resolução número 236 de 2017, da ANA e faz parte integrante da Lei nº 12334/2010 que estabelece a política de segurança de barragem no Brasil.

8.4.1. Plano de Emergência da Barragem - PEB

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) na sua resolução nº 143 de 2012 no seu Art. 1º, estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 2010 e que determina que as barragens destinadas à acumulação de águas para quaisquer usos, classificadas como de Dano Potencial Alto, devem apresentar um Plano de Ação Emergencial (PAE).

Por outro lado, com base nas informações da Agência Nacional de Água e Saneamento (ANAS), sobre os aspetos relevantes de inspeção, observação e controlo de segurança de barragens em Cabo Verde nos anos de 2018 e 2019, suportadas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC), conseguiu montar a lista de inspeção para classificação das barragens em termos de Categoria de Risco (CRI) e em termos de Dano Potencial Associado (DPA), conforme ilustrado na Tabela 8.10.

Com base nos resultados da Tabela 8.10, verifica-se que todas as barragens estudadas apresentam um CRI Alto, exceto a Barragem de Flamengos que apresenta a CRI Médio. Relativamente ao Dano Potencial Associado (DPA), todas as barragens estudadas apresentam um DPA Alto.

Assim, conforme descrito acima e com base na Lei 12.334, essas barragens estudadas devem apresentar um Plano de Ação de Emergência (PAE), que será descrito a seguir.

1) Conteúdos do PAE/PEB

1. Apresentação e objetivo do PEB;
2. Identificação e contatos do Empreendedor, do Coordenador do PAE/PEB e das entidades constantes do Fluxograma de Notificação;
3. Descrição geral da barragem e estruturas associadas, incluindo acessos à barragem e características hidrológicas;
4. Recursos materiais e logísticos na barragem;
5. Classificação das situações de emergência em potencial conforme Nível de Resposta;
6. Procedimentos de notificação (incluindo o Fluxograma de Notificação) e Sistema de Alerta;
7. Responsabilidades no PAE/PEB (empreendedor, Coordenador do PAE, equipe técnica e Defesa Civil);
8. Síntese do estudo de inundação com os respectivos mapas, indicação da ZAS e pontos vulneráveis potencialmente afetados;
9. Plano de Treinamento do PAE/PEB;
10. Meios e recursos disponíveis para serem utilizados em situações de emergência em potencial;
11. Formulários de declaração de início da emergência, de declaração de encerramento da emergência e de mensagem de notificação;
12. Relação das entidades públicas e privadas que receberam cópia do PAE/PEB com os respectivos protocolos de recebimento.

2) Apresentação e Objetivos

Pela definição, o Plano de Ação de Emergência (PAE) é o documento relativo a emergências de proteção civil que especifica o conjunto de medidas integrando a avaliação dos danos potenciais associados à onda de inundação e os procedimentos a adotar pelos diferentes intervenientes, com vista a minimizar o seu impacto.

A resolução nº 236 da ANA 2017, no anexo II, volume VI apresenta uma metodologia de elaboração do Plano de Ação de Emergência conforme mostrado na Tabela 5.15 (Conteúdo Mínimo e Nível de Detalhamento do Plano de Segurança de Barragem), apresentada no Capítulo 5.

Conforme este mesmo regulamento, Capítulo VI, Seção I, Art.º 21 e 22 respectivamente, o PAE será exigido para barragens de Classes A e B, conforme Matriz de Classificação constante do Anexo I. O PAE deverá contemplar o previsto no artigo 12 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e seu nível de detalhamento deve seguir o estabelecido no Anexo II. Parágrafo único. Para as barragens com altura inferior a 15 m e capacidade do reservatório inferior a 3.000.000 m³, a ANA, a seu critério, poderá aceitar a apresentação de estudo simplificado para elaboração do mapa de inundação.

Na Seção II, Art. 23, 24 e 25, respectivamente, este regulamento diz que o PAE deverá ser elaborado, para barragens novas, antes do início do primeiro enchimento, a partir de quando deverá estar disponível para utilização e que o PAE deverá ser atualizado anualmente nos seguintes aspectos: endereços, telefones e e-mails dos contatos contidos no Fluxograma de Notificação; responsabilidades gerais no PAE; listagem de recursos materiais e logísticos disponíveis a serem utilizados em situação de emergência; e outras informações que tenham se alterado no período.

Parágrafo único. É de responsabilidade do empreendedor a divulgação da atualização do PAE e a substituição das versões disponibilizadas aos entes constantes dos incisos do artigo 26.

A ANA 2017, ainda destaca que o PAE deverá ser revisado por ocasião da realização de cada RPSB.

Parágrafo único. A revisão do PAE implica reavaliação da ocupação a jusante e da eventual necessidade de elaboração de novo mapa de inundação.

No seu Art. 26, afirma que o PAE, quando exigido, deverá estar disponível, além do estabelecido no artigo 9:

- I – na residência do coordenador do PAE;
- II – nas prefeituras dos municípios abrangidos pelo PAE;
- III – nos organismos de Defesa Civil dos municípios e estados abrangidos pelo PAE;
- e
- IV – nas instalações dos empreendedores de barragens localizados na área afetada por um possível rompimento.

Parágrafo Único. O empreendedor deve atender às solicitações de informações adicionais de autoridades públicas, para fins de esclarecimento do conteúdo do PAE.

Objetivos

Os principais objetivos do PAE são:

- a) A descrição e caracterização da barragem e do vale a jusante e a montante, incluindo referência a eventuais barragens construídas na mesma bacia hidrográfica;
- b) A consideração dos principais cenários de acidente estabelecidos no projeto;
- c) A definição dos mapas de inundação, com a caracterização das ondas de inundação para os cenários de acidente considerados, incluindo o cenário de ruptura da barragem;
- d) A caracterização das populações, bens e ambiente em risco nas zonas afetadas pela onda de inundação, para o cenário de acidente mais desfavorável;
- e) A avaliação dos danos potenciais associados ao cenário de acidente mais desfavorável;
- f) A indicação nos mapas de inundação, para cada aglomerado populacional ou bem material ou ambiental a preservar, dos instantes de chegada da frente e do pico da onda de inundação, dos níveis máximos atingidos em termos de cota e altura da onda, da velocidade máxima, do caudal máximo e do tempo de duração da fase crítica da inundação;
- g) A definição dos locais de refúgio das populações em caso de iminência de um acidente;
- h) A definição do plano de ação em situação de emergência, com identificação dos procedimentos a adotar.

3) ENTIDADES ENVOLVIDAS NO ORGANIZAÇÃO DE CONTROLO DE SEGURANÇA DE BARRAGEM

Conforme o regulamento RSBCV (proposta não aprovada), atualmente em Cabo Verde, na ausência de legislação oficial sobre a Segurança de Barragens, as entidades envolvidas no Controlo de Segurança de Barragens são:

- Governo através de Ministério de Agricultura e Ambiente (MAA) e Ministério de Infraestrutura, Habitação e Ordenamento do Território (MIHOT); e
- Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros (SNPCB);

As estruturas do MAA envolvidas na Organização de Controlo de Segurança de Barragem são:

- Direção Geral de Agricultura, Silvicultura e Pecuária (DGASP) com representação em todos os Municípios de Cabo Verde através de Delegações de Agricultura e Ambiente (DMAA);

- Agência Nacional de Água e Saneamento (ANAS); e
- Direção Nacional de Ambiente (DNA).

A estrutura do MIHOT envolvida na Organização de Controlo de Segurança de Barragem é o Laboratório de Engenharia Civil (LEC);

O Dono de Obra, neste caso é o MAA com as suas estruturas (DAGSP, ANAS e DMAA), entidade pública, responsável direto pelos estudos, construção e exploração da barragem e gestão de água das albufeiras. A ANAS é responsável pelo Plano de Observação e Regras de Exploração e rigoroso cumprimento do Plano de Segurança.

A DNA, na qualidade de responsável nacional por questões ambientais elabora Estudos de Impacte Ambiental e Socioeconómico e os Planos de Segurança Ambiental; Pronuncia-se sobre os Planos de Ordenamento das zonas limítrofes das albufeiras; Acompanha, também a construção e exploração das obras do ponto de vista do impacte ambiental.

Compete ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC), em coordenação com ANAS, às seguintes atribuições:

- a) Apreciar os projetos das barragens, designadamente no que se refere à aplicação do presente regulamento relativa aos planos de segurança;
- b) Analisar a classificação de classe de risco proposta no Projeto e proceder à sua revisão após o primeiro enchimento da albufeira e a cada dez anos ou por solicitação do Dono de Obra;
- c) Emitir parecer sobre o Plano de Observação e sobre as Regras de Exploração, documentos integrantes do Plano de Segurança constante do projeto, e comunicar esse parecer ao Dono de Obra;
- d) Emitir parecer sobre o Plano de Primeiro Enchimento, ou de reenchimento após esvaziamento prolongado da albufeira, elaborado pelo Dono de Obra,
- e) Acompanhar a construção das obras e controlar a execução dos Planos de Segurança e de Primeiro Enchimento, comunicando ao Dono de Obra eventuais inconformidades;
- f) Acompanhar o comportamento das barragens ao longo da sua vida, comunicando ao Dono de Obra eventuais anomalias; e
- g) Analisar os relatórios do comportamento das barragens, elaborados sob responsabilidade do Dono de Obra posteriormente ao primeiro enchimento e ao primeiro período de exploração normal e informar ao Dono de Obra dos resultados dessa análise.

Compete ao SNPCB analisar, por solicitação do Dono de Obra, os Planos de Emergência integrantes dos Planos de Segurança constantes dos projetos das obras, complementando-os quando necessário e estabelecendo a coordenação com outras entidades ligadas aos procedimentos de proteção civil, entre as quais a Associação Nacional de Municípios (ANM) e as Câmaras Municipais dos conselhos de implantação das barragens.

O SNPCB determinará a instalação de sistemas de aviso quando considerado adequado, estando-lhe ainda reservado o poder de ordenar a sua ativação e nas condições que entender fixar.

Compete ao SNPCB coordenar as atividades de proteção civil no caso de calamidade, de ocorrência de um acidente com uma barragem ou da sua iminência.

Relativamente aos contatos das Entidades, como todas elas são estruturas do Governo de Cabo Verde, encontra-se no site: www.gov.cv.

Entrando no site do Governo procura-se as Entidades de acordo com o Ministério acima referido, incluindo os contatos dos celulares.

4) DESCRIÇÃO DE BARRAGEM TIPO GRAVIDADE E ESTRUTURAS ASSOCIADAS. ASPECTOS DE SEGURANÇA. ACESSOS.

Silva e Fernandes (2020) afirmam que os projetos das barragens de Faveta, Figueira Gorda, Flamengos, Poilão, Salineiro e Saquinho, na ilha de Santiago em Cabo Verde, foram elaborados por contratação em lotes que ensejou a que estes fossem elaborados de forma similar em metodologia de cálculo, de parâmetros de projeto e desenho e que empregaram a mesma metodologia de dimensionamento hidrológico e o mesmo padrão de projeto geométrico, variando-se apenas as características dimensionais das barragens conforme a bacia hidrográfica em que estavam inseridas.

As barragens, cujo PAE está em desenvolvimento, são todas do tipo gravidade, sendo que a barragem de Saquinho é em concreto gravidade e as restantes barragens (Faveta, Figueira Gorda, Flamengos e Salineiro) são em alvenaria de pedra argamassada.

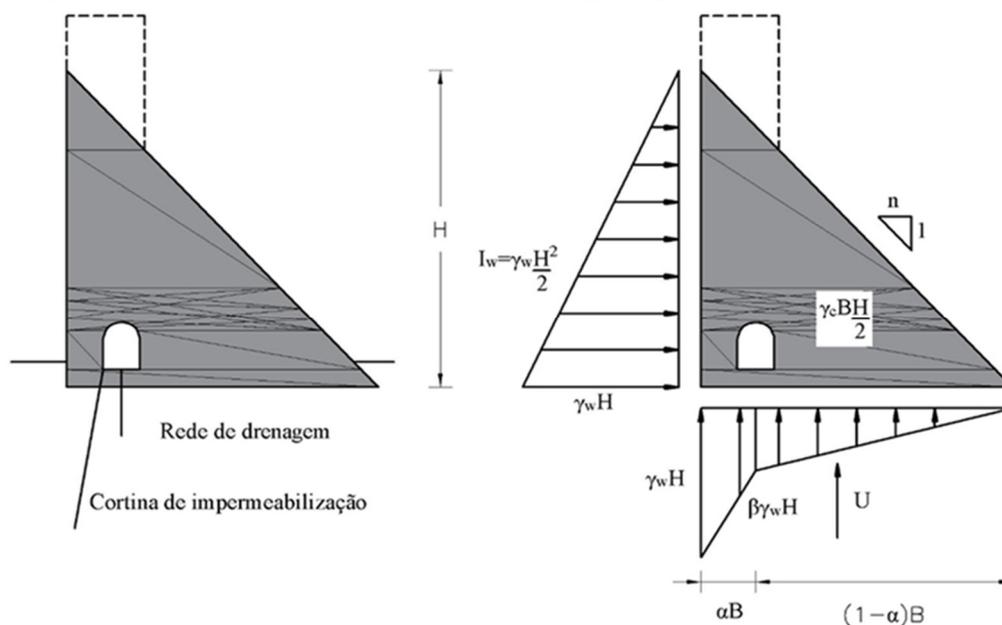
As barragens do tipo gravidade são estruturas que são concebidas para resistir às restantes ações (ações da água e sísmicas) mobilizando apenas o seu peso próprio. A seção transversal típica é aproximadamente triangular, sendo a planta reta ou ligeira curvatura em planta. A geometria e os projetos das Barragens em Cabo Verde são todos semelhantes e todas

elas apresentam o mesmo design construtivo e perfil transversal, conforme apresentado no capítulo 7.

Um dos problemas que afetam grandemente a estabilidade global das barragens gravidade é a Subpressão e a Percolação. A subpressão pode ser entendida como o esforço exercido em uma estrutura ou em sua fundação, no sentido ascendente, em função da pressão decorrente da percolação de água através dos maciços de concreto, rochoso ou de terra.

Marques Filho (2005) afirma que o entendimento da ação da subpressão, no final do século XIX revolucionou o futuro dos tratamentos de fundações de barragens. A execução de vedações com cortinas de injeção de cimento, associadas com drenagem, passou a ser, desde então, de suma importância para a segurança e viabilidade econômica das obras, tendo a sua execução e tratamento através de galerias de injeção e de drenagem, conforme mostra a Figura 8.19.

Figura 8.19 – Perfil transversal tipo de barragem gravidade



Fonte: Adaptado de LEC/LNEC (2018).

Os critérios e aspetos de segurança das barragens e obras hidráulicas e a operacionalidade dos seus equipamentos, são de suma importância pelo fato que todos os elementos que compõem a barragem devem ser objeto de preocupação. Vários fatores influenciam o grau de risco: localização, altura da barragem, volume de armazenamento, tipo de barragem, geologia local, características sísmicas da região, magnitude das cheias previsíveis, quantidade e qualidade dos dados em que se baseou o estudo hidrológico e capacidade de vazão das estruturas dos vertedouros.

Silva (2017) afirma que o risco hidrológico das barragens projetadas em Cabo Verde foi verificado a partir de três condicionantes básicos que afetaram diretamente o dimensionamento do vertedouro das três barragens, objeto da pesquisa:

- a inexistência de estações fluviométricas para estudo das vazões escoadas nas bacias;
- a diminuta extensão das séries históricas de precipitação máximas diárias, normalmente inferiores a 30 anos de dados para a maioria dos postos pluviométricos da Ilha de Santiago (de acordo com os dados de precipitação do INMG, (2017));
- a diversidade de fórmulas empregadas para o cálculo do tempo de concentração nas bacias em estudo, na elaboração dos projetos das barragens.

DESCARREGADOR DE CHEIAS

O descarregador de cheias da barragem de Figueira Gorda foi construído sobre a parte central do corpo da barragem e tem soleiras do tipo Creager e a crista destas soleiras descarregadoras se situa à cota do NPA. A jusante da soleira, o caudal descarregado escoar-se sobre um canal gradualmente convergente, inclinado a 1V:0,8H, com largura variável terminando num trampolim em salto de esquí.

A solução em salto de esquí é a mais económica, sempre que a fundação da barragem seja feita em rocha sã e que não existam, imediatamente a jusante, infraestruturas que possam ser danificadas pela elevada turbulência do jacto lançado pelo trampolim. É, precisamente, esse o caso das Barragens em estudo.

O canal de descarga sobre o paramento de jusante do descarregador da barragem de Saquinho é convergente e tem o seu rasto constituído por degraus em betão armado. As dimensões dos degraus aumentam no sentido descendente até atingirem valores constantes.

Tal como está estipulado nos Termos de Referência, optou-se pelo período de retorno de 1000 anos para o caudal de dimensionamento do descarregador de cheias. Esse é, também, o período de retorno preconizado pelo Regulamento de Segurança de Barragens Português, para barragens de betão (ou de alvenaria) com mais de 100.000 m³ de armazenamento e altura máxima acima da fundação compreendida entre 15 e 50 m, como é o caso das Barragens de Figueira Gorda, Faveta, Salineiro e Saquinho, enquanto que para as barragens de Flamengos e Poilão optou-se por um período de retorno inferior a 500 anos.

A soleira descarregadora é do tipo perfil Creager da soleira descarregadora livre foi definido pela seguinte expressão na Equação (8.1), apropriada para paramento de montante vertical:

$$y = 0.50H_0(x/H_0)^{1.85} \quad (8.1)$$

em que:

H_0 – carga hidráulica de dimensionamento da soleira; e

x, y – coordenadas do perfil mergulhante nas direções horizontal e vertical, com início na crista da soleira.

O tipo de descarregador de cheias das barragens gravidade em estudo é apresentado na Figura 8.20.

Figura 8.20 – Descarregador de cheias e tipo de Vertedouro (perfil Creager)



Fonte: Acervo pessoal do Autor.

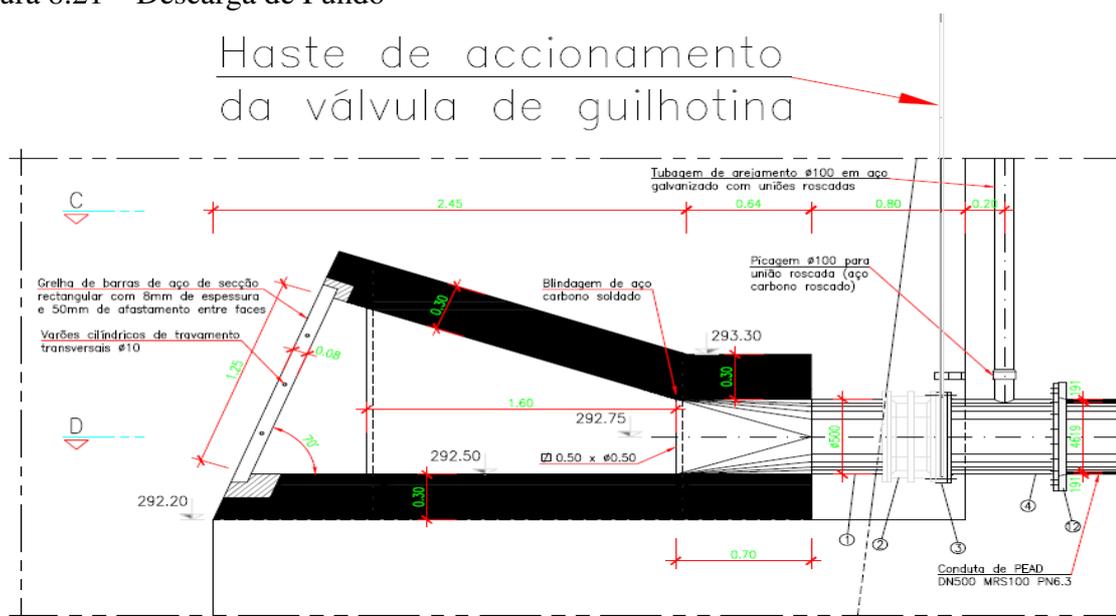
DESCARGA DE FUNDO E TOMADA DE ÁGUA

A Descarga de fundo foi dimensionada de forma a permitir o esvaziamento da albufeira num período de tempo não superior a duas semanas. Na Barragem de Figueira Gorda tal dimensionamento conduziu à escolha de uma conduta DN500 e à instalação, na extremidade de jusante da mesma, de uma válvula de regulação de caudal DN500. Assim, preconiza-se que a conduta DN500 da descarga de fundo (assim como para as outras Barragens) seja utilizada como desvio provisório na fase de construção, o que, em princípio, será suficiente para limitar os períodos em que os trabalhos terão que ser interrompidos, por os caudais afluentes serem excessivos.

A descarga de fundo terá a seguinte constituição, de montante para jusante, conforme, também, apresentada na Figura 8.21:

1. Estrutura de tomada de água na albufeira saliente em relação ao paramento montante do corpo da barragem, equipada com uma grelha metálica de $1,25 \times 1,25 \text{ m}^2$ de área útil;
2. Transição quadrado-redondo em aço soldado, de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ para DN500;
3. Válvula de guilhotina DN500 com comando manual, por meio de macaco Feugier ou equivalente, instalado no coroamento da barragem;
4. Conduita de PEAD DN500, envolvida em betão e atravessando o corpo da barragem de montante para jusante; e
5. Passa-muros DN500 em ferro fundido, ancorado num maciço de amarração que deverá suportar os esforços gerados pela válvula de borboleta a jusante, quando fechada.

Figura 8.21 – Descarga de Fundo



Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2011).

TOMADA DE ÁGUA

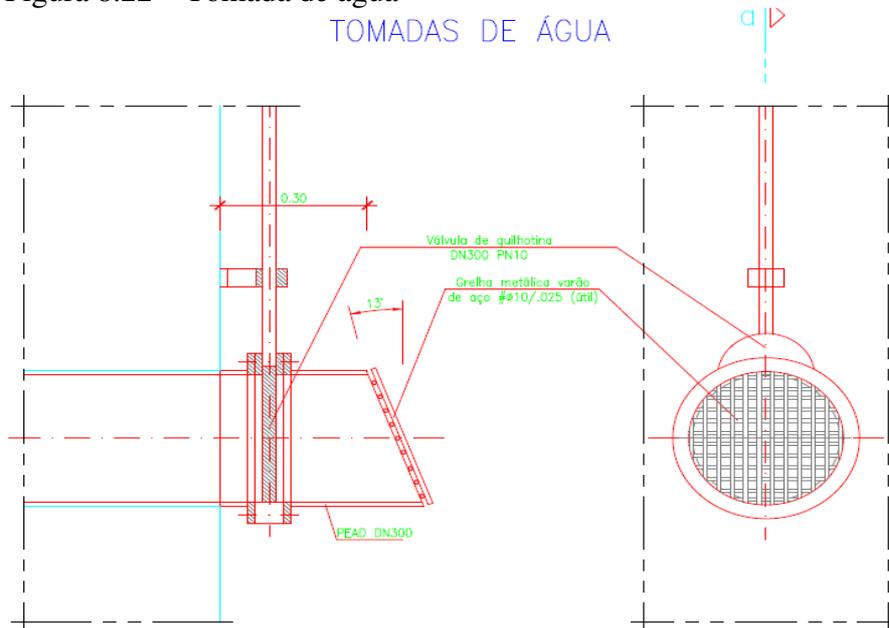
O circuito de tomada de água para rega nas barragens gravidade está incorporado na barragem e ligados à Câmara de Válvulas e/ou à Estação de bombagem (Elevatória) através de tubo Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e acessórios de ligação, diâmetro DN 300 ou DN400, conforme a barragem e terá a seguinte constituição, de montante para jusante:

1. Orifícios de entrada circular com 0,3 m de diâmetro, localizados no paramento de montante da barragem e protegido por grelha metálica fina, seguido de conduita de

- PEAD DN315 embebida no corpo da barragem e terminando numa válvula de isolamento Ø300;
2. Tomada de água de aço DN300 ou DN400, protegida por grelha metálica fina (barras com 10 mm de espessura com eixos espaçados entre si de 25 mm) e obturável mediante uma válvula de guilhotina operada manualmente, por meio de macaco Feugier ou similar, a partir de uma plataforma anexa ao coroamento da barragem;
 3. Troço de conduta de aço DN300, embebida no corpo da barragem;
 4. Junta de transição aço DN300/PEAD DN315 PN6.3;
 5. Tubagem de arejamento de PEAD DN75 PN4; e
 6. Conduta de PEAD Ø315 PN6.3, embebida no corpo da barragem.

A Figura 8.22 ilustra a seção típica de tomada de água incorporada na barragem e ligada à Câmara de Válvulas ou Estação de Bombagem.

Figura 8.22 – Tomada de água



Fonte: elaborado pelo autor.

CÂMARA DE VÁLVULA E ESTAÇÃO DE BOMBAGEM

A Câmara de válvula e Estação de bombagem e muitas vezes também designadas como Estação Elevatória estão conectadas no corpo da barragem no caso da Barragem de Saquinho e nas restantes Barragens (Faveta, Figueira Gorda, Flamengos, Poilão e Salineiro), estão

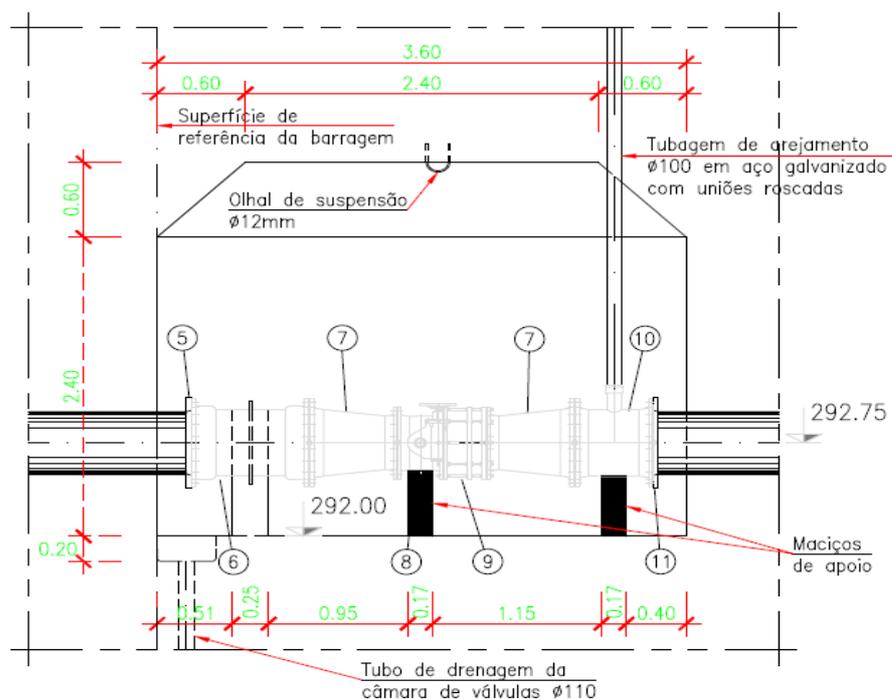
localizados no pé e exterior à barragem, mas só a Barragem de Saquinho apresenta Estação Elevatória porque é concebida para irrigação a montante e a jusante por gravidade.

A constituição de câmara de válvulas no pé e exterior à barragem é a seguinte:

1. Junta de transição PEAD DN315 PN6.3/FFD DN300;
2. Passa-muros de FFD DN300;
3. Válvula de cunha Ø300, de comando manual, com funções de isolamento do circuito;
4. Junta de desmontagem auto-travada DN300;
5. Tê de FFD DN300/DN100;
6. Ventosa de triplo efeito Ø100, para permitir a entrada e a saída de ar durante as operações de enchimento e de esvaziamento da conduta de rega a jusante; e
7. Passa-muros de FFD DN300.

As Figuras 8.23 e 8.24 ilustram a configuração e instalação de equipamentos hidromecânicos tipo das barragens e a respectiva legenda dos equipamentos.

Figura 8.23 – Câmara de Válvula



Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2011).

Figura 8.24 – Legenda de equipamentos

LEGENDA	
①	TROÇO DE CONDUTA DE PEAD DN500 PN10
②	- JUNTA DE DESMONTAGEM AUTO-TRAVADA DN500 PN10
③	- VÁLVULA DE GUILHOTINA DN500 PN10
④	- TROÇO DE CONDUTA DE PEAD DN500 PN10, FLANGEADA NA EXTREMIDADE DE MONTANTE E COM DERIVAÇÃO ROSCADA DN100 PN10
⑤	- JUNTA DE TRANSIÇÃO PEAD DN500 MRS100 PN6.3/FFD DN500
⑥	- PASSA-MUROS DE FFD DN500
⑦	- CONE DE FFD DN500/DN400
⑧	- VÁLVULA DE BORBOLETA DN400 PN10, COM COMANDO MANUAL
⑨	- JUNTA DE DESMONTAGEM DN400 PN10
⑩	- TROÇO DE CONDUTA DE AÇO DN500 PN10, FLANGEADA EM AMBAS AS EXTREMIDADES E COM DERIVAÇÃO ROSCADA DN100 PN10
⑪	- JUNTA DE TRANSIÇÃO AÇO DN500 PN10/PEAD DN500 MRS100 PN6.3
⑫	- JUNTA DE TRANSIÇÃO AÇO DN500/PEAD DN500 MRS100 PN6.3

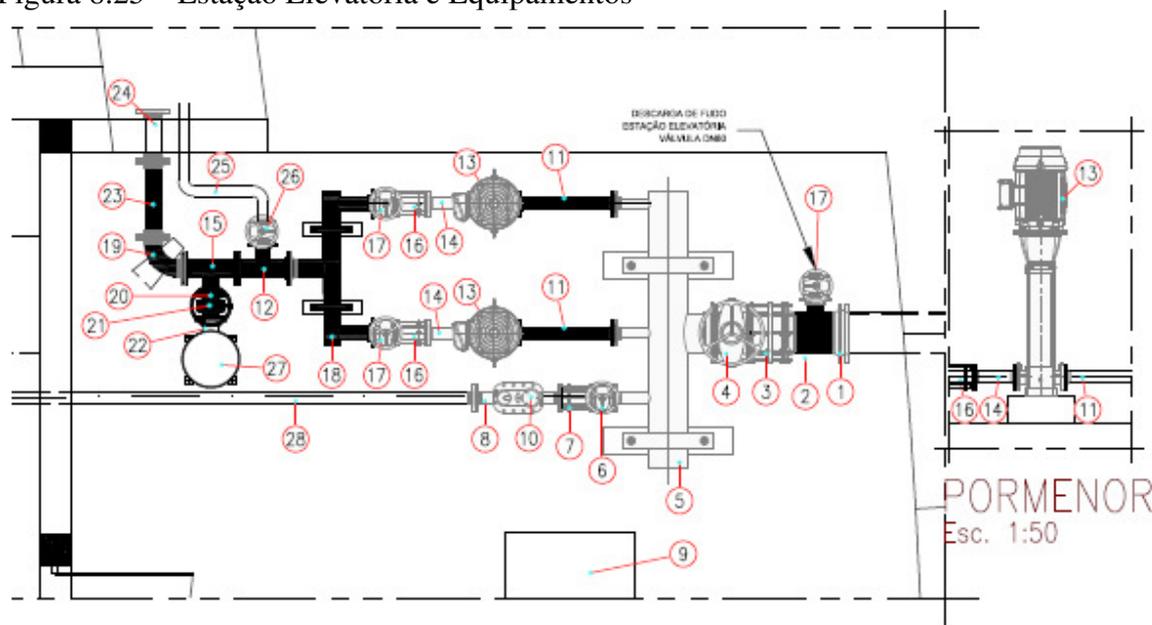
Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2011).

A Estação de bombagem está conectada ao corpo da barragem que por sua vez alberga a instalação de equipamentos hidromecânicos e acessórios de bombagem. O caudal de dimensionamento do circuito de rega é, segundo os Termos de Referência do Concurso, de 55 m³/h, dos quais 45 m³/h deverão ser elevados para dois reservatórios situados cerca de 200 m de cota acima da barragem.

A capacidade para elevar o referido caudal de 45 m³/h a uma altura manométrica de elevação total que, nesta fase, se estimou ser da ordem 208 m.c.a. Os restantes 10 m³/h serão conduzidos graviticamente para terrenos agrícolas situados a curta distância a jusante da barragem.

As Figuras 8.25 e 8.26 ilustram a instalação de equipamentos na Estação Elevatória e a respetiva legenda.

Figura 8.25 – Estação Elevatória e Equipamentos



Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2011).

Figura 8.26 – Legenda da Estação Elevatória e Equipamentos

LEGENDA	
①	- JUNTA DE TRANSIÇÃO PEAD DN300 MRS100 PN6.3/AÇO, DN300 PN10, INCLUINDO STUB-END E FLANGE LOUCA.
②	- TÊ DE FFD DN300/DN80 PN10.
③	- JUNTA DE DESMONTAGEM DN300 PN10.
④	- VÁLVULA DE CUNHA DN300 PN10 COM ACCIONAMENTO MANUAL.
⑤	- COLECTOR DE ASPIRAÇÃO EM AÇO DN300 EQUIPADO COM 3 DERIVAÇÕES DN80 E UMA DERIVAÇÃO DN300. TODAS AS DERIVAÇÕES SÃO PN10 E FLANGEADAS.
⑥	- VÁLVULA DE CUNHA DN80 PN10 COM ACCIONAMENTO MANUAL.
⑦	- JUNTA DE DESMONTAGEM DN80 PN10.
⑧	- TÊ DE FFD DN80/DN65 PN10.
⑨	- QUADROS ELÉCTRICOS.
⑩	- VENTOSA TRÍPLO EFEITO DN65 PN25.
⑪	- TROÇO DE CONDOTA DE AÇO DN80 PN10, FLANGEADA EM AMBAS AS EXTREMIDADES.
⑫	- TÊ EM AÇO DN125/DN50 PN25 FLANGEADO.
⑬	- GRUPO ELEVATÓRIO (Nominal=44.2m ³ /h, Hnominal=200.4m.c.a.).
⑭	- TROÇO DE CONDOTA DE AÇO DN80 PN25, FLANGEADA EM AMBAS AS EXTREMIDADES.
⑮	- TÊ EM AÇO DN125/DN100 PN25 FLANGEADO.
⑯	- JUNTA DE DESMONTAGEM DN80 PN25.
⑰	- VÁLVULA DE CUNHA DN80 PN16 COM ACCIONAMENTO MANUAL (DESCARGA DE FUNDO DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA).
⑱	- COLECTOR DE COMPRESSÃO EM AÇO DN125 PN25 EQUIPADO COM 2 DERIVAÇÕES DN80 E UMA DERIVAÇÃO DN125. TODAS AS DERIVAÇÕES SÃO PN25 E FLANGEADAS.
⑲	- CURVA A 90° DN100 PN25 FLANGEADA.
⑳	- CURVA A 45° DN100 PN25 FLANGEADA.
㉑	- VÁLVULA DE CUNHA DN125 PN16 COM ACCIONAMENTO MANUAL.
㉒	- CURVA A 90° DN100 PN25 FLANGEADA COM APOIO AO SOLO.
㉓	- TROÇO DE CONDOTA DE AÇO DN125 PN25, FLANGEADA EM AMBAS AS EXTREMIDADES.
㉔	- PASSA MUROS DE AÇO DN125/DN100 PN25.
㉕	- TUBO GALVANIZADO 2" UNIÕES ROSCADAS.
㉖	- VÁLVULA DE CUNHA DN100 PN16 COM ACCIONAMENTO MANUAL E COM PICAGEM TUBO GALVANIZADO 2".
㉗	- RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO (RAC) DE 200 LITROS. DIMENSIONADO PARA UMA PRESSÃO MÁXIMA DE 250 m.c.a. A PRESSÃO INTERNA E O VOLUME DE AR OBEDECERAM À SEGUINTE FORMULA APROXIMADA: $PxV^{1.4}$ (VALOR A DEFINIR) \pm 3%, EM QUE E: P-PRESSÃO ABSOLUTA EM m.c.a. E V-VOLUME DE AR EM m ³ .
㉘	- TROÇO DE CONDOTA DE PEAD DN75.

Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2013).

GALERIA DE INJEÇÃO E DRENAGEM

A Galeria de injeção e Drenagem existe no interior do corpo das Barragens de Faveta, Figueira Gorda, Salineiro e Saquinho e percorre longitudinalmente o corpo da barragem fazendo ligações à Câmaras de Válvulas, Estação de Bombagem e à outros Órgãos e dispositivos de observação e drenagem.

Transversalmente, a galeria será formada por uma seção retangular com 2,00 x 2,80 m, livres. A galeria será limitada a montante pela parede de estanqueidade da barragem. No topo, será circunscrita por uma laje em betão, com 0,50 m de espessura e, a jusante, por uma parede com igual espessura, também em betão.

Dado que o troço de galeria situado na margem esquerda da obra apresenta uma inclinação considerável prevê-se a instalação de um corrimão e a execução de degraus com as seguintes dimensões: espelho - 0,18 m; patim - 0,20 m. A galeria será provida de, apenas, uma entrada no paramento de jusante da barragem.

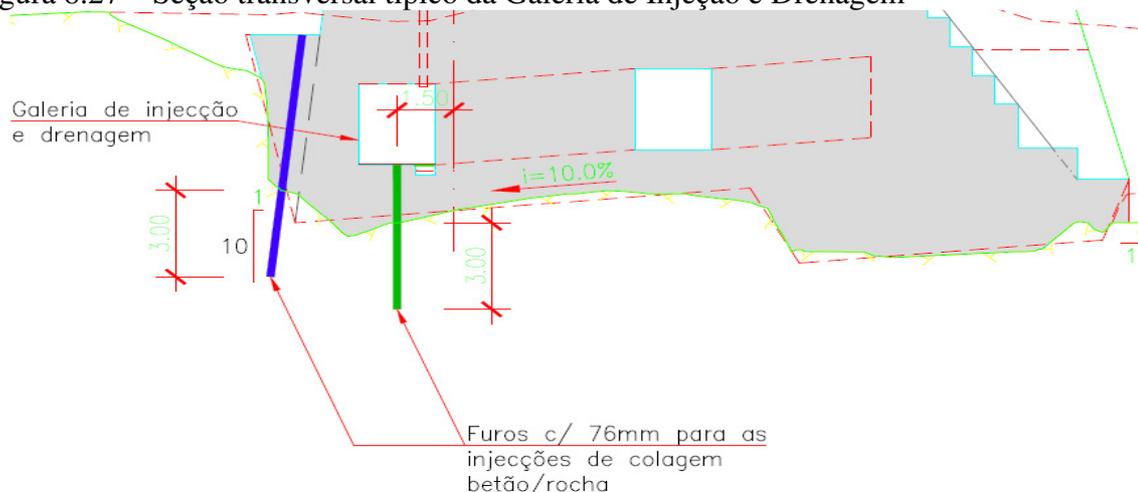
As águas captadas na galeria de injeção e drenagem serão conduzidas por uma cauleira, situada a jusante da mesma, até um poço de drenagem localizado sobre eixo da barragem. As águas recolhidas no dito poço, por sua vez, serão evacuadas graviticamente para jusante por meio de uma conduta de PEAD DN200, envolvida em betão.

Na sua extremidade de jusante, esta conduta será equipada com um *clapet* anti-retorno, também em PEAD, destinado a evitar a inundação da galeria de injeção e drenagem durante episódios de cheia, em que o nível no leito do rio a jusante suba significativamente.

Ao longo da Galeria foram instalados uma rede piezométrica para monitorização do comportamento hidráulico do maciço e das subpressões instaladas, que é integrada no sistema de observação da barragem.

A Figura 8.27 ilustra as características da seção transversal da galeria de injeção e drenagem tipo. Pode se notar que uma das principais funções da Galeria é também assegurar o tratamento de fundação e margens através furos de injeção e colagem betão/rocha.

Figura 8.27 – Seção transversal típica da Galeria de Injeção e Drenagem



Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor (2011).

LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

As Barragens de Faveta, Figueira Gorda, Flamengos, Poilão, Salineiro e Saquinho localizam-se na Ilha de Santiago em Cabo Verde e localizam-se respetivamente nos seguintes Municípios ou Conselhos: São Salvador do Mundo, Santa Cruz, São Miguel, São Lourenço dos Órgãos, Ribeira Grande de Santiago (Cidade Velha) e Santa Catarina de Santiago.

O acesso rodoviário às Barragens, a partir da Cidade da Praia, Capital de Cabo Verde, Ilha de Santiago, poderá ser efetuado, seguindo-se a sequência, Estrada Nacional de Primeira Classe (EN1-ST-01) no sentido Interior da Ilha, pela Estrada Nacional também, de Primeira Classe (EN1-ST-02), no sentido Cidade de Pedra Badejo (Município de Santa Cruz) e seguidamente à Cidade de Calheta (Município de São Miguel), pelo Litoral Oeste da Ilha de Santiago e pela Estrada Nacional de Primeira Classe (EN1-ST-05) no Sentido Litoral Oeste à Município de Ribeira Grande de Santiago também conhecida como Cidade Velha, primeira Cidade Europeia nos Trópicos.

Seguidamente a partir destas Estradas Nacionais de Primeira (EN1) de Segunda (EN2) e de Terceira (EN3) Classes, ligam-se às Estradas Municipais (EM), conforme a designação e classificação oficial da Empresa Estradas de Cabo Verde (ECV), D.L. nº 26/2006 e B.O. nº 06 de Março de 2006.

A localização das Barragens e Acessos às Barragens se encontram apresentados na Tabela 8.14 e ilustrados nas Figuras 8.28 e 8.29.

Tabela 8.14 – Localização e Acessos às Barragens

Informação	Barragem					
	Salineiro	Faveta	Saquinho	Figueira Gorda	Flamengos	Poilão
Localização, Ilha de Santiago	Rib. Grande	S. S. do Mundo	S. Catarina	Santa Cruz	São Miguel	S. L. Orgãos
Conselho, bacia hidrogr.	Ribeira Grande	Ribeira de Picos	Rib. de Charco	Santa Cruz	Flamengos	Rib. Seca
Acesso Principal	EN1-ST-05 e EM-RE-02	EN1-ST-01 e EN3-ST-17	EN1-ST-01 e EN2-ST-01	EN1-ST-02 e EM-SR-11 e EM-SR-12	EN1-ST-01 e EN1-ST-04	EN1-ST-01 e EN1-ST-03

Fonte: elaborada pelo autor.

Legenda: ST – Ilha de Santiago; EN1– Estrada Nacional de primeira classe (código EN1-ST-01, 02 etc.); EN2 – Estrada Nacional de segunda classe (código EN2-ST-01, 02 etc.); EN3 – Estrada Nacional de terceira classe (código EN3-ST-01, 02 etc.); EM – Estrada Municipal (código EM-RE-01, 02 etc.); RE - Ribeira Grande de Santiago; SS – São Salvador do Mundo; e SR – Santa Cruz.

Figura 8.28 – Localização e Acesso às Barragens de Faveta, F. Gorda, Flamengos, Poilão e Saquinho



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8.29 – Localização e Acesso à Barragem de Salineiro



Fonte: elaborado pelo autor.

5) DETECCÃO, AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE EMERGÊNCIAS

Para a Detecção de situações anormais que coloquem em risco a segurança, a Agência Nacional de Água e Saneamento (ANAS), responsável pela Segurança de Barragens em parceria com o LNEC, tem desenvolvido formações sobre aspectos relevantes das inspeções visuais nas barragens, observação e controlo de segurança com ênfase sobre barragens de betão e alvenaria com elaboração de relatório final, mas que não tem tido seguimento e essas inspeções não abrangem todas as barragens em exploração.

Silva, Fernandes e Mello (2019) desenvolveram recentemente estudos de análise de risco cujo objetivo foi avaliar a possibilidade de subdimensionamento da folga entre a lamina máxima escoada sobre o vertedouro, para uma cheia de projeto milenar e, concluíram que estas barragens não só apresentam problemas de percolação e fuga de água pelas ombreiras na interface do maciço de concreto com a rocha mas também, que em nenhum caso, seja para as vazões do projeto original seja para as vazões reavaliadas foi atendido o critério da folga mínima recomendada nos manuais de projeto da Eletrobrás e adotadas pela maioria dos projetistas brasileiros.

Esta análise (com base no tempo de concentração de Kirpich), conduziu a um possível subdimensionamento da folga (praticamente inexistente) nos vertedouros das barragens implicando numa majoração do risco hidrológico e galgamento que caso seja insuficiente para passagem da cheia de projeto, ocorrerá fluxo em regime forçado com consequências imprevisíveis para a estabilidade e segurança da estrutura.

Para elaboração do presente PAE foi adotada 4 níveis de classificação de segurança com base nas possíveis anormalidades que podem ocorrer na instalação. As principais características dos níveis adotados são apresentadas a seguir:

1. Nível 0 ou Normal (Verde);
2. Nível 1 ou de Atenção (Amarelo);
3. Nível 2 ou de Alerta (Laranja) e,
4. Nível 3 ou de Emergência (Vermelho).

O primeiro nível funciona como referência, não constituindo estado de alerta e, sim, a atenção necessária rotineiramente. O segundo nível corresponde a um cenário de alerta e de prevenção mais rigorosa, cabendo Dono de obra/Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros (SNPCB), a decisão de alertar ou não as comunidades e autoridades a jusante, dependendo da evolução da situação.

Os dois últimos níveis envolveriam, obrigatoriamente, processos de notificação e comunicação com envolvidos no vale a jusante e tomada de ações mais diretas de resposta a emergências, com possível evacuação. A Caracterização dos Níveis de Segurança adotadas são apresentadas nas Tabelas 8.15 e 8.16.

Tabela 8.15 – Caracterização dos Níveis de Segurança

Nível de Segurança	Situações
NORMAL	<p>Probabilidade de Acidente desprezível Plano de Segurança da Barragem - monitoramento rotineiro e ações corretivas de deteriorações que não comprometem a segurança estrutural. Deteriorações ou eventos que afetam apenas a aparência ou conservação do patrimônio ou a segurança se evoluírem. As previsões meteorológicas não indicam condições adversas.</p>
AMARELO OU ATENÇÃO	<p>Probabilidade de Acidente baixa Deteriorações ou eventos que possam afetar a segurança do barramento. Obriga a um estado de prontidão na barragem onde serão necessárias as medidas preventivas e corretivas previstas e os recursos disponíveis para evitar um acidente. O fluxo de notificações do PAE/PEB é apenas interno, a menos que sejam necessárias descargas preventivas ou o rebaixamento do reservatório. É conveniente testar os sistemas de comunicação neste momento.</p>
LARANJA OU IMINÊNCIA DE ACIDENTE	<p>Probabilidade de acidente elevada Cenário excepcional e de alerta. “Espera-se que ações a serem tomadas evitem a ruptura, mas pode sair do controle”. A exploração do reservatório deverá ser interrompida. Esvaziamento do reservatório. Entende-se que a segurança do vale a jusante está gravemente ameaçada e será necessário acionar os procedimentos de comunicação e notificação externos previstos no PAE/PEB. Avaliar a necessidade de evacuação interna.</p>
VERMELHO OU EVACUAÇÃO	<p>Acidente inevitável - catástrofe iminente A ruptura é iminente, inevitável, já iniciou ou já ocorreu. Segurança do vale a jusante está gravemente ameaçada. Acionar os procedimentos de comunicação e notificação previstos no PAE/PEB. Evacuação necessária.</p>

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8.16 – Definição de nível de alerta para ocorrências excepcionais ou circunstâncias anômalas

QUADRO 2			
Definição do nível de alerta para ocorrências excepcionais ou circunstâncias anômalas			
Ocorrência excepcional	Consequências	Nível de alerta/ consultar Quadro	
Anomalias estruturais na barragem e ombreiras	Instrumentação	Falta de dados de observação Resultados anômalos da instrumentação de auscultação	Verde
	Trincas (não documentadas)	Trincas estáveis, documentadas e monitoradas. Trincas superficiais.	Verde
		Presença de trincas transversais e longitudinais: profundas que não se estabilizam, passantes ou não de montante para jusante, com percolação de água ou não.	Amarelo Quadro 3
	Surgências (áreas encharcadas ou água surgindo)	Surgência de água próxima à barragem, nos taludes ou ombreiras: - não documentada e/ou não monitorada - com carreamento de materiais de origem desconhecida - Aumento das infiltrações com o tempo - Água saindo com pressão	
	Vazamentos	Vazamentos não documentados e considerados controláveis	
Vazamentos incontroláveis com erosão interna em andamento			
Cheias	Nível	Nível d'água acima do nível de máxima cheia	Amarelo Quadro 3
	Equipamentos	Descarga de fundo e válvulas inoperacionais	
	Galgamento da barragem iniciado	Possibilidade de rebaixamento do nível d'água através da abertura de descarga de fundo	Laranja Quadro 4
Galgamento em andamento com descarga de fundo abertos			
Falha dos sistemas de alerta e de aviso	Período Seco	Impossibilidade de notificação	Verde
		Impossibilidade de aviso	Amarelo Quadro 3
	Período Chuvoso	Impossibilidade de notificação	Laranja Quadro 4
		Impossibilidade de aviso	
Ruptura da Barragem	Tombamento da barragem	Vermelho Quadro 5	
	Abertura de brecha na estrutura com descarga incontrolável de água		
	Colapso completo da estrutura		

Fonte: elaborada pelo autor.

NOTA: Para caracterização dos níveis de segurança – ver Tabela 8.15.

6) FLUXOGRAMA PARA SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA

As atribuições e responsabilidades a seguir são de carácter geral aplicáveis às situações envolvendo emergências associadas à segurança de barragem. Assim o presente procedimento deverá ser utilizado sempre que for detectada uma situação de emergência nas dependências do complexo barragem-albufeira.

Logo que uma situação de emergência ou situação em potencial for detectada, os empregados ou colaboradores, que em Cabo Verde, normalmente, é Associação do Agricultores local, deverão contactar o Delegado de Ministério de Ambiente e Agricultura do Município, por meio de um dos seguintes métodos:

1. Telefone _____ ou _____ ramal _____;
2. Rádio mais ouvida no Município e País, RTC, RTP; e
3. Verbalmente, de acordo com a ocorrência.

Ao receber as informações referentes ao incidente, o Presidente da Associação dos Agricultores Locais (PAGL), deverá comunicar o Delegado do MAA do respetivo Município (que geralmente é um Engenheiro), verbalmente ou por meio de um dos telefones abaixo:

Delegado do MAA: Eng. _____

Telefone Comercial: _____

Telefone Residencial: _____

Telefone Celular: _____

Caso o Presidente de Associação dos Agricultores Locais não encontre o Delegado do MAA, este deverá acionar o Coordenador do PAE/ANAS, que neste caso pode ser um Técnico da ANAS:

Eng. _____

Telefone Comercial: _____

Telefone Residencial: _____

Telefone Celular: _____

Caso o Presidente de Associação dos Agricultores não encontre o Coordenador do PAE, da ANAS, este deverá acionar o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LEC).

Eng. _____

Telefone Comercial : _____

Telefone Residencial: _____

Telefone Celular: _____

O LEC após ser comunicada, avalia juntamente com o Coordenador do PAE, a real situação da anormalidade e na sequência deverá comunicar a situação de emergência ao Direção Geral de Agricultura Silvicultura e Pecuária (DGASP).

Em função da gravidade da anormalidade, a DGASP informará ao Ministro do MAA, Representante do Dono de Obra (Governo) que informará o SNPCB, Câmara Municipal e Polícia.

A Tabela 8.17 mostra um modelo de organização dos telefones de emergência no acionamento da comunicação interna do ANAS/MAA. E o fluxograma da Figura 8.30, a sequência de acionamento da comunicação interna do ANAS/MAA.

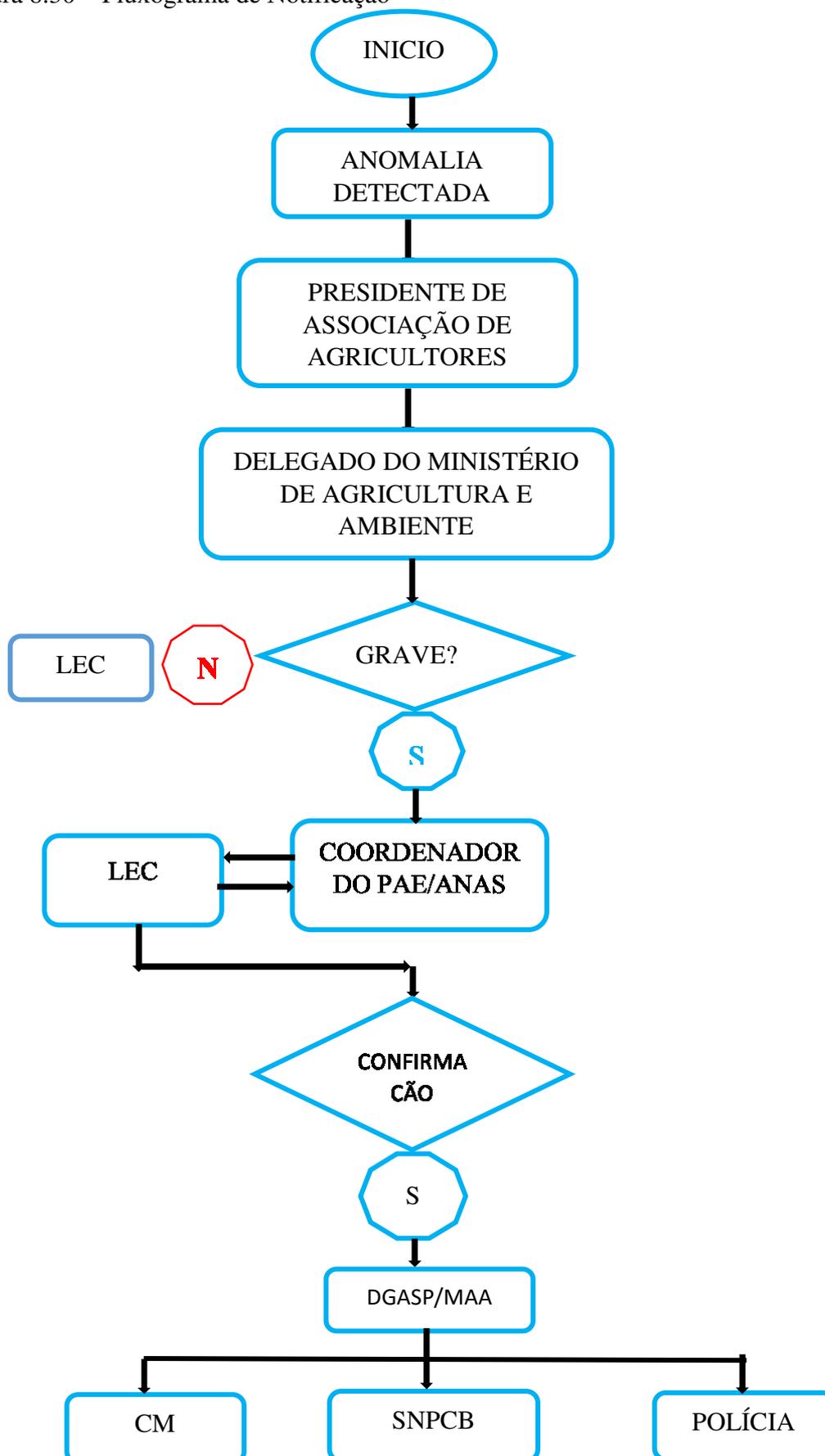
Tabela 8.17 – Telefones de Emergência

Cargo	Nome	Telefone
PBX-BARRAGEM		
PBX-ANAS/DGASP		
Presidente		
Administrador		
Diretor Geral		
Diretor		
Coordenador		
Chefe de Departamento		
Delegado		
Adjunto Delegado		
Representante de Associação		
Comandante Polícia		
Presidente Proteção Civil		
Chefe Bombeiros		
Coordenador do PAE		
Eng. Do LEC		

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 8.18 ilustra os Procedimentos de Ação para situação de Prevenção Rigorosa (Amarelo), a Tabela 8.19, para a situação de Alerta (laranja), e a Tabela 8.20, para a situação de Emergência (vermelho).

Figura 8.30 – Fluxograma de Notificação



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 8.18 – Procedimentos de Ação para situação de Prevenção Rigorosa (Amarelo).

QUADRO 3			
PREVENÇÃO RIGOROSA OU AMARELO			
PROCEDIMENTOS DE COMUNICAÇÃO E DE AÇÃO IMEDIATA			
O QUE FAZER	QUEM	QUANDO	COMO
<u>Comunicar:</u> Equipe Local	Represen- tante de Agricultores Local	Após identificação de ocorrência constante no QUA- DRO 1	Via telefone - ver flu- xograma
<u>Comunicar</u> 1- Coordenação técnica civil; 2- Coordenação executiva aguarda instruções das coor- denação	Equipe Lo- cal	Após identificação de ocorrência constante no QUA- DRO 1	Pré avaliar o incidente segundo QUADRO 2 via telefone
<u>Tomada de decisão</u> Avalia a informação e define ações a serem tomadas. Soli- cita à Equipe Local que fique de prontidão e monitore a ocorrência.	Equipe Ci- vil- LEC/ANAS	Após notificação pela Equipe local ou coordenação executiva	Vai ao local ou envia equipe civil através de julgamento tecnico classifica o incedente segundo QUADRO 1 e 2
<u>Notificar</u> Coordenação Executiva	Coordena- dor Tecnico Civil LEC/ANAS	Após identificação e avaliação do de- terioração ou sis- tema anormal	Ver contatos na lista de contatos
<u>Ações de Resposta:</u> Imple- menta medidas preventivas e corretivas conforme o tipo de ocorrência identificado	Coordena- dor Tecnico Civil LEC/ANAS	Após identificação e avaliação da de- terioração ou situa- ção anormal	Ver anexo D
<u>Tomada de decisão</u> Necessário esvaziar o reserva- tório? Se sim, acionar o sis- tema de aviso para descarga de fundo	Coordena- dor do PAE	Se houver necessi- dades acionamento	Segundo procedimen- tos operacionais dispo- níveis na barragem
Registo Todas as observações e ações	Equipe Lo- cal	Ao longo de toda a situação	Usar livro de registo da instalação
<u>Verifica se:</u> • As medidas implementadas têm resultado (ou se a ocor- rência deixa de constituir ameaça) e se a situação de pe- rigo retrocede para o nível verde de rotina. • Situação de perigo evolui para o nível laranja	Coordena- dor PAE/LEC	Após implementa- ção de medidas	Identificação da situa- ção e reclassificação do nível de alerta

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8.19 – Procedimentos de Ação para situação de Alerta (Laranja).

QUADRO 4			
SITUAÇÃO DE ALERTA OU LARANJA			
PROCEDIMENTOS DE COMUNICAÇÃO E DE AÇÃO IMEDIATA			
O QUE FAZER	QUEM	QUANDO	COMO
Instituir a situação de alerta laranja	Coordenador do PAE/LEC	Ao ser instituído nível laranja	Avaliar e classificar situação como nível de alerta
Coordenar a evacuação da câmara de válvulas e demais áreas inundáveis. Condiciona os acesso à barragem e área jusante	Equipe de Associação de Agricultores Locais	Ao ser instituído o nível laranja	Evacuar a área seguindo o plano de evacuação no Anexo A
<u>Tomada de decisão</u> Avalia a informação e define ações imediatas a serem tomadas. Solicita ao Operador que fique de prontidão e monitore a ocorrência	Coordenador do PAE/LEC	Ao ser instituído o nível laranja	Vai ao local ou envia equipe civil através de julgamento técnico classifica o incidente (QUADROS 1 e 2)
<u>Notifica para ficarem de prontidão</u> ANAS/DGASP Serviços de Proteção Civil Comunidade Local	Coordenador do PAE/LEC	Ao ser instituído o nível laranja	utilizar meios de comunicação indicados na lista de comunicação
Mobilizar Representante do Proprietário-MAA (Diretor Geral)	Coordenador do PAE/LEC	Ao ser notificado do nível laranja por Coord.PAE	Notificar o Diretor Geral via indicação na lista de comunicação
<u>Ações de Resposta</u> Implementa medidas preventivas e corretivas de acordo com a ocorrência	Coordenador do PAE/LEC	Apos identificação e avaliação ou situação anormal	Seguir procedimentos do Anexo D. A prioridade é manter segurança das estruturas
Mantem comunicação com a Proteção civil para coordenação de ações visando a redução dos danos	Coordenadores de PAE e Equipe Comunicação	Ao longo de toda a situação de alerta	Via meios de comunicação
<u>Registra</u> todas as observações e ações	Representante de Agricultores e Equipe local	A o longo de toda a situação	Usar livro de registro da instalação
<u>Verifica se:</u> • as medidas implementadas têm resultado (ou se a ocorrência deixa de constituir ameaça) e se a situação de perigo retrocede. • a situação de perigo evolui para o nível de alerta Vermelho e a ruptura é inevitável.	Coordenador do PAE/LEC	Após implementação de medidas	Identificação da situação e reclassificação do nível de alerta

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8.20 – Procedimentos de Ação para situação de Emergência (Vermelho).

QUADRO 5			
EMERGÊNCIA OU VERMELHO			
PROCEDIMENTOS DE COMUNICAÇÃO E DE AÇÃO IMEDIATA			
O QUE FAZER	QUEM	QUANDO	COMO
Coordenar a evacuação da câmara de válvulas e demais áreas inundáveis e condicionar acesso à barragem e área jusante	Representante de Associação e Equipe local	Ao ser notificado Emergencia	Evacuar a área deslocando-se ate a guarita de entrada utilizando as placas de orientação e o plano de evacuação
<u>Notificar</u> Avalia a informação e define ações imediatas a serem tomadas.	Representante de Associação e comunicação	Ao chegar a sala de Emergencia localizada na guarita	Conforme o fluxograma
<u>Notifica</u> ANAS/DGASP	Diretor Geral/Coordenador do PAE	Ao ser notificado do nível laranja pelo Diretor Geral	Utilizar meios de comunicação da lista e fluxograma
Mobilizar Representante do Proprietário-MAA (Diretor Geral)	Diretor Geral/Coordenador do PAE	Ao ser notificado do nível laranja pelo Diretor Geral	Notificar representantes do proprietário conforme fluxograma
<u>Ações de Resposta</u> Esvazia o reservatório ao máximo e toma outras ações para tentar	Coordenador do PAE/LEC	Após identificação e avaliação da deterioração ou situação normal	Seguir procedimentos proposta no Anexo D
Mantém comunicação com a Proteção Civil para coordenação de ações visando a redução dos danos	Coordenador do PAE/LEC e equipe de comunicação	A o longo de toda a situação	Via meis de comunicação
Registra Todas as observações e ações	Representante Local	A o longo de toda a situação	Usar livro de registro da barragem

Fonte: elaborada pelo autor.

7) MAPAS DE INUNDAÇÃO

Após os resultados obtidos do estudo com modelo hidráulico-hidrológico através de HEC-RAS, seguidamente com o recurso de ferramentas de geoprocessamento, o QGIS, gerou-se o mapa com a mancha de inundação associadas à cartografia da região para gerar maior vazão de pico.

De posse dos dados da simulação e software de geoprocessamento, foi possível gerar mapas com as manchas de inundação associadas à cartografia da região para cenário estudado. Os mapas indicam numa forma simples e em escala adequada, os locais densamente povoados e as estruturas importantes situadas nas zonas de inundação.

Para o estudo de ruptura hipotética da barragem, considerou-se o reservatório em configuração operacional com o nível d'água na cota NPA (máximo *maximorum*) e o volume de armazenamento de albufeira a 100% propagando pela calha a jusante, sendo a vazão de ruptura hipotética utilizado neste cenário para cada barragem e outras características, apresentadas na Tabela 8.21, que ilustra o comportamento das ondas de cheia para o cenário estudado.

Tabela 8.21 – Comportamento de Ondas de Cheia

Barragem	Localidade a jusante	Tempo chegada (h)	Vazão de ruptura (m ³ /s)	Distância (km)	Elevação (m)	Veloc. (m/s)
Faveta	Rib. Picos	2.1	1683	13.5	234.8	10
F. Gorda	Santa Cruz	2.9 (1)	843	5.5	94.7	8.9
Flamengos	Rib. Flamengos	2.0 (1.7)	878.4	7.6	185.7	9
Poilão	Rib. Seca	7.0 (4.5)	2886	7.5	121.6	5.1
Salineiro	Rib. G. Santiago	0.5 (0.35)	227.3	4.9	258.4	14.5
Saquinho	Charco	0.71	401.2	7.0	315.4	11.44

Fonte: elaborada pelo autor.

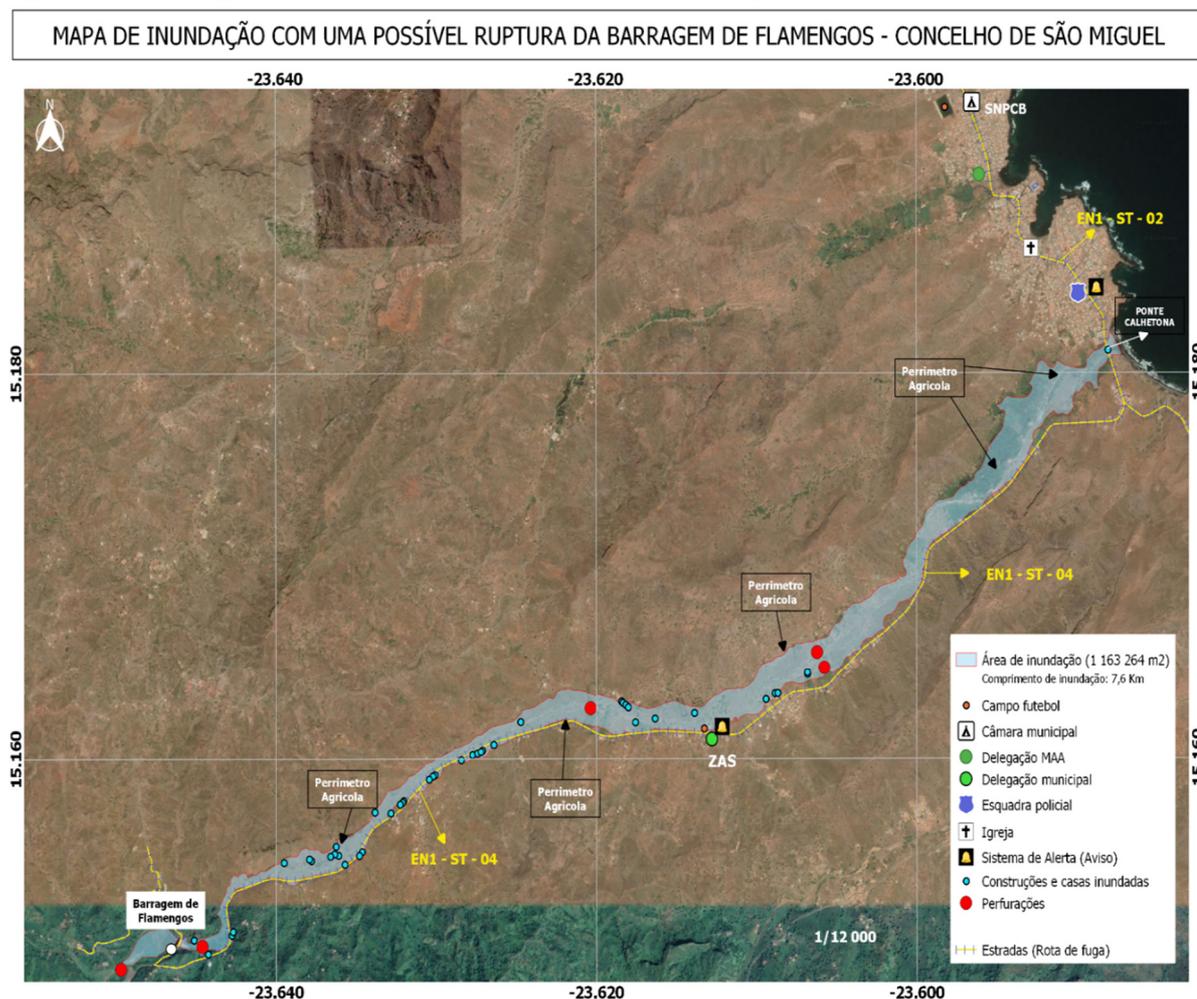
As Figuras 8.31 a 8.36 ilustram os mapas de inundação e zona de impacto da onda de cheia.

Em relação aos mapas de inundação, verifica-se que as ondas de ruptura causam graves danos no vale a jusante atingindo infraestruturas públicas e privadas, propriedades agrícolas, Igrejas e comunidade habitacional, deixando milhares de pessoas desabrigadas.

O Mapa de inundação da barragem de Faveta (FIGURA 8.31) afeta uma área de 1,8 km², com comprimento de 13,5 km e com o tempo de chegada no valor de 2,1 hora, provocando danos às habitações e respectivas populações, destruindo infraestruturas diversas, cortando acessos e estradas e devastando propriedades agrícolas.

Para minimizar perdas severas, imediatamente a jusante de barragem, para $t_{cheg.} \leq 30$ minutos, foi criada um espaço denominada Zona de Autossalvamento (ZAS), na comunidade de Achada Leitão, Município de São Salvador do Mundo, para abrigar a população afetada, sendo o acesso através de estrada EN3-ST-17, conforme ilustrada na Figura e no plano de acesso. Para tempos de chegada mais elevados $t_{cheg.} \geq 1$ ou 2 horas, o SNPCB entrará em ação para implementar o PEE, envolvendo serviços de saúde e polícias.

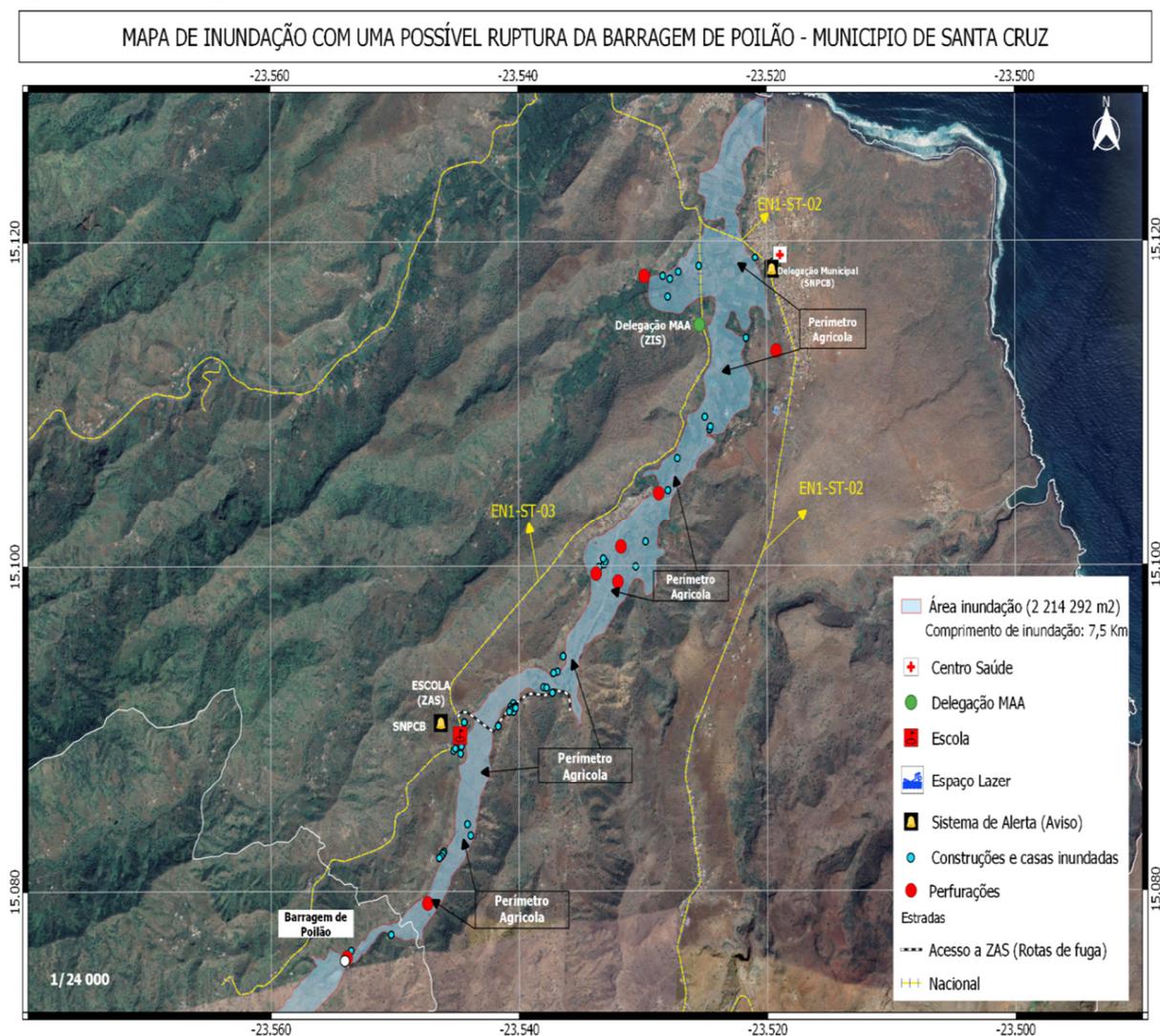
Figura 8.33 – Mapa de inundação da Barragem de Flamengos



Fonte: elaborado pelo autor.

Relativamente à onda de inunda o da barragem de Poilão (FIGURA 8.34), apresenta maior vazão de ruptura, abrange uma área de 2,2 km² com o comprimento de 7,5 km num tempo de chegada de onda   comunidades de 5,5 horas e um tempo de chegada máximo de 7 horas. Poilão apresenta também, maior tempo de chegada. A onda atinge o edifício da Delega o do MAA, Complexo de lazer de polícias, estradas e várias casas.

Figura 8.34 – Mapa de inundação da Barragem de Poilão

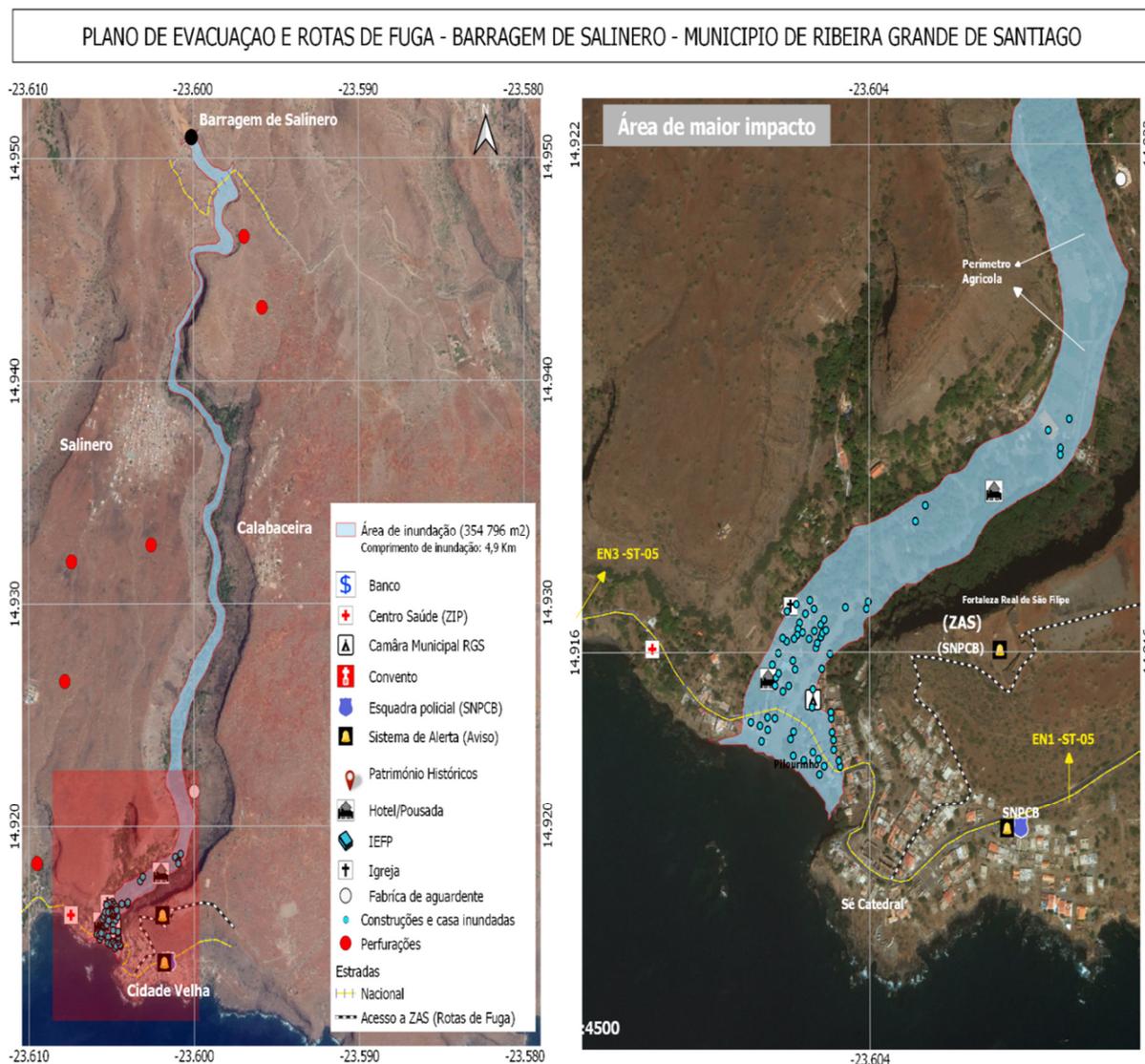


Fonte: elaborado pelo autor.

Observando o mapa de inundação da barragem de Salineiro (FIGURA 8.35), verifica-se que a onda de ruptura atinge a comunidade em menos tempo que as outras barragens, isto é, em 23 minutos, abrangendo uma área de 0,4 km² com um comprimento de 4,9 km. É a onda que provoca maiores danos devido a localização a jusante da Cidade de Ribeira Grande de Santiago (também designada Cidade Velha), à Sudoeste da Ilha de Santiago, conforme e ilustrada na Figura 8.33 e a respectiva legenda.

Esta onda praticamente, abrange toda área da Cidade Velha, destruindo casas, hotéis, pousadas, igrejas, restaurantes e atinge um marco histórico – o Pelourinho, que simboliza a época da escravatura e que por isso a Cidade Velha é Património Mundial da UNESCO.

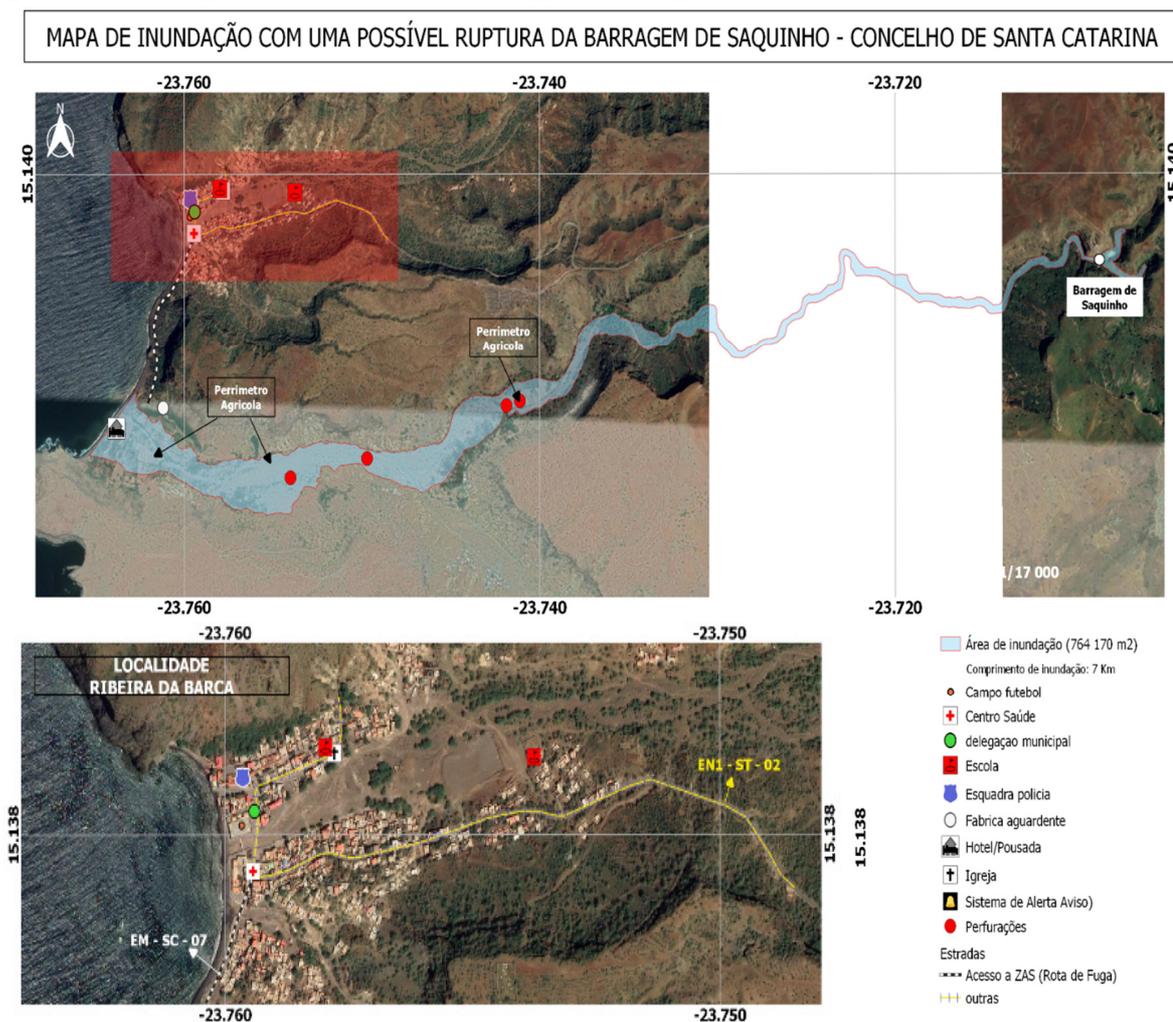
Figura 8.35 – Mapa de inundação da Barragem de Salinero



Fonte: elaborado pelo autor.

O mapa de inundação da barragem de Saquinho é o que menos danos provoca porque a jusante não tem casas. Esta onda abrange uma área de 0,77 km² e um comprimento de 7 km, sendo o tempo de chegada de onda no valor de 0,71 hora. Na Figura 8.36, é ilustrado a onda de ruptura com alguns danos a jusante tais como em infraestruturas agrícolas, acesso e uma Pousada.

Figura 8.36 – Mapa da inundação da Barragem de Saquinho



Fonte: elaborado pelo autor.

De entre todas as variáveis que caracterizam a cheia induzida, o tempo de chegada da cheia é considerada como a variável que melhor se ajusta aos propósitos do planeamento e gerenciamento de emergência nos vales a jusante das barragens, porque é este parâmetro que condiciona o tempo disponível para os agentes os Serviços Nacionais de Proteção Civil e Bombeiros (SNPCB) e outras autoridades atuarem.

8) RESPONSABILIDADES

As atribuições e responsabilidades a seguir são de caráter geral, aplicáveis às situações envolvendo emergências associadas à segurança de barragem.

Ministério de Agricultura e Ambiente – MAA, como representante de Proprietário, Composto pelas seguintes direções de serviços ligados à segurança de Barragens:

DGASP – Direção Geral de Agricultura, Silvicultura e Pecuária;

DMAA – Delegações do MAA;

DNA – Direção Nacional de Ambiente; e

ANAS – Agência Nacional de Água e Saneamento.

Representantes das gerências de segurança de barragens e de gestão dos reservatórios. Suas principais atribuições são:

- Coordenar a comunicação oficial com governantes e órgãos da imprensa;
- Definições legais; e
- Disponibilização emergencial de recursos.

Estas Entidades assumem também, a Coordenação Geral das Barragens.

Equipe Técnica de Civil – LEC/ANAS

Suas principais atribuições são:

- Comunicar a ocorrência ao ANAS/DGASP;
- Participar das discussões dos desdobramentos da anomalia;
- Contatos externos com consultores;
- Elaboração de notificações e de relatórios internos;
- Elaboração, atualização e revisão do PEB;
- Orientar e treinar as equipes locais para a prevenção e prontidão em situações que ameacem a segurança da barragem;
- Orientar a Coordenação DGASP/MAA sobre as condições das estruturas civis;
- Agir durante a emergência, atuando sobre as causas dos problemas na barragem para evitar a ruptura;
- Propor medidas corretivas; e
- Apoiar Coordenação DGASP/MAA na comunicação com Proteção Civil, antes e durante as emergências relacionadas à segurança de barragens.

SNPCB – Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros

Exercem funções de proteção civil nos domínios do aviso, alerta, intervenção imediata, socorro e assistência, de acordo com as suas atribuições próprias, as seguintes entidades:

- As Forças Armadas;
- A Polícia de Ordem Pública;
- Os bombeiros;
- Os serviços de saúde; e
- A Cruz Vermelha.

As principais atribuições do SNPCB são:

- Através do apoio em pessoal para a organização e montagem de acampamentos de emergência;
- Prestando apoio em comunicações;
- Disponibilizando meios de transporte;
- Fornecendo géneros alimentícios, água e cobertores;
- Participando na evacuação de feridos e doentes;
- Efetuando reconhecimentos terrestres, aéreos e marítimos;
- Participando em ações de busca e salvamento de pessoas e bens;
- Disponibilizando pessoal especializado, nomeadamente no campo da saúde; e
- Participando em exercícios de proteção civil, nos termos da lei.

Delegação do Ministério de Agricultura e Ambiente (DMAA) e Associação de Agricultores

Sob a Orientação e Coordenação da equipe técnica civil de ANAS/LEC, a principal característica dessa equipe é o fato de que, ao ser instituído um nível de alerta (Amarelo, laranja ou Vermelho), ela passa a atuar como Equipe de Apoio.

Antes de ser instituído oficialmente o nível de alerta, são atribuições dessa equipe:

- Operar e manter a barragem, garantindo o funcionamento de seus equipamentos hidromecânicos, sistemas de comunicação e de aviso;
- Acionar aviso sonoro e seguir o fluxo de notificações em caso de ruptura da barragem (nível vermelho sem passar pelos demais níveis de alerta).

Desempenham ainda as seguintes atribuições:

- Bloqueio e controle de acessos;
- Retirada imediata das pessoas nos processos de evacuação;

- Manutenção da ordem no local da emergência;
- Registro das ações tomadas;
- Coordena as ações de notificação e comunicação interna e externa, atendendo às ordens do Coordenador do PAE.

9) ENCERRAMENTO DAS OPERAÇÕES

Uma vez que as condições indiquem que não existe mais uma emergência no local da barragem e a Equipe Técnica declarou que a barragem está segura, a DGASP deverá contatar a SNPCB/SMPCB, DMAA e ASSOCIAÇÃO DE AGRICULTORES que irão acompanhar a evolução das inundações no vale e decretar o fim da emergência. Encerradas as ações emergenciais de resposta, deve-se desmobilizar pessoal, equipamentos e materiais empregados.

Em seguida, será elaborado o Relatório Final de Emergência, conforme formulário do Anexo B2 (MODELO DO RELATÓRIO FINAL DE EMERGÊNCIA), e apresentado em um prazo de até 30 dias após a ocorrência da emergência. A responsabilidade pela emissão desse relatório é do Coordenador do PAE/ANAS.

RECURSOS HUMANOS

Os seguintes procedimentos referentes aos recursos humanos devem ser adotados na Barragem quando for estabelecido uma situação de anormalidade a partir do nível de Atenção:

- Assegurar a permanência de pessoal na barragem em ocasiões que potencializem acidentes, como cheias excepcionais ou comportamento anormal da barragem; e
- Treinar o pessoal, efetivo e suplente, através de exercícios e simulações, para atuar com o sistema de comunicações e agir nas diferentes situações previstas.

CENTRO DE OPERAÇÕES DE EMERGÊNCIAS

Assegurar a existência de uma sala, em local seguro, onde o pessoal possa permanecer durante a situação de emergência, devendo ser dotado de meios de comunicação adequados para o acionamento e cumprimento do plano de atendimento a emergências.

EQUIPAMENTOS DE COMUNICAÇÃO E AVISO

São os seguintes:

- kits de rádios;
- Sirene instalada na Câmara de Válvulas e/ou Estação de Bombagem; e
- Sistema de Telefonia instalado na guarita de entrada da Barragem.

RECURSOS MATERIAIS

Para reparações de emergência ou intervenções de reabilitação expedita, a Barragem terá, em suas instalações, os equipamentos, materiais de segurança e materiais de construção civil com uso respectivo listados a seguir:

- Moto-bombas para executar descarga de água;
- Sistemas de energia auxiliares para operar os equipamentos elétricos; e
- Cones para Restrição de acessos e áreas.

10) APROVAÇÃO DO PAE/PEB

Conforme a resolução da ANA, nº 236 de 2017, no seu Art. 26º, O PAE, quando exigido, deverá estar disponível nos seguintes locais:

- I – na residência do coordenador do PAE;
- II – nas prefeituras dos municípios abrangidos pelo PAE;
- III – nos organismos de Defesa Civil dos municípios e estados abrangidos pelo PAE;
- e
- IV – nas instalações dos empreendedores de barragens localizados na área afetada por um possível rompimento.

Quaisquer mudanças nas informações contidas nesse plano deverão ser informadas ao Coordenador do PAE para atualização.

As pessoas abaixo assinadas revisaram esse Plano de Emergência da Barragem e concordam com os procedimentos de notificação propostos:

Presidente de Associação dos Agricultores

Delegate of MAA

LEC Civil Technical Team

PAE Coordinator - ANAS

DGASP

8.4.2. Plano de Emergência Externo (PEE)

MUNICÍPIO DE _____
SERVIÇO MUNICIPAL DE PROTECÇÃO CIVIL

PLANO DE EMERGÊNCIA EXTERNO – PEE
EM CASO DE EMERGÊNCIA DA BARRAGEM DE _____

PREPARADO POR:

Endereço: _____

Telefone: _____

Data: ____/____/____

Fonte: elaborada pelo autor.

Lista de Distribuição	
Entidade/Departamento	Número de cópias
Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros-SNPCB Presidente de SNPCB	1
Serviço Municipal de Proteção Civil-SMPC Coordenador de SMPC	1
Centro Municipal de Proteção Civil e Bombeiros-CMPCB	1
Câmara Municipal-CM Gabinete de Presidente	1
Comando de Polícia Regional-CPR Gabinete de Comandante	1
Estado Maior das Forças Armadas-EMFA Gabinete de Presidente	1
Corpo de Bombeiros Chefe	1
Outras entidades	X

ÍNDICE

- I. Introdução
- II. Apresentação
- III. Objetivos
- IV. Desenvolvimento/Execução
- V. Responsabilidades
- VI. Plano de Ação (Alerta e Evacuação)
- VII. Procedimento de Evacuação

- VIII. Receção e Embarque
- IX. Divulgação de informação ao público e Fluxograma
- X. Preparação e Treinamento
- XI. Intervenção e Avaliação
- XII. Caracterização dos vales a jusante
- XIII. Anexo

I. INTRODUÇÃO

Conforme a Lei Caboverdeana nº 12/VIII/2012 de 07 de Março, no âmbito do planeamento e operações, compete ao Serviço Municipal de Proteção Civil (SMPC):

- a) Elaborar e atualizar o plano municipal de emergência e os planos especiais necessários;
- b) Elaborar planos prévios de intervenção, preparar e propor a execução de exercícios e simulacros que contribuam para uma atuação eficaz de todas as entidades intervenientes nas ações de proteção civil;
- c) Os planos de emergência estão sujeitos a atualização periódica e devem ser objeto de exercícios frequentes com vista a testar a sua operacionalidade;
- d) Os planos de emergência de âmbito municipal são aprovados pelo Conselho Nacional de Proteção Civil (CNPC); e
- e) Os planos de emergência de âmbito nacional e regional são aprovados pelo Conselho de Ministros.

Esta mesma Lei refere ainda que:

- a) Os planos de emergência de âmbito nacional e regional são elaborados pelo SNPCB;
- b) Os planos de emergência de âmbito municipal são elaborados pela câmara municipal;
- c) Os planos de emergência acima referidos são elaborados pelo SNPCB se a sua extensão territorial abranger mais que um município, ou pelas câmaras municipais, nos restantes casos.

Como o PEE é um plano com características especiais que se baseia no risco imposto pela barragem e deve prever, essencialmente, a atuação nas fases de alerta, alarme e de evacuação, portanto numa fase exterior ao acidente ou incidente de uma barragem, deverá ser elaborado pelo SMPC e aprovado pelo SNPCB.

Por isso neste estudo vai-se apresentar um esboço que servirá de orientação ao futuro PEE a ser desenvolvido pelo SMPC.

Este esboço, conduzido no âmbito desta tese, poderá servir de base para a elaboração do PEE final, cuja responsabilidade é dos SERVIÇOS MUNICIPAIS DA PROTEÇÃO CIVIL (SMPC) em estreita colaboração com SNPCB, de âmbito nacional e aprovado por CNPC se for de âmbito Municipal.

As informações são colocadas como se fossem propostas pelos SMPC a fim de facilitar a sua utilização no futuro pela Proteção Civil.

Quando a cheia que está sendo propagada no trecho a jusante da barragem pode ameaçar as comunidades a jusante, a Defesa Civil deve ser notificada pelo responsável pela PAE da barragem conforme procedimentos descritos nos respectivos Planos de Emergência de Barragens (PEB).

O PEE é um projeto de grande responsabilidade com relação à identificação de vulnerabilidades e a informação obtida no PEB deve ser complementada dos objetivos de salvar vidas.

II. APRESENTAÇÃO

O presente documento constitui o esboço do PLANO DE EMERGÊNCIA EXTERNO (PEE) para atender a uma situação de emergência estrutural ou hidráulica tendo origem na barragem.

Este esboço, conduzido no âmbito da tese de Doutorado de Manuel Moreira Fernandes, poderá servir de base para a elaboração do PEE final, cuja responsabilidade é do Serviço Municipal de Proteção Civil (SMPC).

Este plano é um projeto cujo objetivo é de Proteção das Populações contra Riscos de Desastre Naturais e desenvolver estudos técnicos com vista à identificação, análise e consequências dos riscos naturais, tecnológicos e sociais que possam afetar o município e à sua população, em função da magnitude estimada e do local previsível da sua ocorrência, promovendo

a sua cartografia, de modo a prevenir, quando possível, a sua manifestação e a avaliar e minimizar os efeitos das suas consequências previsíveis, como parte dos Planos Diretores previstos na Política Nacional de Proteção Civil e Bombeiros. Deverá ser utilizado em conjunto com os Planos Operacionais e de Contingência municipais.

É da competência do Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros (SNPCB) o desencadeamento das ações e atividades de Proteção Civil, envolvidas no presente planejamento, conforme previsto no Decreto Lei nº 12/VIII/2012, de 07 de Março.

Este PEE deverá conjugar esforços dos três níveis de governo (Nacional, Regional ou InterMunicipal e Municipal) e integrar os procedimentos de comunicação, aviso e alerta planejados nos Planos de Atendimento a Emergências de Barragens datados de ____/____/____.

III. OBJETIVO

O objetivo deste plano é estabelecer as medidas não estruturais necessárias para minimizar os efeitos desta ruptura hipotética, permitindo a garantia da integridade física e moral da população, bem como preservar o patrimônio público e privado até o restabelecimento da normalidade, e ainda:

- a) Prevenir os riscos coletivos e a ocorrência de acidente grave ou de catástrofe deles resultantes;
- b) Atenuar os riscos coletivos e limitar os seus efeitos no caso das ocorrências descritas na alínea anterior;
- c) Socorrer e assistir as pessoas e outros seres vivos em perigo e proteger bens e valores culturais, ambientais e de elevado interesse público;
- d) Apoiar a reposição da normalidade da vida das pessoas em áreas afetadas por acidente grave ou catástrofe.

Essas medidas contemplam essencialmente a manutenção do estado de prontidão das autoridades de Proteção Civil, o alerta à população em caso de emergência e o gerenciamento da evacuação das áreas de risco.

IV. DESENVOLVIMENTO/EXECUÇÃO

Para efeito de ativação desse plano, entende-se como situação crítica e emergencial, a ocorrência de situação anormal que coloque a barragem sob risco iminente de ruptura ou haja a previsão de vertimento de vazões extremas, cujo alarme será difundido pelo Serviço Municipal de Proteção Civil (SMPC), através da rádio comunitária e dos auto-falantes da igreja matriz ou de outras formas de comunicação.

Critérios para acionamento do plano

Para assegurar uma resposta rápida e apropriada a situações de emergência na barragem, o Plano de Atendimento a Emergências da barragem prevê a comunicação externa em dois níveis: o Alerta e a Emergência.

O operador da barragem e os coordenadores do plano da barragem irão, ao detectar uma situação anormal ou uma emergência, tomar as ações imediatas necessárias para prevenir a ruptura e minimizar as perdas de vidas e propriedades a jusante. Dessa forma, os procedimentos de notificação terão por base as seguintes condições:

Alerta

É da responsabilidade do Presidente da Câmara Municipal declarar a situação de alerta de âmbito municipal e do membro do Governo responsável pela área da Administração Interna, declarar a situação de alerta para a totalidade do território nacional ou com o âmbito circunscrito a uma parcela do território nacional.

Um evento excepcional ocorreu e está ameaçando a segurança da barragem ou uma grande cheia natural está afluindo ao reservatório. As medidas preventivas e corretivas estão sendo tomadas. O reservatório deverá ser esvaziado e/ou haverá a propagação de grandes vazões no curso d'água. As medidas poderão ser eficazes e evitar uma emergência ou ineficazes e evoluírem para a ruptura da barragem.

O Coordenador do PAE/ PEB da barragem irá notificar a SMPC, que deverá notificar o SNPCB e alertar a comunidade a jusante. O coordenador da SNPCB deverá ainda mobilizar os demais recursos humanos operacionais de Proteção Civil e tomar a decisão de iniciar ou não a evacuação das áreas potencialmente inundáveis. Todos os envolvidos deverão permanecer de prontidão para eventualmente entrarem em ação.

Emergência

As vazões de restrição foram ultrapassadas ou a ruptura da barragem é inevitável ou já ocorreu. O operador da barragem notifica a comunidade jusante e o Coordenador do PAE. O Coordenador do PAE notifica SMPCV e SNPCB e inicia a evacuação das pessoas que vivem nas áreas de risco mapeadas.

V. RESPONSABILIDADES

SMPC/SNPCB – Coordenação Geral;

Vereador pela área da Educação - ficará responsável pelo alojamento das pessoas desabrigadas, utilizando a rede pública escolar municipal e sua estrutura, providenciando a alimentação, disciplina do alojamento e organização;

Vereador pela área dos Transportes - ficará responsável pelo organizar a utilização da frota de veículos da prefeitura, principalmente os ônibus e ambulâncias;

Vereador pela área de Infraestrutura e Obras - ficará responsável pela organização das equipes responsáveis pela remoção dos desabrigados, transporte dos pertences e reabilitação das edificações atingidas e ficará responsável pela avaliação dos danos, levantamentos e vistorias em áreas atingidas pela inundação;

Serviços de Saúde e Cruz Vermelha - ficará responsável pelo atendimento aos feridos utilizando todos os leitos do hospital e dos postos de saúde, convocando o quadro de saúde municipal, solicitando apoio se necessário, priorizando os enfermos, lactantes, idosos e crianças e responsável pelo recebimento, armazenamento e distribuição dos donativos aos necessitados;

Comandante de Polícia - ficará responsável pelo restabelecimento do trânsito, controle de acessos às áreas atingidas e prevenção de eventuais saques;

Forças Armadas – Ficar responsável pela comunicação, contatos, energia, água, transportes etc., e coordenará os voluntários cadastrados ou que eventualmente se apresentarem, atendendo em especial às solicitações do secretário de obras, ficando também responsável por recolher os animais domésticos dos desabrigados e as demais ações não aqui previstas.

VI. PLANO DE AÇÃO (ALERTA E EVACUAÇÃO)

As atividades desenvolvidas no período de anormalidade estão voltadas para a resposta aos desastres e dividem-se nas fases de Prontidão e Resposta. Quando ocorrer situação excepcional na barragem, ou for detectado problema que possa induzir inundação ao longo do rio, os responsáveis pela barragem irão notificar o Coordenador do SMPC e SNPCB.

A informação de anormalidade pode vir diretamente, através de um observador localizado próximo ao rio. Neste caso, a informação deverá ser confirmada com responsáveis pelo PEB da barragem. Após receber a informação e confirmá-la, o Coordenador da SMPC deverá organizar o Posto de Comando de Polícia ou Posto de Saúde, que será estabelecido na sala de transmissão da rádio comunitária e, em caso de serem atingidos as localidades da área rural, o Posto de Comando será nos respectivos Postos de saúde ou Capela/Igreja mais próximos da comunidade.

Os próximos passos são: (a) Se for notificada uma situação de ALERTA: Seguir procedimentos do QUADRO 1 (Tabela 8.22). Se for notificada uma situação de EMERGÊNCIA: Seguir procedimentos do QUADRO 2 (Tabela 8.23).

Tabela 8.22 – Plano de Ação se notificada uma situação de ALERTA

QUADRO 1 - ALERTA		
AÇÕES A SEREM TOMADAS EM CASO DE ALERTA		
O QUE FAZER?	QUEM?	COMO?
Testar os sistemas de comunicação. Verificar o funcionamento dos dispositivos de aviso	Coordenador	Fazer ensaio de equipamentos
Convocar os recursos humanos internos e voluntários. Formar os grupos e equipes, por área de atuação.	Coordenador e Chefes de Grupos	Mobilizar os grupos
Ficar de prontidão aguardando novas notificações da Barragem	Todos os envolvidos mobilizados	Se direcionar para os Postos de Comando
Avaliar a necessidade de evacuação das áreas de maior risco, a jusante	Coordenador	Manter contato com a operação da barragem
Iniciar aviso e estabelecer início do processo de evacuação onde julgar necessário	Coordenador	Acionar dispositivos de aviso e delegar tarefas ao grupo de comunicação social
Iniciar transmissão das mensagens de alerta	Grupo de comunicação social	Via rádio e televisão
Proceder a evacuação – a necessidade deverá ser avaliada pela Proteção Civil	Forças Armadas	Seguir procedimentos de evacuação e Plano de Evacuação

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8.23 – Plano de Ação para situação de EMERGÊNCIA

QUADRO 2 - EMERGÊNCIA		
AÇÕES A SEREM TOMADAS EM CASO DE EMERGÊNCIA		
O QUE FAZER?	QUEM?	COMO?
Acionar sistemas de aviso	Coordenador de SMPC	Sirenes fixas, carros de Polícia que vão ao local
Divulgar informações à população	Grupo de comunicação	Autofalantes (igreja e rádio comunitária), ligações telefônicas
Convocar recursos humanos internos e voluntários previstos no PEE	Coordenador de SMPC	Utilizar lista de contatos
Formar os grupos e equipes, por área de atuação	Coordenador de SMPC	Utilizar lista de contatos
Liberar as vias de evacuação	Polícia	Verificar plano de rotas de fuga
Bloquear acessos às áreas potencialmente atingidas	Polícia	Ver mapa de inundação
Iniciar processo de evacuação das áreas de risco	Forças Armadas	Seguir Procedimentos de Evacuação
Enviar meios de transporte para receber as pessoas nos pontos de encontro	Câmara Municipal	No ZAS e ZIP
Promover a triagem	Grupo de saúde	No ZAS e ZIP
Promover atendimento médico e hospitalar a vítimas	Grupo de saúde	No ZAS e ZIP
Fornecer água potável, alimentos e material para sobrevivência	Forças Armadas e Cruz vermelha	No ZAS e ZIP
Operacionalizar abrigos provisórios e montar acampamentos emergenciais	Forças armadas	No ZAS e ZIP
Manejo de Mortos e sepultamento	CM, Serviços de saúde e Cruz vermelha	Encaminhar os mortos para velório para identificação
Emitir relatório	Coordenador de SMPC	

Fonte: elaborada pelo autor.

VII. PROCEDIMENTOS DE EVACUAÇÃO

Esta atividade será coordenada pelo Serviço Municipal de Proteção Civil (SMPC) e os seus aliados mediante seguinte procedimento:

- O Grupo deverá ser dividido em equipas conforme Plano de Evacuação;
- Executarão incursões nas áreas a serem evacuadas, determinando que as pessoas se desloquem para o ZAS e/ou ZIP mostrados no plano de evacuação e rotas de fuga;
- Conduzir as pessoas aos pontos de encontro indicados no plano de evacuação, ZAS e ZIP;
- Proceder ao resgate e ao transporte de pessoas que se encontrarem com dificuldades de Locomoção;
- Vistoriar a área definida para ser evacuada a fim de identificar desavisados;
- Informar ao Grupo de Operações se ainda há pessoas a serem removidas; e
- Receber e agrupar a população e conduzir as pessoas para os meios de transporte.

VIII. RECEPÇÃO E EMBARQUE

O grupo de Operações deverá acionar o setor de Transportes do Grupo de Logística para enviar os meios de transporte necessários para os pontos de encontro, com pelo menos um membro do Grupo de logística. O Grupo de Logística deverá seguir os seguintes procedimentos:

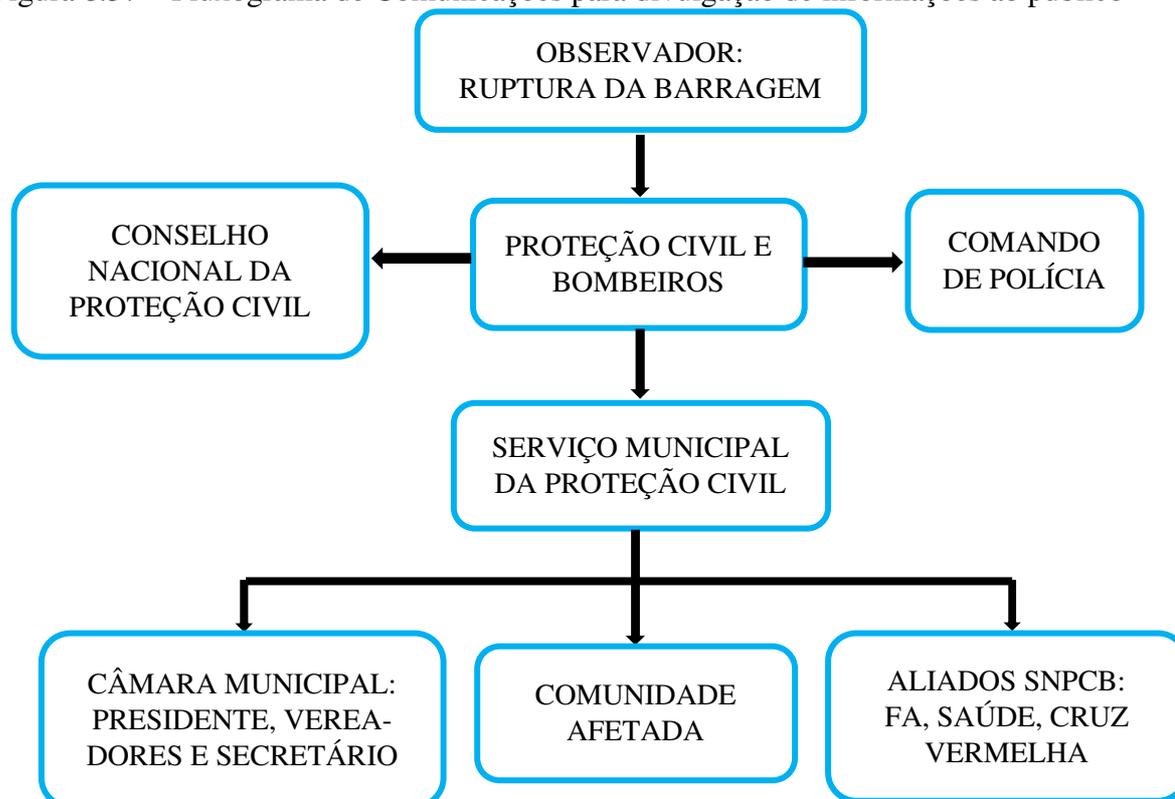
- Enviar quantidade suficiente de transportes para o número previsto de afetados na área a ser evacuada, conforme plano de evacuação;
- O envio de transporte deverá seguir a ordem dos nomes das áreas a serem evacuadas;
- Posicionar os ônibus nos pontos definidos como ZAS, ZIP e ZIS;
- Anotar o número do ônibus, nome do motorista e abrigo de destino;
- Informar ao grupo de Operações quantos, quais e os destinos de todos os veículos que partirem levando a população removida; e
- Registrar e informar o número de desabrigados transportados.

IX. DIVULGAÇÃO DE INFORMAÇÕES AO PÚBLICO

Somente o Governo ou o seu Representante legal, neste caso, o Ministro da Administração Interna, pode declarar a situação de alerta para a totalidade do território nacional ou com o âmbito circunscrito a uma parcela do território nacional e, cabe ao Presidente da Câmara Municipal, declarar a situação de alerta de âmbito Municipal, ou Pessoa/Entidade previamente designada poderão dar entrevistas a imprensa sobre este evento, que é a sua situação de alerta ou emergência (D.L. nº 12/VIII/2012).

As comunicações de emergência à população serão realizadas pelo grupo de comunicação social, seguindo o Fluxograma de Comunicações (FIGURA 8.37). Os meios e recursos utilizados para prevenir ou enfrentar os riscos de acidente grave ou catástrofe são os previstos nos planos de emergência de proteção civil ou, na sua ausência ou insuficiência, os determinados pela autoridade de proteção civil que deve assumir a direção das operações.

Figura 8.37 – Fluxograma de Comunicações para divulgação de informações ao público



Fonte: elaborado pelo autor.

X. PREPARAÇÃO E TREINAMENTO

Conforme a lei nº 12/VIII/2012, compete aos Serviços Municipais de Proteção Civil (SMPC) elaborar planos prévios de intervenção, preparação e treinamento e propor a execução de exercícios e simulacros que contribuam para uma atuação eficaz de todas as entidades intervenientes nas ações de proteção civil, envolvendo as Forças Armadas.

Diferentemente das inundações naturais que ocorrem sazonalmente, as cheias induzidas por barragens podem ocorrer fora da estação chuvosa.

As principais ações a serem tomadas na fase anterior a um desastre dizem respeito a manter as pessoas e os recursos materiais preparados para o caso de uma situação emergencial, mesmo na estação seca.

A Prontidão, ou Preparação, prevista no plano de contingências é obtida através de:

- Intervenções E avaliações anteriores ao desastre;
- Testes, Treinamentos E Revisões nos procedimentos planejados.

Relativamente ao treinamento, revisão e atualização deve-se:

- Atualizar as listas de recursos humanos e materiais no mínimo anualmente e, sempre que necessário;
- Conduzir cursos, seminários, exercícios e simulados para:
 - manter os envolvidos preparados;
 - testar os sistemas de aviso e de comunicação; e
 - avaliar o funcionamento do plano.
- Revisão periódica anual do plano e seus procedimentos.

XI. INTERVENÇÕES E AVALIAÇÕES

O Serviço Municipal de Proteção Civil, elabora planos prévios de intervenção, faz planeamento de apoio às vítimas, atualiza planos de intervenção propondo as soluções que considere mais adequadas, a nível municipal, sendo que o SNPCB elabora e atualiza planos de intervenção a nível nacional e regional.

São ações necessárias para tentar minimizar os danos decorridos de uma inundação:

- Mapeamento e adequação de abrigos, inclusive limpeza e organização dos mesmos;

- Vistoria dos locais de risco pré-mapeados;
 - Alerta à população para não obstruírem as estruturas de drenagem a fim de melhorar o escoamento pluvial;
 - Acompanhamento dos boletins meteorológicos;
 - Manutenção dos sistemas de comunicação com a Barragem;
 - Reuniões da SMPC, de forma sistemática. O SMPC dispõe de sede própria no edifício da prefeitura;
 - Criação de grupos de cooperação entre moradores dos locais de risco;
- Divulgação para a população dos procedimentos de ações durante emergências:
- O sistema de aviso e alerta
 - Ações preventivas
 - Os meios de evacuação
 - Os abrigos preparados
- Fiscalização de construções em áreas de risco para fins de prevenção.

XII. CARACTERIZAÇÃO DOS VALES A JUSANTE DE BARRAGEM

A ocupação de vale a jusante das barragens em Cabo Verde é de uma forma geral todos semelhantes, com ocupação agrícola, extração de inertes e construção de casas e de outras infraestruturas, à exceção do vale a jusante de barragem de Salineiro que também, a ocupação é um pouco semelhante, mas é onde fica localizada a Cidade de Ribeira Grande de Santiago, conhecida também, como Cidade Velha, ex Cidade Capital, considerada a primeira cidade construída pelos europeus, neste caso os portugueses, nos trópicos, declarada Património Mundial da Humanidade (ONU/UNESCO, 2009).

Correia & Pereira (2016, afirmam que um pouco por todo o arquipélago, com particular destaque para a Ilha de Santiago, onde se localiza a capital do país, a extração clandestina de areia (e cascalho) para a construção civil tem sido realizada nas faixas costeiras e nos leitos das ribeiras, sobretudo depois da época chuvosa (neste período os inertes das ribeiras ficam mais limpas), de forma desmedida e sem quaisquer planos de extração e de posterior recuperação das áreas degradadas. Em diversas ilhas do arquipélago são evidentes os impactes ambientais negativos originados pela extração de areia marinha, tais como, perturbação da linha da costa, salinização de solos agrícolas localizados junto ao litoral, perturbação da fauna e da flora costeiras e diminuição de espaços de lazer.

Por outro lado, a Geomorfologia da Ilha de Santiago é marcada essencialmente por dois fatores, geológicos e climatológicos. Em primeiro lugar, pelos sucessivos episódios vulcânicos que originaram não só a Ilha de Santiago mas todo o arquipélago de Cabo Verde, em segundo lugar pelo regime de chuvas torrenciais e ventos de grande intensidade que assolam a Ilha de Santiago.

Os fatores climatológicos referidos têm uma grande influência na quase inexistência horizontes de solo na ilha, preponderando os maciços rochosos aflorantes. O clima seco e árido, associado às chuvas torrenciais, é o fator primordial no desenho do leito das ribeiras e do seu aprofundamento, originando vales profundos e abruptos e relevos e encostas acidentados faz com que os cursos de águas superficiais e subterrâneos, sobretudo quando chove, drenam em direção ao mar (a foz), acumulando em alguns pontos das ribeiras mais profundo e/ou de cota inferior o que faz com que o vale seja também, ocupado como terrenos agrícolas que por sua vez contribuem grandemente para sustentabilidade econômica e financeira das populações da Ilha de Santiago e de Cabo Verde em geral.

A principal actividade econômica praticada em Cabo Verde e na Ilha de Santiago é a agricultura e pecuária, sendo que o Conselho de Santa Cruz onde se localiza as vales a jusantes de Barragens de Poilão (Bacia Hidrográfica de Ribeira Seca), Faveta (Bacia Hidrográfica de Ribeira de Picos) e Figueira Gorda (Bacia Hidrográfica de Santa Cruz), apresenta o maior potencial agrícola nacional abastecendo toda a Ilha de Santiago que é a maior de todas as outras e com mais de 50% de População do País.

Conforme INE (2010), cada casal têm pelo menos dois filhos, sendo que mais de metade (56%) tem cinco ou mais filhos. Conseqüentemente, cerca de dois terços (64%) dos agregados familiares têm, pelo menos, seis elementos. A dimensão média destes agregados familiares (6,2 elementos) é claramente superior ao valor registado no conselho (4,4 elementos).

Os agregados familiares dos inquiridos apresentam composição muito diversificada, podendo incluir, para além dos inquiridos e dos seus cônjuges, os pais e os filhos de pelo menos um dos elementos do casal, os netos e até filhos de um familiar ou de uma pessoa com estreita relação de amizade. Relativamente às atividade profissional, as atividades “domésticas” das mulheres não se resumem apenas às lides de casa, incluem ainda outras atividades, como agricultura, silvicultura e pecuária.

O Recenseamento Geral da Agricultura de 2004, refere que 70% da área total cultivável (443.588 Litros, correspondente a 44.359 ah) em Cabo Verde está distribuída por explorações de pequena dimensão, com áreas entre 0.1 a 1 ha. Apenas 11% do total da área cultivável está associada a explorações com mais de 2 ha.

Das várias visitas efetuadas às todas localidades a jusante das barragens e das informações tiradas junto dos moradores, Associação dos Agricultores e Delegação do Ministério e Ambiente que existe em cada Município, quase todos os moradores dos vales a jusante (mais de 90%) praticam agricultura e por isso à quantidade de Agricultores praticamente coincidem com a quantidade de moradores, sendo que há uma minoria de Agricultores que são oriundos de outras localidades.

As infraestruturas e edificações estimadas e apresentadas no quadro 3 a seguir, algumas estão georreferenciadas e outras foram extraídas dos levantamentos efetuados no local e, das informações fornecidas pelas Delegações do Ministério de Agricultura e Ambiente em cada Município, incluindo os custos estimados das propriedades agrícolas e respetivos equipamentos.

Com base nas informações acima descritas a ocupação do vale a jusante das barragens se resume nas seguintes situações:

1. construções de casas;
2. terrenos e infraestruturas agrícolas;
3. construção de poços, furos e reservatórios para extração de águas subterrâneas para consumo e rega;
4. extração e exploração de materiais de construção (areia, brita, pedra etc.);
5. fábricas de produção de aguardente;
6. pontes e rodovias municipais e nacionais;
7. infraestruturas hidráulicas como diques de correção torrencial, muros de suporte de taludes, nascentes e galerias de captação de água;
8. Campos de futebol;
9. árvores para evitar a erosão;
10. estábulos para animais domésticos.

Os mapas de inundação de PEB anteriormente apresentados ilustram algumas situações e infraestruturas existentes a jusante das barragens incluindo indicação de Zonas de Auto Salvamento (ZAS), Zonas de Intervenção Principal (ZIP) e Zonas de Intervenção Secundária (ZIS) que conforme descrito acima é característico de todos os vales a jusante.

Na Tabela 8.24, estão resumidas as principais características do vale a jusante das barragens, ilustrando infraestruturas/Edificações estimadas, população estimada e respetivos custos estimados em moedas de Escudos Caboverdeanos (ECV) e em Euros.

Tabela 8.24 – Características do vale a jusante das barragens

Barragem/ Vale	Município	Edificações Estimadas	Custo Estimado (ECV)	Pop. urbana	Pop. rural
Faveta/ Ri- beira de Pi- cos	Santa Cruz	1 Ponte	3,000,000.00	400	1100
		2 estradas	2,500,000.00		
		500ha regadio	50,000,000.00		
		1 escola	2,500,000.00		
		5 diques	7,500,000.00		
		50 casas	75,000,000.00		
		1 campo futebol	5,940,000.00		
		8 furos	32,000,000.00		
		5 poços	5,000,000.00		
F. Gorda/ Santa Cruz	Santa Cruz	2 estradas	2,500,000.00	300	80
		50 casas	75,000,000.00		
		2 furos	8,000,000.00		
		1 pontão	3,000,000.00		
		200 ha regadio	20,000,000.00		
		1 infraestr. agrícola	4,000,000.00		
		2 poços	2,000,000.00		
Flamengos	São Mi- guel	1 ponte	50,000,000.00	300	150
		2 estradas	2,500,000.00		
		1 campo futebol	5,000,000.00		
		1 jardim de infância	2,500,000.00		
		1 escola	4,500,000.00		
		1 delegação municipal	2,500,000.00		
		50 casas	75,000,000.00		
		4 furos	16,000,000.00		
		3 diques	4,500,000.00		
		4 poços	4,000,000.00		
		200ha de regadio	20,000,000.00		
Poilão/ Ri- beira Seca	Santa Cruz	2 estradas	2,500,000.00	360	600
		60 casas	90,000,000.00		
		1 unidade gestão	5,000,000.00		
		1 delegação do MAA	15,000,000.00		
		1 complexo de lazer	8,000,000.00		
		7 furos	28,000,000.00		
		10 poços	10,000,000.00		
		500 há de regadio	50,000,000.00		
		Sali- neiro/Rib. G. Santi- ago	Rib. G. Santiago		
1 monumento histórico	pelourinho				
Câmara Municipal	12,000,000.00				
2 estradas	2,500,000.00				
3 diques	4,500,000.00				
3 poços	3,000,000.00				
2 pousadas	40,000,000.00				
1 igreja	25,000,000.00				
70 casas	105,000,000.00				
1 banco	15,000,000.00				
4 restaurantes	25,000,000.00				

Barragem/ Vale	Município	Edificações Estimadas	Custo Estimado (ECV)	Pop. urbana	Pop. rural
		1 fabrica de aguardente	50,000,000.00		
Saqui- nho/Charco	Santa Catarina	50 há de regadio	5,000,000.00	360	600
		5 poços	5,000,000.00		
		9 reservatórios	9,000,000.00		
		4 furos	16,000,000.00		
		5 diques	7,500,000.00		
		Levada	500,000.00		
		1 pousada	8,000,000.00		
		1 estrada	1,500,000.00		
		Sub total	1,048,440,000.00	1890	2095
		Custo estimado de barragens	2,400,000,000.00		
		Total geral em Escudos Caboverdeanos	3,448,440,000.00	ECV	
		Total geral em Euros	31,349,454.55	EUROS	

Fonte: elaborada pelo autor.

8.5. Proposta de um Sistema de Gestão de Segurança de Barragens para Cabo Verde com base na experiência internacional

Para concluir este trabalho, é proposto um sistema de organização institucional que permita, de forma otimizada e sustentável, a concentração de todas as ações iniciadas para dotar Cabo Verde de um Sistema da Gestão de Segurança de Barragens.

Este trabalho, vem, na linha do que se desenvolveu nos capítulos anteriores, sobretudo a nível de resultados de classificação das barragens em termos de PR, CRI e DPA e elaboração de PAE que abrange o PEB e o PEE, complementar os resultados com elaboração de uma proposta de um sistema de gestão de segurança de barragens para Cabo Verde.

A falta de um sistema de gestão de segurança de barragens, oficialmente e, ausência de legislação sobre barragens em Cabo Verde de uma forma geral, tem traduzido os atos e atividades de gestão de segurança de barragens em alguma descoordenação institucional.

8.5.1. Introdução

No Brasil, a Lei nº 12.334 de 2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragem, estabelece no sua Seção III, que o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) tem como objetivo coletar, armazenar, tratar, gerir e disponibilizar

para a sociedade as informações relacionadas à segurança de barragens em todo o território nacional.

Trata-se de um sistema onde os órgãos fiscalizadores e os empreendedores enviarão informações sobre as barragens de sua jurisdição para que a ANA possa condensar um documento único futuro (Relatório Anual de Barragens) além de permitir uma gestão unificada das barragens brasileiras. Os responsáveis diretos pelas informações do SNISB são:

- Agência Nacional de Águas (ANA), como gestora e fiscalizadora;
- Os órgãos fiscalizadores, conforme definido no Art. 5 da Lei Nº. 12.334; e
- Empreendedores.

Aos órgãos fiscalizadores compete enviar, anualmente, à ANA, as informações referentes as barragens sob sua jurisdição para que a citada agência possa, na qualidade de gestora do SNISB, reunir tais informações. Além de obter as informações sob suas barragens, cabe, também, à ANA desenvolver plataforma informatizada para sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações, devendo contemplar, segundo RSB (2011):

- Barragens em construção, em operação e desativadas;
- Estabelecer mecanismos e coordenar a troca de informações com os demais órgãos de fiscalização;
- Definir as informações que deverão compor o SNISB de forma articulada; e
- Disponibilizar o acesso a dados e informações, para a sociedade por meio da Rede Mundial de Computadores.

O Relatório de Segurança de Barragens é um importante instrumento cujo objetivo principal é a disponibilização de informações relativas à segurança das barragens brasileiras a toda a sociedade civil. Importante salientar que esse instrumento se relaciona com todos os demais, uma vez que as informações relativas à implementação daqueles instrumentos serão consolidadas para elaboração do relatório. Ademais, servirá como um referencial importante e registro histórico da evolução da gestão de segurança de barragens no país.

Cabe à ANA, anualmente, coordenar a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens. Para isso, todos os órgãos e agentes fiscalizadores de segurança de barragens do país, nas esferas federal e estadual (em todas as unidades da federação), devem enviar à ANA as informações pertinentes às barragens sob sua jurisdição.

A ANA deverá reunir as informações passadas e, juntamente com as informações das barragens fiscalizadas pela própria Agência, encaminhá-las ao CNRH, de forma consolidada. À este cabe apreciar o referido Relatório, fazendo, se necessário, recomendações para melhoria da segurança das obras, bem como encaminhá-lo ao Congresso Nacional até 20 de setembro de cada ano.

Em Portugal o Decreto-Lei nº 344/2007 de 15 de Outubro, estabelece que as entidades de administração pública que fazem o controlo da segurança de barragem, as quais são:

- O Instituto da Água, I. P. (INAG), na qualidade de organismo com competência genérica de controlo de segurança das barragens, que se designa por Autoridade Nacional de Segurança de Barragens (Autoridade);
- O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), na qualidade de consultor da Autoridade em matéria de controlo de segurança das barragens; e
- A Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), como entidade orientadora e coordenadora das atividades de proteção civil ao nível nacional.

As outras entidades que não são públicas são controladas e fiscalizadas pela Autoridade Nacional de Segurança de Barragem (ANSB), em todas as fases da vida das barragens. A Comissão de Segurança de Barragens (CSB), cujo presidente será designado por despacho do membro do Governo com tutela sobre o INAG, funciona junto da Autoridade e tem a composição e as competências definidas no presente Regulamento e, o Dono de Obra é a entidade responsável pela obra perante a Autoridade, para efeitos de aplicação do presente Regulamento, em virtude de deter um título jurídico suficiente para construir ou explorar a barragem ou, na ausência daquele título, em virtude da efetiva execução material da obra ou da sua exploração.

A ANSB, deve ainda:

- Promover a intervenção do LNEC, nos termos do presente Regulamento, fazer cumprir o plano do primeiro enchimento, plano de observação, inspeção e controlo de segurança no geral;
- Colaborar com a ANPC no planeamento e acompanhamento de situações de emergência, nomeadamente no envio de informação para elaboração de planos de emergência e promover a elaboração do plano de emergência externo a ser aprovado pela Comissão Nacional de Proteção Civil (CNPC), de acordo com a legislação de proteção civil. Compete ainda a ANPC, emitir parecer sobre o plano de emergência interno, nomeadamente nos aspectos que se articulam com o plano de emergência externo e os sistemas de aviso e alerta.

Ainda, de acordo com a mesma lei compete a CSB o seguinte:

- a) Pronunciar -se obrigatoriamente sobre normas a aprovar pelo Governo relativas a segurança de barragens;
- b) Pronunciar -se obrigatoriamente, sem efeito suspensivo, quando haja recurso do dono de obra quanto a decisões da Autoridade em matérias abrangidas pelo presente Regulamento;
- c) Pronunciar -se sobre assuntos relativos a segurança de barragens que lhe sejam submetidos pela Autoridade ou pelo Governo, nomeadamente na sequência de ocorrências excepcionais ou de circunstâncias anómalas;
- d) Analisar a situação das barragens portuguesas do ponto de vista da segurança e recomendar ao Governo e à Autoridade a adopção de medidas para salvaguarda da segurança das barragens.

Compete ao Proprietário (Dono de Obra) o seguinte:

- Cabe ao dono de obra suportar as despesas originadas pelo controlo de segurança, pelas medidas de proteção civil no âmbito do plano de emergência interno e ainda por outras medidas consideradas indispensáveis pela Autoridade.
- As despesas resultantes da actividade das entidades da Administração Pública envolvidas no controlo de segurança de barragens, por via das competências atribuídas no presente Regulamento, serão suportadas pelo dono de obra, num montante anual que depende da fase da obra, dos danos potenciais associados e da dimensão e do tipo de obra, e que constará de Tabela a publicar por portaria conjunta dos membros do Governo responsáveis pelas áreas das obras públicas e do ambiente.

Ao INAG, compete suportar, logística e financeiramente, o funcionamento da CSB.

Conforme Menescal (2009), muitos dos esquemas regulatórios dos vários países estudados se baseiam em leis específicas para segurança de barragens, a autoridade reguladora trata a segurança de barragem como parte de uma atribuição mais ampla, por exemplo África do Sul. Outros esquemas tratam a segurança de barragem como um aspecto dentro de uma legislação mais geral.

A legislação aplicável pode tratar de maneira mais geral com água, barragens, energia ou recursos naturais. Alguns países/estados/províncias designam uma autoridade reguladora exclusivamente dedicada para a gestão da segurança de barragens. Em alguns desses países as

autoridades reguladoras especificamente designadas, podem compartilhar a atribuição sobre aspectos de segurança de barragem com outras instituições reguladoras.

Na maioria dos casos, os esquemas regulatórios não contêm normas explícitas que devem ser seguidas para a gestão da segurança de barragens. Muito pelo contrário, as legislações deixam esse detalhamento a critério da entidade reguladora, que pode emitir seus próprios manuais e orientações. Por exemplo, o Estado de Washington, nos EUA, publicou sete volumes de orientações para segurança de barragens.

Mesmo quando esses manuais e orientações não são impostos legalmente, eles irão fornecer importante evidência das melhores práticas e dos padrões que os proprietários devem atender para a boa gestão da segurança de suas barragens. Em poucas jurisdições as regulamentações contêm algumas orientações ou requerimentos para a atividade de segurança da barragem propriamente dita (p.ex., Portugal).

Os esquemas regulatórios em diversos países/estados/províncias requerem que profissionais habilitados sejam os responsáveis pela elaboração de documentos e relatórios exigidos para a gestão da segurança. Em alguns países (p.ex. Reino Unido), a legislação requer a criação de uma espécie de cadastro de profissionais pré-habilitados, contemplando diversos níveis de qualificação, para participar de atividades relacionadas com gestão da segurança de barragens. As exigências para qualificação são estabelecidas pela entidade reguladora em parceria com as associações profissionais.

Segundo ANCOLD (2008), uma regulamentação sobre segurança de barragens deve:

- identificar claramente as responsabilidades dos proprietários, dos governos e da equipe da barragem;
- contemplar mecanismos de envolvimento da população sobre as questões de segurança e apropriada consulta à população;
- garantir que as partes envolvidas tenham a experiência adequada.
- designar alguém como sendo responsável pela manutenção da informação acerca da barragem para referência pública e para uso em investigação futura assim como nas revisões;
- incluir medidas de treinamento da equipe da barragem nos procedimentos durante situações de emergência;
- ter um programa de gerenciamento da qualidade que cubra todos os aspectos do projeto, construção e operação da barragem;

- permitir revisões periódicas e, se necessário, revisões das políticas e procedimentos da barragem.

Com base nas observações acima expostas sobre segurança de barragem e esquemas regulatórios de alguns países, o Autor apresenta o seguinte itens para compor o sistema de gestão de segurança de barragens de Cabo Verde:

- as entidades responsáveis pelo controlo de segurança das barragens, que se exerce desde a fase do projeto e por toda a vida das obras, devem ser entidades da Administração Pública ou empresas participadas do estado (E.P.E.), por forma a que o problema de financiamento das atividades a serem materializadas e exercidas esteja garantido e/ou previsto no orçamento do estado, considerando que muitas destas atividades, muitas vezes, são de carácter de extrema urgência e não há tempo para procura de financiamento, a não ser numa fase posterior ;
- a legislação deve considerar questões de gestão de segurança de barragens para todos os estágios do ciclo de vida de uma barragem. Portanto, deve incluir as fases de projeto, construção, primeiro enchimento, operação, modificações, até a desativação ou abandono;
- todas as barragens devem ser cadastradas, pois devido ao carácter dinâmico da ocupação a jusante, o que hoje tem DPA baixo, no futuro próximo pode ter DPA significativo ou elevado;
- a regulamentação que estabelece o esquema regulatório não deve consistir de um único documento. As competências e princípios estabelecidos em legislação primária (lei), mais difícil de alterar, e detalhes na regulamentação (decreto, portarias etc.), menos difíceis de alterar. Um maior nível de detalhe deve ser estabelecido em instrumentos de relativamente fácil alteração (p.ex. resoluções, instruções normativas etc.). A instituição ainda poderá elaborar orientações e manuais para apoio aos empreendedores sobre procedimentos e técnicas a serem utilizados;
- o regulamento de segurança da barragem deve levar em conta as características particulares do clima de Cabo Verde, o regime temporário e torrencial dos cursos de água, a orografia, a geologia, as características mecânicas e hidrogeológicas dos maciços rochosos e terrosos e dos materiais de construção disponíveis, que

levam, designadamente, à não consideração de obras em terra e de propostas específicas para os órgãos de segurança e de exploração;

- Os planos de emergência devem ser elaborados pelos proprietários em conjunto com órgãos de proteção civil, com maior ou menor envolvimento do público, para todas as barragens independentemente de classe de risco;
- Um aspecto crucial para a sustentação do sistema, com que se defrontam todos os países, é o do financiamento da implementação de medidas corretivas, quando se façam necessárias para enquadrar adequadamente o empreendimento na classificação de risco que lhe corresponda;
- a lei deve estipular em termos claros as responsabilidades de todas as partes envolvidas na gestão de segurança de barragens, a identidade da autoridade reguladora responsável com segurança de barragem e a autoridade responsável pelo tratamento das emergências que são causadas pela ruptura da barragem;
- o modelo deve tentar utilizar as instituições existentes, somente definindo melhor o papel dos diferentes atores em relação à gestão da segurança de barragens. Somente será proposta a criação de uma nova instituição no caso de extrema necessidade. O ideal é que as atividades sejam absorvidas por instituições já existentes;
- a lei deve explicitar de forma clara as relações que deverão existir entre diferentes autoridades com responsabilidade na gestão de segurança da barragem. A relação entre autoridade, proprietário, órgãos fiscais, proteção civil a nível nacional e municipal, Municípios, Associação de agricultores e comunidades locais;
- a lei deve estipular que a autoridade reguladora desenvolva atividades de educação pública acerca de segurança de barragem e que o esquema regulatório incentive a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e procedimentos;
- resumindo, e considerando que o Relatório de Segurança de Barragens é um importante instrumento cujo objetivo principal é a disponibilização de informações relativas à gestão de segurança das barragens à toda a sociedade civil. E, é importante salientar que esse instrumento se relaciona com toda as entidades com responsabilidade na gestão de segurança de barragem, uma vez que as informações relativas à implementação daqueles instrumentos serão consolidadas para elaboração do relatório, e servirá como um referencial importante e registro histórico da evolução da gestão de segurança de barragens de todas as barragens a

nível do país, a lei deve promover a criação de uma instituição/entidade específica para tratamento e encaminhamento destas informações e instrumentos que são ainda relevantes para o controlo de segurança, tais como: o Arquivo Técnico da Obra e o Livro Técnico da Obra.

Vantagens:

Com esta proposta de modelo de gestão de segurança os Técnicos, Engenheiros e Instituições nacionais, apresentados, acompanham todo o processo de estudos, projetos e construção que traduzem em experiências e benefícios para o país, contribuindo assim de uma forma sustentável para o desenvolvimento deste setor que tem pautado para muitas lacunas.

Com esta proposta de sistema de gestão de segurança de barragem fica tudo coordenado e definido e não haverá lacunas, sobreposição e falhas na gestão de segurança. Cada Instituição saberá agir de forma clara, transparente e participativa, com base no modelo de gestão de segurança proposto.

Outra questão também, importante é que tem sido realizada várias formações sobre gestão e segurança de barragem no país que o Autor participou várias vezes, mas que não tem sido aproveitada porque, a iniciativa tem sido de instituições diferentes com interesse diferentes.

Com esta proposta de modelo de gestão de segurança de barragem teremos um *staff* técnico permanente que participa nas formações, incrementa seu *know-how*, fica sempre e na mesma instituição, neste caso, a ANSB sob proposta do LEC-E.P.E., todas informações que independente dos Governos, o assunto será conduzido de melhor forma e sempre com um arquivo técnico que futuramente auxiliará toda a administração e sectores ligados à gestão e segurança de barragem, aos Governos e à pesquisa.

Resumindo, este um modelo simples, que será implementado sem grandes encargos financeiros, portanto são instituições já existentes, basta fazer algumas alterações na lei e/ou emitir novos regulamentos. A constituição da CCSB, é uma forma de Engenheiros e Técnicos Sénior, de várias instituições, com experiências comprovada em Hidráulica e outras áreas importantes participem na orientação e condução do trabalho a nível de gestão de segurança de barragem, que através da ANSB, vão auxiliar ao Governo e Parlamento (Deputados) a legislar de forma segura e credível.

8.5.2. Sistema de Gestão de Segurança de Barragens para Cabo Verde

Analisando vários modelos institucionais mundiais a nível de legislação e regulação sobre gestão de segurança de barragem, o modelo mais simples, prático e exequível para Cabo Verde, é o modelo em que as entidades responsáveis pela gestão e controlo de segurança das barragens, que se exerce desde a fase do projeto e por toda a vida das obras, devem ser entidades da Administração Pública ou empresas participadas do estado (E.P.E.).

Sugere-se o modelo consensual para a gestão da segurança. Esse modelo permite que instituições e respetivos Técnicos e recursos humanos, que mesmo na ausência de regulação de segurança de barragem em Cabo Verde, vem acompanhando todo o processo de implementação, planificação, construção, primeiro enchimento, plano de observação e inspeção de barragens em Cabo Verde, embora de uma forma descoordenada com muitas sobreposições de função.

Esta forma de gestão de segurança proposta, tem a sua vantagem que é injeção de menos ou poucos recursos materiais, mas tem grande desafio em termos de recursos Técnicos e humanos e o seu maior desafio será a articulação entre as instituições e o estabelecimento de um modelo que padronize alguns critérios mínimos de gestão de segurança de barragem em Cabo Verde.

Outra questão muito importante em termos de gestão de segurança, é que todas barragens, que foram construídas, até este momento são de domínio público e pertencem ao Estado. O Dono de obra, neste caso, foi representado, durante construção, pela Fiscalização, que é órgão/empresa independente e privada à semelhança de empresas construtoras. Apenas gestão de segurança de barragem é do domínio público;

Considerando também, que essas instituições têm desenvolvidos protocolos com instituições congéneres em outros países, sobretudo Portugal, Brasil e CPLP no geral, que permite uma consultoria, formação, e trocas de informação e de experiências que permitem uma assessoria muito importante para a implementação do modelo de gestão e segurança de barragem proposto.

Assim, com base do que foi descrito no capítulo 2 e, considerando os comentários e sugestões acima, segue o modelo proposto:

- A Agência Nacional de Água e Saneamento-ANAS, na qualidade de organismo com competência genérica de controlo de segurança das barragens, que se designa por Autoridade Nacional de Segurança de Barragem (ANSB) - Autoridade;

- O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LEC – E.P.E.), na qualidade de consultor da Autoridade em matéria de controlo de segurança das barragens;
- Autoridade Nacional de Proteção Civil e Bombeiros (ANPCB), como entidade orientadora e coordenadora das atividades de proteção civil ao nível nacional;
- A Comissão Consultiva de Barragem (CCSB), como Fórum nacional de representantes de entidades públicas e privadas, para promoção, divulgação e debate das questões ligadas à engenharia de barragens, que acompanhará a aplicação do Regulamento proposto;
- Direção Nacional de Ambiente -DNA, na qualidade de responsável nacional por questões ambientais; e
- O Dono de Obra, entidade pública ou privada, responsável direto pela exploração da barragem perante a Autoridade.

Mas para que estas instituições tenham uma total competências na gestão de segurança de barragem, as suas respetivas leis terão de ser adaptadas à nova lei de legislação sobre barragem proposta, que irá criar o Regulamento de Segurança de Barragem em Cabo Verde. Isto é, terão de ter as seguintes competências adicionais, considerando aqui as mais essenciais. Dotar à ANAS, neste caso como ANSB, em complemento com Decreto Lei nº 46/VIII/2013 das seguintes atribuições para que possa ter competências para coordenar as entidades acima apresentadas e desempenhar as funções de Autoridade:

- Em matéria de controlo de segurança compete à Autoridade promover e fiscalizar o cumprimento do presente Regulamento;
- Pronunciar-se sobre os projetos das barragens e proceder à sua aprovação, designadamente do ponto de vista da aplicação do presente regulamento, solicitando, para tal, parecer ao LEC - E.P.E.;
- Aprovar os projetos de alteração, reparação, abandono e demolição de obras, após parecer do LEC - E.P.E.;
- Aprovar a classificação e/ou reclassificação das barragens proposta pelo LEC - E.P.E.;
- Autorizar, na sequência da inspeção prévia e sob parecer do LEC - E.P.E., o início do enchimento;
- Intervir, em caso de incumprimento das suas disposições por parte do Dono de Obra, podendo determinar a interrupção da construção e do primeiro enchimento, o condicionamento da exploração, o esvaziamento da albufeira, ou mesmo a demolição da barragem;

- Determinar a elaboração de estudos e ensaios, bem como a realização de obras de correção e de outras medidas para a garantia da qualidade da obra e da segurança de pessoas, de bens e ambiente;
- Fornecer, por solicitação do Dono de Obra, o Livro Técnico da Obra, devidamente paginado e selado, que o Diretor de Obra e o Diretor de Exploração deverão manter atualizado;
- Enviar ao SNPCB os Planos de Emergência integrantes dos Planos de Segurança constantes dos projetos, para elaboração de parecer e coordenação dos procedimentos de emergência,
- Enviar à DNA os Estudos de Impacte Ambiental e Socioeconómico e os Planos de Segurança Ambiental para análise;
- Acreditar eventuais consultores, por solicitação do Dono de Obra e sob parecer do LEC - E.P.E.; e
- Aprovar a designação pelo Dono de Obra do Diretor de Exploração.

No âmbito do Sistema Nacional de Proteção Civil e Bombeiros (SNPCB), criado pela lei nº 12/VIII/2012, são competências da Autoridade Nacional de Proteção Civil e Bombeiros (ANPCB), para todas as barragens:

- Emitir parecer sobre o plano de emergência interno, nomeadamente nos aspectos que se articulam com o plano de gestão de emergência externo e os sistemas de aviso e alerta;
- Promover a elaboração do plano de gestão de emergência externo a ser aprovado pela Centro Nacional de Proteção Civil (CNPC), de acordo com a legislação de proteção civil;
- As ações de proteção civil são realizadas através das estruturas próprias do sistema de proteção civil, em colaboração com todas as entidades intervenientes;
- Estabelecer coordenação com outras entidades ligadas aos procedimentos de proteção civil, entre as quais a Associação Nacional de Municípios (ANM) e as Câmaras Municipais dos conselhos de implantação das barragens; e
- Compete ao SNPCB coordenar as atividades de proteção civil no caso de calamidade, de ocorrência de um acidente com uma barragem ou da sua iminência.

Por solicitação da ANSB a LEC-E.P.E. deve:

- Aprovar projetos, elaborar relatórios, emitir pareceres sobre planos de primeiro enchimento, plano de observação, ensaio, inspeções e acompanhar a construção de obras e comportamento das barragens ao longo da sua vida e comunicar à ANSB eventuais incumprimentos do regulamento por parte do Dono de Obra; e
- Fiscalizar o cumprimento das obrigações do dono de obra em colaboração com a Autoridade.

Ao Dono de Obra compete-lhe as seguintes atribuições:

- Submeter o Projeto e todos os estudos de apoio necessários à aprovação da ANSB;
- Constituir o Arquivo Técnico da obra;
- Solicitar à ANSB o Livro Técnico da Obra, mantendo-o atualizado e ao dispor da ANSB e do LEC - E.P.E.;
- Submeter à aprovação da ANSB a designação do Diretor de Obra;
- Comunicar à ANSB e ao LEC - E.P.E. a data de início da construção e promover a execução das obras em conformidade com os projetos aprovados e as boas práticas de construção;
- Submeter à aprovação da ANSB eventuais propostas de alteração do Projeto;
- Comunicar ao LEC - E.P.E., em tempo útil, as operações relativas à instalação do sistema de observação;
- Cumprir o Plano de Segurança;
- Constituir um arquivo dos dados e resultados das campanhas de leitura da aparelhagem do sistema de observação, quando existente, enviando ao LEC - E.P.E. estes elementos, via Web, imediatamente após a sua obtenção;
- Submeter à aprovação da ANSB, na fase final da construção, a designação do Diretor de Exploração;
- Submeter à aprovação da ANSB o Plano de Primeiro Enchimento;
- Comunicar à ANSB e ao LEC - E.P.E. a data prevista para o final da construção, com vista à realização da respetiva inspeção final;
- Comunicar à ANSB e ao LEC - E.P.E., em tempo útil, a data prevista para o início do enchimento da albufeira, com vista à realização da respetiva inspeção prévia;
- Realizar de acordo com o presente regulamento as inspeções de rotina, enviando ao LEC - E.P.E. os seus resultados;

- Participar nas Inspeções Principais e especiais realizadas pelo LEC - E.P.E. sob coordenação da ANSB;
- Elaborar os relatórios de comportamento após o primeiro enchimento da albufeira e de referência após o primeiro período de exploração normal, de acordo com o estabelecido no presente regulamento, e enviá-los ao LEC - E.P.E. para parecer;
- Enviar à DNA o Plano de Ordenamento da zona limítrofe da albufeira para parecer;
- Em caso de abandono ou demolição, submeter à aprovação da ANSB o respetivo projeto de abandono ou demolição e proceder à sua execução;
- Suportar as despesas originadas pelo controlo de segurança, pelas medidas de proteção civil no âmbito dos Planos de Emergência e ainda por outras medidas consideradas indispensáveis pela ANSB;
- Suportar os encargos resultantes da atividade das entidades da Administração Pública envolvidas no controlo de segurança das barragens, por via das competências atribuídas no presente regulamento, conforme a dimensão e classe de risco da obra.

Relativamente à CCSB, cujo presidente será designado por despacho do membro do Governo com tutela sobre o ANAS, sendo os restantes membros designados pela entidade que representam, funciona junto desta agência, funciona em estreita coordenação com a CNAS, instituição criada pela lei nº 45/VIII/2013, sendo os membros com experiência comprovada em matéria de Engenharia Civil/Hidráulica e gestão de segurança de barragem.

A CCSB será constituída por:

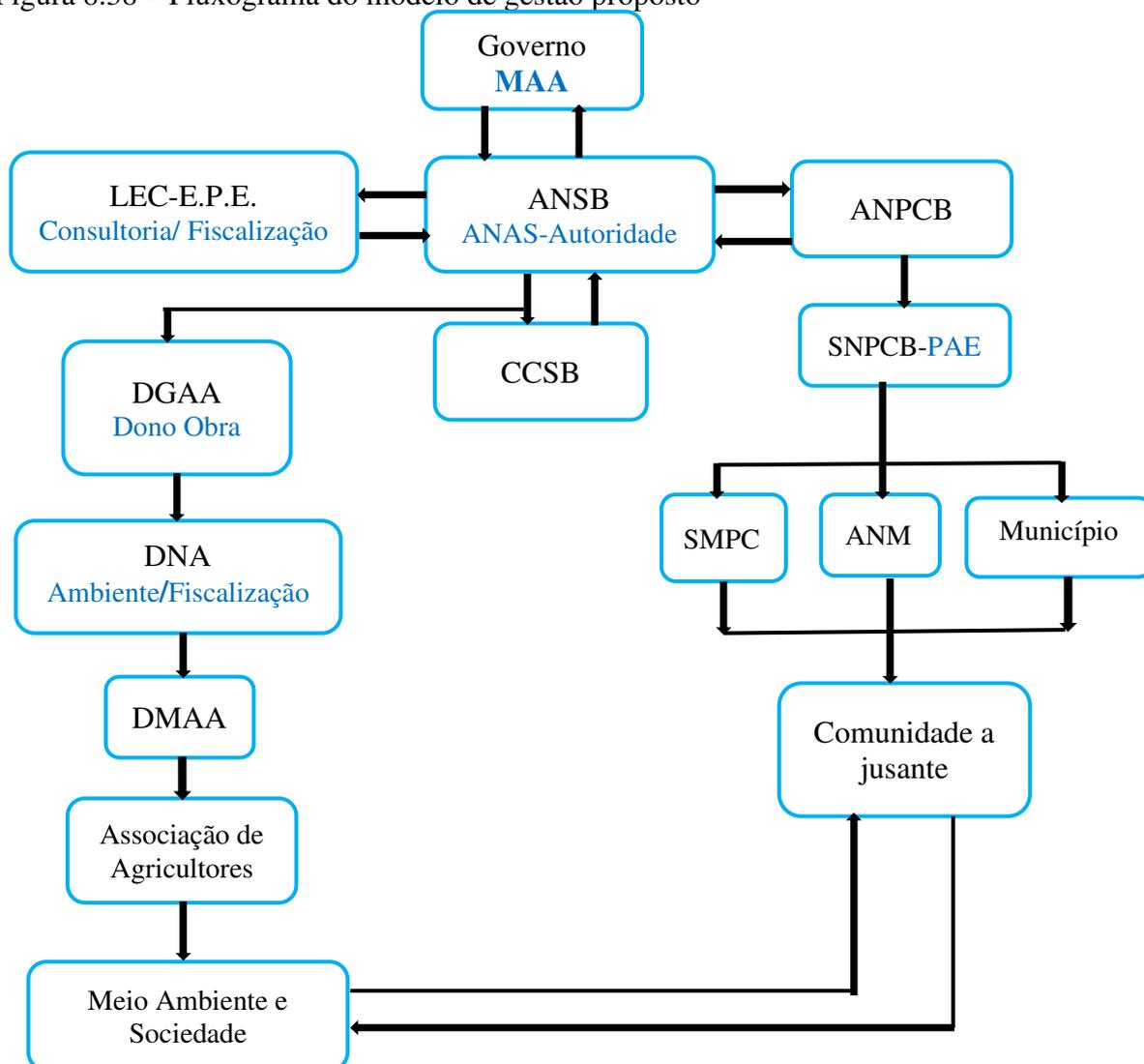
- Dois representantes da Autoridade;
- Dois representantes do LEC-E.P.E., especialistas, respetivamente, em barragens de betão e alvenaria e em hidráulica, um dos quais secretariará;
- Dois representantes da ANPCB, sendo um especialista em análise de riscos e planeamento e outro do comando operacional;
- Dois professores universitários de cursos de Engenharia Civil, com currículo em aproveitamentos hidráulicos, propostos pelo Conselho de Reitores;
- Um representante da Ordem dos Engenheiros de Cabo Verde (OECV);
- Dois representantes do Ministério da Agricultura e Ambiente (MAA);
- Dois representantes das Delegações do MAA;
- 1 representante de Associação Nacional dos Municípios (ANM);
- Dois representantes das associações de agricultores.

No âmbito do presente Regulamento compete à Comissão Consultiva de Segurança de Barragens (CCSB) analisar a sua aplicação, traduzida em parecer de ordem geral sobre a situação das barragens cabo-verdianas do ponto de vista da segurança, a emitir anualmente, e recomendar ao Governo e à Autoridade a adoção de medidas para salvaguarda e melhoria dessa segurança.

Ao ANAS, na qualidade de Autoridade, compete suportar, logística e financeiramente, o funcionamento da CCSB.

O Fluxograma da Figura 8.38 ilustra as instituições já existentes em Cabo Verde (ANAS, LEC-E.P.E., ASPCB, DNA e CCB), como acima descrito, que direta ou indiretamente atuam alguma vez na gestão de segurança em Cabo Verde.

Figura 8.38 – Fluxograma do modelo de gestão proposto



Fonte: elaborado pelo autor.

8.5.3. Validação do modelo proposto

A construção das barragens em Cabo Verde (Faveta, Salineiro, Saquinho, Figueira Gorda, Banca Furada e Vale da Garça) foi na ausência de legislação sobre a gestão e segurança de barragem. Isto significa que o projeto não foi aprovado pelas autoridades nacionais, apesar o mesmo ter sido elaborado fora do país e por estrangeiros. Os Projetistas, o empreiteiro e a fiscalização são todos do mesmo país. Não sabemos, neste caso, se foram garantidas as questões fundamentais da gestão e da segurança da barragem e assunção plena de responsabilidade que o assunto merece.

Com este modelo de sistema de gestão de segurança proposto, o Dono de Obra era obrigado a submeter o projeto à aprovação da Autoridade, portanto ANAS, sob parecer do LEC-E.P.E. O LEC E.P.E. incluindo acompanhamento da obra, plano do primeiro enchimento, relatórios, planos de observação, ensaio e inspeção e um arquivo técnico da obra, incluindo As Built e juntamente com a livro técnico da obra para submeter à Autoridade para entregar ao Dono de Obra, para constituição de um arquivo técnico e digital.

A DNA elabora plano ambiental e acompanha a obra e toda fiscalização ambiental, juntamente com DMAA e submete à Autoridade, sob parecer do LEC E.P.E. e tinha que entregar à DGMAA.

O SNPCB e SMPC, em conformidade com ANSB elabora planos de emergências e aproveitam a fase de construção da obra para articular algumas questões de gestão de planos de emergência nos vales a jusantes, que havendo alguma dúvida tinha que ser esclarecida durante a fase construtiva. Portanto, é com esta proposta de gestão de segurança e com os planos já apresentados acima, PEB e PEE, que futuramente os SNPCB e SMPC irão agir e validar todo o sistema de gestão de segurança e emergência nos vales para reduzir as vítimas mortais.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo simular computacionalmente o rompimento hipotético das barragens de Faveta, Figueira Gorda, Flamengos, Poilão, Salineiro e Saquinho e através de resultados gráficos como hidrogramas de vazão a jusante e mapas de inundações, analisar o impacto causado nas imediações dos vales do canal à jusante e aplicar métodos para auxiliar a elaboração de planos de ações emergenciais contra inundações originadas a partir da ruptura destas barragens.

Os resultados obtidos da simulação de rompimento nos softwares HEC-HMS e HEC-RAS, em que a cota de elevação de vazão de ruptura é superior à cota de NMC, permitem concluir que as barragens estudadas atingiram o rompimento por galgamento e que neste caso, a Folga do vertedouro é insuficiente ou praticamente inexistente.

O método da média dos tempos de concentração ($0,6tc_{\text{médio}}$), usado no projeto executivo das barragens estudadas, ao invés do método de Kirpich ($0,6tc_{\text{mínimo}}$), pode induzir a riscos hidrológicos à segurança das barragens relativos à folga mínima que deveria ser mantida entre a cota da lâmina de sangria da cheia de projeto milenar e a cota inferior da viga longitudinal da ponte sobre o vertedouro das barragens, cujos projetos são semelhantes. Os resultados mostram que a ausência de folga implicaria em risco estrutural para a segurança das respectivas barragens.

Este trabalho fez a classificação destas barragens com base nos critérios existentes no CNRH e conforme a resolução da ANA nº 236 (2017), em que o PAE é exigido para barragens de Classes A e B deve ser elaborado, para barragens novas, antes do início do primeiro enchimento, a partir de quando deverá estar disponível para utilização.

Com base nesta recomendação da ANA, apresentou-se uma classificação das barragens em estudo em termos de Potencial de Risco (PR), Categoria de Risco (CRI) e em termos de Dano Potencial Associado (DPA), que irão servir também, para classificar todas as outras barragens nacionais, preenchendo uma grande lacuna existente ainda em Cabo Verde, tudo porque ainda não existe uma legislação sobre barragens.

Dos resultados da classificação das barragens estudadas, conclui-se que todas elas apresentam um CRI e DPA Alto, com exceção da barragem de Flamengos que apresenta um CRI Médio, portanto são barragens classificadas, de acordo com a Lei 12.334, de classe A e B.

Com base nos resultados pode se concluir que o método usado pelas consultoras portuguesas para estimativa da precipitação de projeto para um período de retorno milenar foi

compatível com a técnica usual empregada no Brasil. A geração de hidrogramas da cheia milenar de projeto para os vertedouros também foi similar, exceto pela adoção de média de tempo de concentração para estimativa do “lag time” (tempo de retardamento) na elaboração do hidrograma unitário do SCS, sendo este o método do hidrograma unitário, um dos mais aplicados em simulação de bacias hidrográficas, cuja laminação da cheia sobre cada vertedouro foi calculada em função do hidrograma de projeto da cheia milenar reavaliada com base no menor tempo de concentração e calculada automaticamente e diretamente pelo modelo HEC-HMS (simulação no Dam Break), gerando hidrogramas de rupturas das barragens que com recurso a HEC-RAS permitiu a simulação de rompimento das barragens e propagação da onda de cheia no vale a jusante.

Os resultados mostram que com base na modelagem hidráulico-hidrológica, considerando o cenário de ruptura com a barragem à cota máxima maximorum (NPA), com recurso aos softwares HEC-HMS e HEC-RAS e QGIS, se obteve a onda de cheia que permitiu a caracterização e zonamento de risco do vale a jusante analisando os impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais daí resultantes. Estas zonas nos vales a jusante sofrem os impactos da onda de cheia de formas distintas e, por conseguinte, as medidas de proteção civil (nomeadamente a nível das possibilidades e modalidades de aviso e de evacuação das populações) devem ser definidas tendo em conta estas diferenças, refletidas na localização e distanciamento das barragens e no tempo de chegada de ondas de cheia à comunidade.

Com relação ao tempo de chegada (*Arrival Time*) da onda de cheia é um parâmetro que melhor se ajusta aos propósitos do planeamento de emergência já que é ele que condiciona o tempo disponível para os agentes de proteção civil atuarem a nível de atendimento das emergências.

Em função do tempo de chegada foram caracterizadas três zonas diferentes para cada vale a jusante:

- zona que está limitada a jusante pela seção onde o tempo de chegada da cheia toma valores inferiores a meia hora ($t_{cheg.} < 30$ min.); no planeamento de emergência esta zona é denominada de “zona de auto-salvamento” (ZAS); na ZAS o aviso à população pode ser dado directamente a partir da barragem e preconiza-se a medida do auto-salvamento da população como medida de segurança mais eficaz a promover;

- zona, com o tempo de chegada superior a 30 min e inferior a 1 e 2 horas, ($30\text{min} < t_{cheg.} < 60$ a 120 min.), que corresponde à área em que o aviso à população deve ser desencadeado pelas autoridades da Proteção Civil no planeamento de emergência esta zona compreende a denominada “zona de intervenção principal” (ZIP)” e é onde se devem concentrar os esforços da Proteção Civil para levar a bom termo as diversas operações de socorro, nomeadamente a nível do aviso e da evacuação das populações em risco;
- zona com o tempo de chegada superior a uma e duas horas ($t_{cheg.} > 60$ a 120 min.), que corresponde à área em que o aviso deve também ser da responsabilidade das autoridades de Proteção Civil; no planeamento de emergência esta zona compreende a denominada “zona de intervenção secundária (ZIS)” porque se deduz que, neste caso, exista mais tempo disponível para garantir uma evacuação segura e por isso não é de esperar a ocorrência de quaisquer vítimas mortais.

Relativamente às barragens de Salineiro o tempo de chegada da onda à população é muito curto, de apenas 23 minutos ($t_{cheg.} < 30$ min.). Isto porque a distância da localização da barragem até Cidade de Ribeira Grande de Santiago é de 4,9 km, o que torna impossível a proteção civil adoptar medidas de emergência. Neste caso o aviso à população pode ser dado directamente a partir da barragem e preconiza-se a medida do auto-salvamento da população como medida de segurança mais eficaz a promover. No mapa de evacuação e PEB se encontra ilustrado o acesso à ZAS, que será a partir da Sé Catedral até a Fortaleza Real de S. Filipe, onde se localiza o abrigo.

Relativamente às restantes barragens, a de Saquinho e Figueira Gorda com o tempo de chegada de onda cerca de 43 minutos ($t_{cheg.} < 60$ min.), também a proteção civil tem muito pouco tempo para preparar as medidas de emergência, devido ao fato de o vale a jusante é muito inclinado. Por isso o aviso à população e ocupantes do vale a jusante é dado directamente a partir da barragem, conforme o plano de atendimento à emergência-PEB.

Nas barragens de Poilão, Flamengos, Faveta, o tempo de chegada é superior relativamente ao tempo de chegada das barragens de Figueira Gorda, Saquinho e Salineiro. Aqui nos primeiros 30 minutos da chegada da onda de cheia, o aviso é dado à população acionando às medidas de emergência no PEB, e seguidamente, para tempos de chegada superior, maior que 30 minutos, a proteção civil terá tempo para aplicar as recomendações apresentadas no PEE.

O planejamento e a atuação junto às comunidades no vale a jusante das barragens são da responsabilidade das autoridades de Proteção Civil, mas que pode ser Serviço Municipal de Proteção Civil (SMPC) em coordenação com Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros (SNPCB) que devem gerir as emergências de qualquer natureza que porventura ocorram no vale. Ela deverá auxiliar na comunicação entre as autoridades e a população, conforme ilustrado no fluxograma de comunicação no PEE.

O proprietário da barragem, neste caso o Ministério de Agricultura e Ambiente (através de DGASP e ANAS), deve estar constantemente orientado para garantir a segurança das suas estruturas, e numa situação de crise seu foco deve ser no restabelecimento de sua segurança de forma a evitar ou minimizar uma catástrofe maior. Por outro lado, a Proteção Civil é responsável por identificar mudanças no vale, mantendo planejamento de emergências para os diversos riscos que ameaçam a população, entre eles, as barragens. Dessa forma poderá contar com uma estrutura de resposta integrada para os diversos riscos, permitindo agir com maior eficiência.

A questão da segurança do sistema envolvendo Vale-Barragem e a responsabilidade das entidades responsáveis nesta segurança tais como MAA e suas Delegações, Associação dos Agricultores Locais, SMPC, SNPCB, Câmaras Municipais foram aqui tratadas e abordadas em termos da gestão do risco imposto pelas estruturas do barramento, bem como pela vulnerabilidade à qual as populações estão submetidas. Os Planos de Ações Emergenciais (PAE), tratados aqui na Figura dos Planos de Emergência das Barragens (PEB) e dos Planos de Emergência Externos (PEE), são considerados importantes ferramentas na redução e gestão dos riscos e instrumentos de gestão e segurança cruciais para mitigação de risco nos vales a jusante das barragens e salvamento de vidas.

Este trabalho apresenta também, uma caracterização da situação no vale a jusante das barragens, com levantamento aprofundado relativamente à situação de ocupação do solo. No PEE, foram ilustrados de forma estimada as edificações, número de casas e respetiva população, infraestruturas civis e hidráulicas existentes, áreas agrícolas etc.

Por outro lado, uma visita guiada aos vales a jusante, foi possível devido ao apoio de algumas Delegações do MAA e Associação dos Agricultores, cujas informações foram muito pertinentes. A utilização dos programas de geoprocessamento e de imagens de alta resolução foi considerada indispensável na elaboração do plano com o mapeamento e zoneamento dos vales. A associação das informações coletadas às ferramentas de geoprocessamento, HEC-

HMS, HEC-RAS e QGIS, permitirá às autoridades públicas gerirem com mais eficiência e eficácia as situações de crise frente a inundações naturais ou induzidas. Essas ferramentas facilitam significativamente a gestão da informação pelas autoridades de proteção civil, facilitando as buscas e o acesso aos dados, permitindo melhor planeamento das ações a serem executadas durante a emergência.

Conforme os resultados de mapeamento e zonamento da propagação da onda de cheia proveniente de uma eventual ruptura hipotética da barragem e, conforme atrás referido, a ocupação dos vales a jusante são, de um modo geral semelhantes, mas o único vale mais densamente povoado e mais densamente ocupada é o vale a jusante da barragem de Salineiro, porque a jusante se localiza a Cidade de Ribeira Grande de Santiago, também conhecida como Cidade Velha, Património Mundial da Humanidade e primeira Cidade Portuguesa nos Trópicos (em África). Por isso, a proposta do PEB aqui apresentado servirá de orientação para Dono de Obra, neste caso o MAA, e também para Proteção Civil, porque como o tempo de chegada é reduzido, inferior a 30 minutos devem acionar o aviso e alerta de uma forma rápida e eficaz.

O trabalho aqui desenvolvido se apresenta como uma referência ao estado da arte atual em forma de proposta, preparado para evoluir juntamente com a consciência de gestão de riscos e de emergências não só nos vales a jusante das barragens em estudo, mas também servirá de aplicação à outros trabalhos e pesquisas semelhantes cujo objetivo é elaboração do PAE, e de uma forma coordenada e integrada das instituições envolvidas poderão auxiliar às autoridades na tomada de decisão a nível do planeamento do PEB e do PEE.

9.1. Recomendações para desenvolvimentos futuros

A seguir são apresentadas algumas recomendações para desenvolvimentos futuros.

Considerando que em engenharia de barragens os eventos de falha e ruptura correspondem à valores extremos e não à valores médios como se fez ao se adotar um tempo de concentração médio dentro um conjunto de fórmulas selecionadas, seria importante que os Termos de Referência para elaboração de projetos de barragens em Cabo Verde sugerissem uma análise de risco hidrológica para definição dos parâmetros de projeto das barragens, incluindo o tempo de concentração como um dos parâmetros a ser investigado.

Embora a Lei 12.334, prevê que apenas as barragens com DPA Alto deve ter o PAE, recomendamos que todas as barragens devem ter o PAE, pois devido ao caráter dinâmico da ocupação a jusante, o que hoje tem DPA baixo, no futuro próximo pode ter DPA significativo ou elevado.

Promover e aprovar com caráter de urgência um quadro normativo sobre o Regulamento de Segurança de Barragem em Cabo Verde (RSBCV), incluindo normas de projeto e as normas de Observação e Inspeção de barragens. Normas pensadas maduramente sobre as condições específicas de Cabo Verde e com capacidade para responder com eficácia às principais questões que as barragens podem suscitar, desde a sua concessão, execução e até à sua exploração, pondo fim à lacuna existente e introduzindo exigências que possam acautelar os riscos potenciais que tais infraestruturas, não obstante a sua enorme utilidade, normalmente encerram.

A nível de estudo hidráulico-hidrológico para elaboração de projeto de barragem, devido a insuficiência de informações de precipitação, inexistência de estações pluviométricas, a diminuta extensão das séries históricas de precipitação máximas diárias, normalmente inferiores a 30 anos de dados para a maioria dos postos pluviométricos em Cabo Verde, condiciona este estudo e cria incerteza associada à precipitação de projeto para geração dos hidrogramas de cheias. Por isso é recomendável que se crie condições ao Instituto de Meteorologia e Geofísica de Cabo Verde (INMG), para melhoria dos serviços de informação e base de dados para este tipo de estudo que é fundamental para o dimensionamento de projeto de barragem.

Recomenda-se que seja realizado um estudo de análise de rompimento hipotético destas barragens considerando o cenário de operação extrema que considera um evento de cheia que leva os órgãos extravasores da barragem a um funcionamento em condições críticas, sem, entretanto, ocorrer o colapso da estrutura, para comparar com o cenário atual usado neste trabalho e mapear o vale a jusante destas barragens e usar para fins de planeamento de emergências.

Conforme referido atrás, a ocupação do solo no vale a jusante de barragem em Cabo Verde, na maioria dos casos, está relacionada com a prática de agricultura, portanto terreno agrícola, visto que nos vales, tem-se maior potencial hídrica. Devido a pressão de estar no desemprego, a população procura a sua sustentabilidade económica e o seu rendimento com a prática de agricultura e em algumas partes com a extração e exploração de inertes para construção civil, mesmo sabendo que os danos que ocorrem nos vales a jusante de barragens devido a propagação de onda de cheia induzida, dependem também, do tipo de ocupação do solo. Neste sentido se recomenda para efetuar a vedação da área considerada potencialmente de risco de acordo, analisando o mapa de inundação e o PEE.

A revisão periódica do PAE e sua atualização periodicamente (anualmente ou bianual etc.) nos seguintes aspectos: endereços, telefones e e-mails dos contatos contidos no Fluxograma de Notificação; responsabilidades gerais no PAE; listagem de recursos materiais e logísticos disponíveis a serem utilizados em situação de emergência; e outras informações que tenham se alterado no período, são importantes no planeamento das operações de emergência.

A nível da comunicação no geral (divulgação e treinamentos dos envolvidos) é um tema ainda muito que precisa ser muito bem estudada inclusive a forma de transmissão, principalmente pelo grau de compreensão das pessoas que, eventualmente, estarão ameaçadas pelas barragens. Situações extremas de medo de que uma barragem possa ser insegura ou uma confiança exagerada no funcionamento dessas estruturas devem ser levadas em consideração durante o planeamento dos PEBs e dos PEEs, inclusive o envolvimento de um Psicólogo.

Considerando que todas as barragens em estudo se localizam na Ilha de Santiago e, esta Ilha é dividida em duas regiões administrativas (região Sul e região Norte), as autoridades de Proteção Civil e Municípios podem fazer planeamento de emergência a nível regional com forte coordenação do SNPCB. Assim aumentariam os recursos humanos e técnicos necessários para o cumprimento de PAE (PEB e PEE), aumentariam o recurso financeiro, reduziriam os custos com operação, porque em vez de quatro Municípios teriam duas regiões e criavam um gabinete de emergência coordenado pelo SMPC de cada Município, que poderá também, atender outras emergências.

Recomenda-se, também, que os sistemas de comunicação, alerta e aviso devem ser instalados em todas as barragens, com a instalação de sirenes com sinais padronizados para avisar os funcionários na barragem, e com alcance suficiente para avisar a comunidade afetada, imediatamente a jusante. O município deveria também estudar a implantação de dispositivos de alarme para a população que podem também contribuir para outras situações de emergência. Outros sistemas de aviso e alerta podem ser instalados em locais já referidos, tais como: alarmes domésticos ou públicos através de sinais sonoros, telefones fixos ou celulares.

Considerando ainda que, o Arquipélago de Cabo Verde é um país de origem vulcânica com histórico de erupção vulcânica do vulcão da Ilha do Fogo, e por isso há forte probabilidade de ocorrência de sismo, porque a erupção vulcânica e sismos estão intimamente ligados, recomenda-se para instalação de equipamentos de Detecção de intensidade sísmica nas barragens e/ou para equipar a instituição responsável pelo monitoramento de sismo, que neste caso, é Instituto de Geofísica, com equipamentos que tem capacidade para previsão de sismo.

Finalmente, recomenda-se que os planos aqui desenvolvidos, posteriormente poderão ser apresentados às autoridades competentes, sobretudo MAA (DGASP, ANAS), SNPCB

e seus aliados, Município e SMPC, para discussão, análise, adaptação e alteração se for o caso, e aprovação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE, Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens Volume IV, Brasília-DF, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem, Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens Volume III, Brasília - DF, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. Manual do Empreendedor, volume V, guia para a elaboração de projetos de barragens, Brasília, Fevereiro de 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. Resolução No 236, de 30 de Janeiro de 2017, Documento nº 00000.005651/2017-42.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO-ANAS, Cabo Verde, 2017. Decreto Lei nº 46/VIII/2013 de 06 de Janeiro.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO-ANAS. Lei nº 46/VIII/2013, Cabo Verde.

ALMEIDA, A. B. Emergência e gestão do risco. In: Curso de Exploração e Segurança de Barragens. Capítulo 7. Lisboa: Instituto Nacional da Água (INAG), 2001. 104p.

ALMEIDA, A. B. et al. Dam Break Flood Risk Management in Portugal, LNEC, Lisboa, Portugal, 2033, 250 p.

ANCOLD. Australian National Committee on Large Dams. Disponível em: <<http://www.ancold.org.au/>>. Acesso em: 20 out. 2019.

ANDERÁOS, A.; ARAÚJO, L. M. N.; NUNES, C. M. Classificação de Barragem quanto à Categoria de Risco e ao Dano Potencial Associado – Um Exercício. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves - RS, 2013.

ARAÚJO, J.M. Análise de barragens de gravidade de concreto considerando a fase construtiva e a interação dinâmica barragem-reservatório-fundação, Tese de Doutorado, UFRGS, Brasil, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS RECURSOS HÍDRICO-ABRH. I Congresso Sobre Aproveitamentos e Gestão de recursos Hídricos em Países de Idioma Português. Anais. Rio de Janeiro – RJ, abril/2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS RECURSOS HÍDRICO-ABRH. Congresso Sobre Aproveitamentos e Gestão de recursos Hídricos em Países de Idioma Português. Anais. Cidade da Praia, Cabo Verde, Setembro de 2019.

BALBI, D.A.F., Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens. Estudo de caso: Barragem de Peti-MG, Belo Horizonte, 2008.

BAPTISTA, A.L. e FARINHA, M.L.B. Dimensionamento estrutural e controlo da segurança de pequenas barragens de betão, LNEC, Portugal, Novembro de 2011.

BODSTEIN, A. Os três eixos da prevenção de desastres de Brumadinho. Artigo publicado no sítio eletrónico da Associação Brasileira de Redução de Riscos de Desastres (ABRRD), Janeiro de 2019. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/os-tr%C3%AAs-eixos-da-preven%C3%A7%C3%A3o-de-desastres-airton-bodstein-1e/>>. Acesso em: 29 mai. 2020.

BOL. Dez dos maiores acidentes com barragens dos últimos anos ao redor do mundo. BOL Listas. Disponível em: <<https://www.bol.uol.com.br/listas/majores-acidentes-com-barragens-dos-ultimos-anos-ao-redor-do-mundo.htm?cmpid=copiaecola>>. Acesso em: 22 mai. 2020.

BRASIL, L. S. S., Lei Federal nº 12.334, Brasília, 20 de Setembro de 2010.

BRASIL. Decreto n. 5.376, de 17 fev. 2005. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Defesa Civil - SINDEC e o Conselho Nacional de Defesa Civil, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 18 fev. 2005.

BRASIL, L. S. S. Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem de Rio de Pedras. Belo Horizonte. 201 p. (Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

BROWN, D. et al. 501 Desastres mais devastadores de todos os tempos. Trad. Catharina Piniheiro. 1ª edição brasileira. São Paulo: Editora Lafonte, 2012.

CALDEIRA, L., Estudo da Percolação, LNEC, Portugal 2012.

CAMPOS et al. Water safety on Castanhão reservoir, Ceará, Brazil: application of institutional systematization matrix. *Eng. Sanit. Ambient.* vol.22 no.5 Rio de Janeiro Sept./Oct. 2017. Print version ISSN 1413-4152 On-line version ISSN 1809-4457.

CAMPOS, J. N. B., Lições em modelos e simulação hidrológica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION-CSA. Risk Analysis Requirements and Guidelines. CAN/CSAQ634- M91, 1991.

CASAGRANDE, A., Controle de Infiltração através de Fundações e Pilares de Barragens. Volume 11 Edição 3, setembro de 1961, pp. 161-182.

CAVALCANTE, F. G.; TAVARES, P. R. L.; FERNANDES, R. O.; DE SÁ, P. E. F.. Modelagem computacional de ressalto hidráulico em canal urbano. *Revista DAE*, nº 218, Julho a Setembro, 2019.

CHATERJEE, S. e BISWAS, A. K. - The Human Dimensions of Dam Safety. *Water Power*, Vol. 24, Nº 1, 1972.

CHOW, Ven Te., MAIDMENT, David R., MAYS, Larry W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw Hill, 1998.

COLE, G. A. Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança, UFP, Curitiba 2008.

COLLISCHONN, W., Risco hidrológico e segurança de barragens existentes (Simulação Hidrológica de Eventos Extremos), Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, XIV Simpósio de Recursos Hídricos de Nordeste, Maceió, Alagoas, 2018.

COLUMBIA COUNTY EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Emergency Evacuation Plan for Dam Failure and Flooding – Savannah River Dams. Columbia County, Georgia, EUA. 2001.

COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS-CMB, (WCD).(World Commission on Dams). Dams and Development. A new framework for decision-making. Earthscan Publications. Londres, 2000, 404 p. Disponível em <http://www.dams.org/report/contents.html>. Acesso em Fevereiro de 2018.

COMISSÃO NACIONAL PORTUGUESA DE GRANDES BARRAGENS-CNPGB. 1º relatório de progresso, grupo de trabalho de análise de risco em barragens, Lisboa, Portugal, Janeiro de 2005.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS-CBDB. Guia básico de segurança de barragens, Núcleo Regional de São Paulo- Comissão Regional de Segurança de Barragens 1999, 77 páginas.

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS (CBGB). Auscultação e instrumentação de barragens no Brasil. In: II SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 1996, Belo Horizonte. 123p..

COMISSÃO NACIONAL PORTUGUESA DAS GRANDES BARRAGENS-CNPGB. Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens. 1º Relatório de Progresso. jan. 2005, Portugal, 13 p. Disponível em: <<http://cnpgb.inag.pt/port/actividades.html#grupos>>. Acesso em: jan. 2006.

COMITÉ FRANÇAIS DES BARRAGES ET RÉSERVOIRACFBR, Paris, France, 2006.

CONSELHO NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO – CNAS. Decreto-Lei nº 45/VIII/2013, de 06 de Janeiro.

CORREIA, J. H. G., PEREIRA, P. Extração de areia na praia de Calhetona (Ilha de Santiago, Cabo Verde): causas, processos e consequências, Revista de Gestão Costeira Integrada, 16(2):195-206 (2016). Disponível em <http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-610_Correia.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2019.

CORREIA F.N., VARELA L.H.F). Os Princípios de Governança da água na OCDE e a Experiência dos Países da CPLP. IST, Lisboa. APRH, 14º SILUSBA, Cidade da Praia, Setembro de 2019.

DAM SAFETY ASSESSMENT-DSA. Risk Analysis in dam safety assessment. Taipei, Taiwan: Water Resources Publications, LLC, 1999. p. 1-34.

DARCY, H.P.G., Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont, 1856.

DECRETO LEI 344/2007, Governo português – Regulamento de Segurança de Barragens, 2007.

DEPARTMENT OF THE INTERIOR, Bureau of Reclamation, 1983. 332 p..

DIREÇÃO GERAL DE AGRICULTURA, SILVICULTURA E PECUÁRIA-DGASP. Barragem de Saquinho e rede de adução. Ilha de Santiago. 2012.

ELETROBRÁS, C. E. B. S. A. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Rio de Janeiro: ELETROBRAS-ICOLD, 2003.

EMERGENCY MANAGEMENT AUSTRALIA - EMA. Australian Emergency Manuals Series Part III. Guide 5 - Flood Warning, second edition. In: Emergency Management Practice, Volume 3. Australia, 1999^a.

ESPAÑA. Guia para la elaboración de los planes de emergencia de presas. [S.l.]: Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2001.

ESPAÑA. Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de Interior. Aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (BOE de 14 de febrero de 1995). Disponível em: <<http://www.proteccioncivil.org/centrodoc/legisla/Dbasica3.pdf>>.

EUROCÓDIGO 7. Projeto Geotécnico. Norma Portuguesa, EN-1997-1, Edição de 2010.

EUROCÓDIGO 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. Norma Portuguesa, EN 1998-1, Março de 2010.

EXCIMAP. Handbook on Good Practices for Flood Mapping in Europe. Bruxelas (Bélgica): European Exchange Circle on Flood Mapping, 2007.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY - FEMA. Federal guidelines for dam safety: selecting and accommodating inflow design floods for dams. Interagency Committee on Dam Safety, U.S. Department of Homeland Security, October 1998. Reprinted April 2004. 58p..

FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION – FERC. Emergency Action Plans. In: _____. Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects. Washington DC: U.S. Department of Energy, 2007.

FLOODSITE Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods. Integrated flood risk analysis and management methodologies. Relatório número T09-06-01. Revisão número 2_2_P44. FLOODSITE. 2007. Disponível em: <www.floodsite.net>. Acesso em: jan. 2020.

FONSECA, R. Impactos Ambientais Associados a Barragens e Albufeiras. Tese de mestrado, Lisboa, 2009.

FRANCO, A. B. Modelação Computacional e Experimental de Escoamentos Provocados por Rupturas de Barragens. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1996.

FRANCO, A. B. Simulação Numérica de Cheias Provocadas por Rupturas de Barragens em Série. Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, IST, Lisboa, 1998.

FROEHLICH, D. C., TUFAIL, M. Evaluation and Use of Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. In PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS, Phoenix, 2004, 15 p.

FROEHLICH, D. C. 2008. Embankment Dam Breach Parameter and Their Uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering, 2008 ASCE.

FROEHLICH, D. C. 2016. Empirical Model of Embankment Dam Breaching. International Conference on Fluvial Hydraulics. Saint Louis, EUA. 2016.

FUSARO, T.C. Relatório de visita a BC Hydro. Belo Horizonte: CEMIG, 2004. (Relatório).

FUSARO, T.C. Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: Estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau. Ouro Preto. 201 p. (Dissertação de Mestrado em Geotecnia de Barragens) – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2007.

FONTENELLE, A. S. Proposta Metodológica de Avaliação de Riscos em Barragens no Nordeste Brasileiro. Estudo de caso: barragens do estado do Ceará. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

FONTENELLE, A. S., FONTENELLE, M. C., MATOS, Y. M. P. De, MONTEIRO, F. F., Avaliações de risco em barragens: Estudo de caso da barragem Malcozinhado no Nordeste Brasileiro. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Vol. 14 Nº 1, 25-42, Janeiro de 2018.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA DE SÃO PAULO. U.S.P., Brasil, 2018.

FUNDAÇÃO PARA A FORMAÇÃO CONTÍNUA EM ENGENHARIA CIVIL-FUNDEC. Projeto, construção e exploração de pequenas barragens, LNEC/IST, Lisboa, Novembro de 2012.

GUTSTEIN, D. Projeto de estruturas de barragens de gravidade de concreto por meio de métodos computacionais: visão geral e metodologia, Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2011.

HARTFORD, D. N. D., BAECHEER, G.B. Risk and uncertainty in dam safety. London: Thomas Telford Publishing, 2004. 391 p..

HEC - HYDRAULIC ENGINEERING CENTER (Org.). Hydraulic Design of Spillways: EM 1110-2-1603. Washington: Headquarters Department Of The Army, 1965. 123 p.

HOULSBY, A. C. Routine interpretation of the Lugeon watertest. Q. Jl Engng Geol. Vol 9 1 pp. 303-313, 1976.

INSTITUTO DA ÁGUA-INAG. Curso de Exploração e Segurança de Barragens. A.A. Balkema Publishers, Lisboa, 2001. 710p.

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS - ICOLD. Improvement of existing dam monitoring – Recommendations and case histories. Bulletin 87. Paris: International Commission of Large Dams, 1992. 63p..

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS - ICOLD. Dam Failures. Statistical Analysis. Bulletin 99. Paris: International Commission of Large Dams, 1995. 63p..

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS - ICOLD. Dam break flood analysis: review and recommendations. Bulletin 111. Paris: International Commission of Large Dams, 1998, 301 p.

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS - ICOLD. Automated dam monitoring systems - Guidelines and case histories. Bulletin 118. Paris: Internacional Comission of Large Dams, 2005.

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS – ICOLD. Position Paper on Dams and Environment, CIGB,1997, Paris.

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS – ICOLD. Bulletin E02, 2001 – Non-structural risk reduction measures. Benefits and cost for dam.

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOTECHNICAL SAFETY AND RISK- ISGSR. Failure analysis of earth dam - An approach to database. In Y. X. LM Zang, J. S. Jia. Shangai: First International Symposium on Geotechnical Safety, 2007.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Summary for Policymakers. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis.

JANSEN, R.B. Dams and public safety. Minnesota- U.S. Department Of The Interior, 1983. 332 p. Digitalizado em 2009. Disponível em: <<http://ussdams.com/ussdeducation/Media/dams-frombeginning.pdf>>. Acesso em: Jan. 2019.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY- JICA. Projecto de Desenvolvimento do Sistema de Abastecimento de Água na Ilha de Santiago, JICA CAV-P3, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA –INE. República de Cabo Verde, resençamento geral da população e economia, Março de 2010.

JAUHARI, V. P., 1999 – Operation, monitoring and decommissioning of large dams in India. Contributing paper to the World Commission on Dams, prepared for Thematic Review IV.5 – Operating, Monitoring and Decommissioning of Dams.

JOHNSON, F. A.; ILLES, P. A Classification of Dam Failures. *Water Power and Dam Construction*, London, V.28, n.12, Dec. 1976. p. 43-45.

KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Journal of Civil Engineering*, v. 10, p. 362, 1940.

KOBYAMA et al., Mapeamento de Perigo de Inundação - Porto Alegre: UFRGS/IPH/GPDEN, 2015.

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL DE CABO VERDE-LEC. Curso sobre segurança, observação e inspeção de barragens de Gravidade, Ilha de Santiago, Cidade da Praia, 2018.

LEITÃO, F.T.P. Modelagem Hidrodinâmica 1D, 1D/2D e 2D do efeito de maré no rio Cocó. Dissertação do Mestrado, UFCE, Fortaleza, 2018.

LENCASTRE, A., FRANCO, F. M.. Lições de Hidrologia. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa, 1992.

LUGEON, M. Barrages et Geologie. Dunod, 1933, Paris.

LUGEON, M. Barrages et géologie. Bulletin technique de la Suisse Romande, 1932.

LOUKAS, Athanasios. QUICK, Michael C., Physically-based estimation of lag time for forested mountainous watersheds. *Hydrological Sciences Journal*, v. 41, n. 1, p. 1-19, 1996.

MANNAERTS, C.M., 1985. Runoff waters can be used for reforestation in arid and semi-arid zones. In: Pla Sentis, I. (Ed.), *Proceedings of the International Symposium of the International Soil Science Society (ISSS)*, Maracay, Venezuela.

MARQUES J.L.S., RODOLFO R. C., Critérios de projeto de barragens de concreto à gravidade: Uma visão de sustentabilidade, UFPA, Curitiba, 2003.

MARQUES, F. J. Maciços experimentais de laboratório de concreto compactado com rolo aplicado às barragens. 247 f. Tese (Doutorado em Construção Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MARQUES, J.L.S. Estudo do efeito da inclinação das ombreiras na estabilidade de barragens via modelos numéricos tridimensionais, UFPA, Curitiba, 2015.

MARTINS, C.C.S.S. Impacte das Alterações Climáticas no Regime Hidrológico da Ilha de Santiago e Consequências na Rede de Drenagem Local, Coimbra, 19 de dezembro de 2017.

MARTINS, P.G.P. Análise do Fenómeno de Ruptura de Barragens de Aterro com Vista à Hierarquização do Perigo Associado ao Conjunto Barragem e Albufeira FCT, UNL, Junho 2012.

MARTINS, R. Segurança hidráulico-operacional de barragens à luz da legislação internacional. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 5, 2000, Lisboa. Disponível em: <<http://www.dha.lnec.pt/nre/portugues/funcionarios/papers/rmartins/SBNMUNDIAL.pdf>>. Acesso em: set. 2019.

MARTINS, F. J. P. Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais. Dissertação do Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Março de 2000.

MASCARENHAS, F.C. Modelação matemática de ondas provocadas por ruptura de barragens. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 295 p. Tese de doutorado, 1990.

MASSAD, F. Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia; São Paulo, Oficina de Textos, 2003.

MELLO, F. M. (Org.). A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

MELO, M. R., Dissertação de Mestrado. Risco hidrológico associado às incertezas na determinação do tempo de concentração: Caso de estudo: Barragens na Ilha de Santiago - Cabo Verde. Fortaleza, UFC, 2018.

MENESCAL, R. A. Gestão da Segurança de barragens no Brasil-Proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2009.

MENESCAL, R. A.; VIEIRA, V. P. P. B.; OLIVEIRA, S. K. F. Terminologia para análise de risco e segurança de barragens. In: MENESCAL, R. A. (coord.) A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005a. p. 31-49.

MENESCAL, R. A.; MIRANDA, N.; PITOMBEIRA, S.; PERINI, D. S. As barragens e as enchentes. In: MENESCAL, R. A. (coord.) A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005b. p. 289-299.

MENESCAL, R. A. Risco e Segurança em engenharia – Problemas enfrentados pelo Ministério da Integração com obras de infra-estrutura hídrica. Debate: O momento atual da engenharia brasileira. Instituto de Engenharia. São Paulo, 7 mar. 2007. Transparência eletrônica.

MILLENNIUM CHALLENGE ACCOUNT CABO VERDE-MCA. O projeto Água, Saneamento e Higiene, WASH do MCA-CV II. Boletim informativo. Disponível em www.mca.cv, Acesso em Janeiro de 2020.

MINISTÉRIO DE AGRICULTURA E AMBIENTE-MAA. V Recenseamento Geral da Agricultura. Resultados. ONU, FAO, Cabo Verde, Setembro de 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS, Resolução no 143, de 10 de Julho de 2012.

MINISTÉRIO DE DESENVOLVIMENTO RURAL-MDR. Grupo de Trabalho Sector da Agricultura. Relatório de Elaboração DECRP-III/2012 – 2016, Cidade da Praia.

MORAIS, A. C. A barragem da discórdia entre os governos do Egito e da Etiópia. Artigo para o Jornal Diário de Notícias. Disponível em: <<https://www.dn.pt/mundo/a-barragem-da-discordia-entre-os-governos-do-egito-e-da-etiofia-9062773.html>>. Acesso em: 12 jan. 2020.

MORENO et al. Estudo de Impacte Ambiental da Barragem de Poilão, Setembro de 2005, Ilha de Santiago, Cabo Verde.

MOTA, K. R. R., Dissertação do Mestrado. Rompimento hipotético e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG, Universidade Federal da Uberlândia, Brasil, 30 de Maio de 2017.

MOTA, A. A.; KOBIYAMA, M., Reconsiderações sobre a Fórmula de Kirpich para o cálculo de tempo de concentração, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Versão On-line ISSN 2318-0331, RBRH, v. 20, n.1, Porto Alegre jan./mar. 2015 p. 55 – 59.

MOTA, K.R.R. Rompimento e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG /UFU, PPGE, Maio de 2017.

MULVANEY, T. J. Método Racional. Irlanda, 1851.

MUSY, A.; HIGY, C. Hydrology: a science of nature. CRC Press, 2011.

MCCUEN, Richard. H. Hydrologic analysis and design. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.

NATO PO-FLOODRISK. Risco e Gestão de Crises em Vales a Jusante de Barragens. LNEC, Novembro, de 1997, da autoria de Paula Farrajota e Vitor Campos.

NATURAL DISASTERS ORGANISATION. The Australian Emergency Manual Series. Australia, 1992. Second edition.

NORMA DE PROJETO DE BARRAGEM-NPB. Anexo à portaria nº 846/93, Lisboa, 1993.

NORVIA CV, NORVIA e CENOR, Estudos e Construção de três barragens e rede de adução, Salineiro, Faveta e Saquinho, Ilha de Santiago, Cabo Verde, 2011.

NORVIA CV, NORVIA e CENOR, Estudos e Construção de três barragens e rede de adução, Figueira Gorda, Ilha de Santiago, Cabo Verde, 2013.

PAN ARAB CONSULTING ENGINEERS-PACE. Projet d'Aménagement des Bassins Versants de Ribeira de Flamengos et Ribeira Principal, PABVFLAPRI.

PINTO A. V., et al., gestão de riscos e segurança de barragens. 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados – Nov. 2008, LNEC, Lisboa, Portugal.

PIMENTA, L., CALDEIRA, L., NEVES, M. (2011). Preliminary Risk Analysis of Dam Portfolio in Operation. In: 6th International Conference on Dam Engineering, LNEC, Lisbon, Portugal.

PERINI, D. S., Estudos dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra, UnB, Brasília/DF, Agosto de 2009.

PLANO DE ACÇÃO NACIONAL PARA A GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS - PAGIRE. Diagnóstico da situação dos recursos hídricos e do seu quadro de gestão, Resolução nº 66/2010, B.O. nº 45, I SÉRIE, 2º SUP, de 24 de Novembro.

PORTO, R.M. Hidráulica Básica. Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC, USP, SP, 4ª edição revisada, 2006.

RAMOS, J. M.; PORTELA, E. A.; BATISTA, A. L. Controlo de segurança de barragens de betão em tempo real. ITB 28, Lisboa, LNEC, 2003.

RAMOS, J. M.. Observação do comportamento estrutural de barragens de betão. Aspectos práticos. NS 96, Lisboa, LNEC, 2004.

RAMOS, J.M. MARCELINO, J., VISEU, T., Curso de Segurança de Barragens. Ilha de Santiago, LNEC, Portugal e LEC, Cabo Verde, Julho, 2010.

REGULAMENTO PARA A SEGURANÇA DE BARRAGEM DE CABO VERDE – RSBCV (Proposta ainda não aprovada). Governo da República de Cabo Verde, Ministério de Desenvolvimento Rural (MDR), Cidade da Praia, Janeiro de 2016.

RIBEIRO, E. DE C. P., Estudos das Precipitações Intensas na Ilha de Santiago, em Cabo Verde. Dissertação do Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, IST, Lisboa, Julho 2008;
SALMON, G. M., HARTFORD, D. N. D Risk analysis for dam safety. International Water Power and Dam Construction, p. 42-47, March/1995.

SERRALHEIRO, A., A. Geologia da Ilha de Santiago (Cabo Verde), Lisboa 1976.

SERAFIM, J. L.; CAVILHAS, J. L. A. A.. Failures of dams due to overtopping. Proceedings of the International Conference on Safety of Dams – Coimbra / 23-28 de abril de 1984, A. A. Balkema / Rotterdam / Boston, 1984.

SHAKIB, S., RICARDO, P.S., SERRANO, J., SOUSA, A. O desafio dos recursos hídricos em Cabo Verde - In Cabo Verde – Agronomia e Recursos Naturais, Universidade de Évora, Portugal, Janeiro 2014.

SINGH, V.P. Watershed Modelling. In: V.P. Singh (editor). Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, United States, 1996.

SILVA Da, O. E., Curso de hidrologia para dimensionamento de barragens e análise de riscos em barragens, Cidade da Praia, Cabo Verde, Julho de 2017.

SILVA, F.O.E DA., FERNANDES, M. M., Análise hidrológica para barragens na Ilha de Santiago, em Cabo Verde, África Ocidental, Revista DAE, Fevereiro, 2020; Disponível em www.revistadae.com.br.

SILVA, F.O.E. Da., FERNANDES, M.M., MELO, M.R., Risco Hidrológico Associado às Incertezas na Determinação do Tempo de Concentração-Estudo de Caso: Barragens na Ilha de

Santiago, Cabo Verde. APRH, 14º SILUSBA, Cidade da Praia, Cabo Verde, Setembro 2019. Disponível em: www.aprh.pt/14silusba/docs/14SILUSBA_31.pdf.

SILVA, T. C. DA. Mapeamento das Manchas de Inundação para a Cidade de Matias Barbosa-MG, Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia da UFJF, 2016.

SILVEIRA, A. L. L., Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS Porto Alegre, RS e RBRH Janeiro/Março 2005.

TAYLOR, K.V. Slope protection on Earth and Rockfill Dams. Onzième Congrès des Grands Barrages, Q42, R.13, Madrid, 1973.

TECHNOCONSEILS- Etudes d'exécution de Barrage de Flamengos, Ilha de Santiago, Cabo Verde, Julho de 2014.

TOMAZ, Plínio. Curso de Manejo de Águas Pluviais. Guarulhos: Plínio Tomaz, 2010.

TRIOLA, Mario F. Elementary statistics technology update. 11. ed. Pearson, 2010.

TUCCI, C. E. M. (1998). Modelos hidrológicos, Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers, Washington DC 20314-1000, Department of the army, May 2016.

USACE-HEC. HEC-RAS - User's Manual, 2010.

USACE-HEC. HEC-HMS - User's Manual, 2013.

USBR - United States Bureau of Reclamation. Guidelines for achieving public protection in dam safety decision making. Denver: U.S. Department of the Interior, 2003.

USCOLD (U.S. Committee on Large Dams). Dam safety practices and concerns in the United States. Denver, 1982.

UNITED STATE COMMITTEE ON LARGE DAM-USCOLD. Lessons from dam incidents, USA II. Committee on Dam Safety of the United States Committee on Large Dams (USCOLD). American Society of Civil Engineering, New York, 1988.

VICENTE et al. 1996, Roteiro para projeto de pequenos açudes, UFC, Centro de Tecnologia, Fortaleza- Ceará 1996.

WISEU, T.; ALMEIDA, A. B. DE. Gestão do Risco nos Vales a Jusante de Barragens. Territorium, Coimbra, n. 18, p.33-42, 2011.

WISEU, T., Curso de Segurança de Barragem, LNEC, Portugal e LEC, Cabo Verde, Julho de 2010.

VISEU, T. Segurança dos vales a jusante de barragens – metodologias de apoio à gestão dos riscos. 2006. 482f. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.

VISEU, T.; MARTINS, R. Safety risks of small dams. In: BERGA, L. (Ed.) Dam Safety. Rotterdam: Balkema, 1998. p. 283-288.

VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur Hidrologia Aplicada. McGraw-Hill, 1975.

WALPOLE, Ronald E. *et al.* Probability & statistics for engineers & scientists. 9. ed. Pearson Education, 2012.

WILLINGHOEFER, M., Avaliação do risco de rompimento da barragem de uma pequena central hidrelétrica na bacia do Rio Peixe, Florianópolis-SC, Julho de 2015.

WOODWARD, Donald E., National Engineering Handbook. US Department of Agriculture, v. 630, cap. 15, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NO HEC-HMS

Figura A1 – Simulação para a Barragem de Faveta

Date	time	inflow(m ³ /s)	storage (1000m ³)	elevation (m)	outflow (m ³ /s)
1-Mar-18	0:00	0	513	231.5	0
1-Mar-18	0:10	0	513	231.5	0
1-Mar-18	0:20	0	513	231.5	0
1-Mar-18	0:30	0	513	231.5	0
1-Mar-18	0:40	0	513	231.5	0
1-Mar-18	0:50	0	513	231.5	0
1-Mar-18	1:00	0	513	231.5	0
1-Mar-18	1:10	0	513	231.5	0
1-Mar-18	1:20	0	513	231.5	0
1-Mar-18	1:30	0.8	513.3	231.5	0
1-Mar-18	1:40	3	514.4	231.5	0.1
1-Mar-18	1:50	5.8	516.8	231.6	0.6
1-Mar-18	2:00	8.5	520.4	231.6	1.6
1-Mar-18	2:10	10.9	524.7	231.7	3.3
1-Mar-18	2:20	13	529.2	231.8	5.4
1-Mar-18	2:30	14.9	533.6	231.9	7.8
1-Mar-18	2:40	16.6	537.6	231.9	10.3
1-Mar-18	2:50	18.2	541.1	232	12.7
1-Mar-18	3:00	19.7	544.2	232.1	14.6
1-Mar-18	3:10	21.2	547.1	232.1	16.6
1-Mar-18	3:20	22.7	549.8	232.1	18.4
1-Mar-18	3:30	24.3	552.3	232.2	20.2
1-Mar-18	3:40	25.9	554.7	232.2	22
1-Mar-18	3:50	27.6	557	232.3	23.8
1-Mar-18	4:00	29.6	559.3	232.3	25.6
1-Mar-18	4:10	39.8	563.7	232.4	29.2
1-Mar-18	4:20	57.5	572.7	232.5	37.3
1-Mar-18	4:30	69.2	584.6	232.7	49.1
1-Mar-18	4:40	76.7	595.2	232.8	60.6
1-Mar-18	4:50	82.9	603.5	233	70.4
1-Mar-18	5:00	89.1	610.1	233.1	78.7
1-Mar-18	5:10	96.1	616.2	233.2	86.5
1-Mar-18	5:20	104.9	622.2	233.3	94.5
1-Mar-18	5:30	116.5	628.8	233.4	103.8
1-Mar-18	5:40	134.2	637.6	233.5	116.5
1-Mar-18	5:50	169.1	651.6	233.7	137.9
1-Mar-18	6:00	268.7	683.2	234.2	186.9
1-Mar-18	6:10	328.4	726.7	234.8	256.5
1-Mar-18	6:20	257.7	285.2	226.8	1682.6
1-Mar-18	6:30	192.2	6.2	210.5	224.9
1-Mar-18	6:40	153	4.1	210	172.6
1-Mar-18	6:50	128.7	3.5	209.7	140.9
1-Mar-18	7:00	113.1	3.2	209.5	120.9
1-Mar-18	7:10	102.4	3	209.4	107.7
1-Mar-18	7:20	94.3	2.8	209.3	98.3
1-Mar-18	7:30	88.3	2.7	209.2	91.2
1-Mar-18	7:40	83.6	2.6	209.1	86
1-Mar-18	7:50	70.8	2.4	209	77.2
1-Mar-18	8:00	51.5	2.1	208.8	61.1
1-Mar-18	8:10	40.6	1.7	208.6	46.1
1-Mar-18	8:20	35.2	1.5	208.5	37.9
1-Mar-18	8:30	32	1.4	208.4	33.6
1-Mar-18	8:40	29.9	1.3	208.3	31
1-Mar-18	8:50	28.3	1.3	208.3	29.1
1-Mar-18	9:00	27	1.2	208.3	27.7
1-Mar-18	9:10	25.8	1.2	208.3	26.4
1-Mar-18	9:20	24.8	1.2	208.2	25.2
1-Mar-18	9:30	23.9	1.1	208.2	24.3
1-Mar-18	9:40	23	1.1	208.2	23.4
1-Mar-18	9:50	22.3	1.1	208.2	22.6
1-Mar-18	10:00	21.5	1.1	208.2	21.8
1-Mar-18	10:10	20.9	1	208.2	21.1
1-Mar-18	10:20	20.3	1	208.1	20.8

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura A2 – Simulação para a Barragem de Flamengos

Date	time	inflow (m3/s)	storage (1000 m3)	elevation (m)	outflow (m3/s)
1-Jun-18	0:00	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	0:20	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	0:40	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	1:00	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	1:20	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	1:40	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	2:00	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	2:20	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	2:40	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	3:00	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	3:20	0	755.8	182.4	0
1-Jun-18	3:40	0.1	755.9	182.4	0
1-Jun-18	4:00	0.7	756.4	182.4	0
1-Jun-18	4:20	2	757.9	182.4	0.1
1-Jun-18	4:40	3.7	761.1	182.4	0.4
1-Jun-18	5:00	6.3	766.2	182.5	1.1
1-Jun-18	5:20	10.7	774.1	182.6	2.6
1-Jun-18	5:40	15.7	785.2	182.6	5.3
1-Jun-18	6:00	20.1	797.8	182.8	9.2
1-Jun-18	6:20	23.3	810	182.9	13.7
1-Jun-18	6:40	25.8	820.3	182.9	18
1-Jun-18	7:00	27.7	828.6	183	21.6
1-Jun-18	7:20	29.2	835	183.1	24.4
1-Jun-18	7:40	30.3	840.1	183.1	26.7
1-Jun-18	8:00	32.6	844.5	183.1	28.8
1-Jun-18	8:20	38.9	850.9	183.2	31.8
1-Jun-18	8:40	52.7	863.5	183.3	38.3
1-Jun-18	9:00	74.5	885.7	183.5	50.8
1-Jun-18	9:20	94.6	914.3	183.7	68.9
1-Jun-18	9:40	109.5	941.3	183.9	88
1-Jun-18	10:00	121.4	963	184	104.3
1-Jun-18	10:20	132.1	981	184.2	117.8
1-Jun-18	10:40	144.2	997	184.3	130.4
1-Jun-18	11:00	160	1013.8	184.4	144.1
1-Jun-18	11:20	182.4	1034.4	184.6	161.7
1-Jun-18	11:40	218.2	1063.4	184.8	187.6
1-Jun-18	12:00	305.9	1117.4	185.1	237.8
1-Jun-18	12:20	422.9	1207.7	185.7	325.2
1-Jun-18	12:40	438.6	1204.9	185.7	878.4
1-Jun-18	13:00	373.7	172.1	174.5	451.6
1-Jun-18	13:20	297.5	147	173.8	335.4
1-Jun-18	13:40	247.1	131.9	173.3	272.4
1-Jun-18	14:00	210.7	120.6	173	229.2
1-Jun-18	14:20	182.7	111.6	172.7	196.9
1-Jun-18	14:40	160.9	104.3	172.5	172
1-Jun-18	15:00	145.9	98.6	172.3	153.6
1-Jun-18	15:20	135.9	94.5	172.2	140.9
1-Jun-18	15:40	122.2	90.5	172.1	129.1
1-Jun-18	16:00	99.1	84.2	171.9	111.1
1-Jun-18	16:20	74.7	75.5	171.6	87.7
1-Jun-18	16:40	57.2	66.9	171.4	67
1-Jun-18	17:00	47.5	60.7	171.2	53.3
1-Jun-18	17:20	42.3	56.8	171.1	45.4
1-Jun-18	17:40	39.5	54.7	171	41.3
1-Jun-18	18:00	38	53.3	170.9	38.6
1-Jun-18	18:20	37.3	52.8	170.9	37.6
1-Jun-18	18:40	36.8	52.4	170.9	37
1-Jun-18	19:00	36.6	52.3	170.9	36.7
1-Jun-18	19:20	35	51.8	170.9	35.8
1-Jun-18	19:40	30.4	50.2	170.9	33
1-Jun-18	20:00	25.3	47.6	170.8	28.4
1-Jun-18	20:20	21.9	45	170.7	24.2
1-Jun-18	20:40	20.2	43.2	170.6	21.5
1-Jun-18	21:00	19.3	42.1	170.6	19.9
1-Jun-18	21:20	18.8	41.6	170.6	19.1
1-Jun-18	21:40	18.5	41.3	170.6	18.7
1-Jun-18	22:00	18.4	41.2	170.6	18.5
1-Jun-18	22:20	18.3	41.1	170.6	18.3
1-Jun-18	22:40	18.3	41.1	170.6	18.3
1-Jun-18	23:00	18.2	41	170.6	18.2
1-Jun-18	23:20	18.2	41	170.6	18.2
1-Jun-18	23:40	18.2	41	170.6	18.2
2-Jun-18	0:00	18.2	41	170.6	18.2

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura A3 – Simulação para a Barragem de Figueira Gorda.

Date	time	inflow(m 3/s)	storage (1000m3)	elevation (m)	outflow (m3/s)
1-Mar-18	0:00	0	1305	91	0
1-Mar-18	0:20	0	1305	91	0
1-Mar-18	0:40	0	1305	91	0
1-Mar-18	1:00	0	1305	91	0
1-Mar-18	1:20	0	1305	91	0
1-Mar-18	1:40	0	1305	91	0
1-Mar-18	2:00	0	1305	91	0
1-Mar-18	2:20	0	1305	91	0
1-Mar-18	2:40	0	1305	91	0
1-Mar-18	3:00	0	1305	91	0
1-Mar-18	3:20	0	1305	91	0
1-Mar-18	3:40	0	1305	91	0
1-Mar-18	4:00	0.1	1305.1	91	0
1-Mar-18	4:20	0.7	1305.5	91	0
1-Mar-18	4:40	2.1	1307.1	91	0.1
1-Mar-18	5:00	4.1	1310.6	91	0.3
1-Mar-18	5:20	6.3	1316.1	91.1	0.9
1-Mar-18	5:40	9.7	1324	91.1	1.9
1-Mar-18	6:00	15.7	1335.6	91.2	4
1-Mar-18	6:20	22.3	1351.5	91.3	7.5
1-Mar-18	6:40	28.1	1369.6	91.4	12.5
1-Mar-18	7:00	33	1387.7	91.5	18.3
1-Mar-18	7:20	37.2	1404	91.6	24.3
1-Mar-18	7:40	41.2	1418.3	91.7	30
1-Mar-18	8:00	45	1430.7	91.8	35.3
1-Mar-18	8:20	48.9	1441.6	91.9	40.2
1-Mar-18	8:40	53.1	1451.6	91.9	44.9
1-Mar-18	9:00	57.6	1461.1	92	49.6
1-Mar-18	9:20	62.7	1470.9	92	54.4
1-Mar-18	9:40	68.6	1481.2	92.1	59.6
1-Mar-18	10:00	75.7	1492.4	92.2	65.5
1-Mar-18	10:20	94.7	1509.9	92.3	75.1
1-Mar-18	10:40	136.9	1545.1	92.5	95.9
1-Mar-18	11:00	184.6	1599.3	92.8	131.7
1-Mar-18	11:20	229.9	1659.8	93.1	176.2
1-Mar-18	11:40	287.8	1724.3	93.5	227.3
1-Mar-18	12:00	415.3	1817.4	94	308.5
1-Mar-18	12:20	570.7	1952.1	94.7	432.5
1-Mar-18	12:40	569.2	435.1	83.7	843.8
1-Mar-18	13:00	467.6	308.7	81.9	537.7
1-Mar-18	13:20	372.6	257.4	81.2	429.5
1-Mar-18	13:40	306.7	215.5	80.6	348.4
1-Mar-18	14:00	248.4	180.5	80.1	285.7
1-Mar-18	14:20	188.2	152.2	79.6	221.9
1-Mar-18	14:40	140.1	128.7	79.1	167.8
1-Mar-18	15:00	109.4	109.7	78.7	128.2
1-Mar-18	15:20	90.6	96.3	78.4	102.7
1-Mar-18	15:40	78	87.1	78.2	86.4
1-Mar-18	16:00	69.4	80.4	78	75.2
1-Mar-18	16:20	63.4	76.9	77.9	66.6
1-Mar-18	16:40	58.7	74.9	77.8	61.1
1-Mar-18	17:00	55	72.9	77.8	55.9
1-Mar-18	17:20	51.9	71.8	77.7	52.9
1-Mar-18	17:40	49.2	70.6	77.7	50.1
1-Mar-18	18:00	46.9	69.7	77.6	47.7
1-Mar-18	18:20	44.9	68.8	77.6	45.6
1-Mar-18	18:40	41.4	67.6	77.5	42.8
1-Mar-18	19:00	34.6	65.7	77.5	38.2
1-Mar-18	19:20	28.3	62.8	77.4	31.8

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura A4 – Simulação para a Barragem de Poilão

Date	Time	inflow(m ³ /s)	storage (1000m ³)	elevation (m)	outflow (m ³ /s)
1-Jun-18	0:00	0	1039.8	118	0
1-Jun-18	0:20	0	1039.8	118	0
1-Jun-18	0:40	0	1039.8	118	0
1-Jun-18	1:00	0	1039.8	118	0
1-Jun-18	1:20	0	1039.8	118	0
1-Jun-18	1:40	0	1039.8	118	0
1-Jun-18	2:00	0	1039.8	118	0
1-Jun-18	2:20	0.4	1040	118	0
1-Jun-18	2:40	5.8	1043.2	118	0.7
1-Jun-18	3:00	12.8	1051.4	118.1	4.3
1-Jun-18	3:20	18.9	1061	118.3	10.9
1-Jun-18	3:40	23.9	1069	118.4	17.7
1-Jun-18	4:00	28.1	1074.9	118.4	23.5
1-Jun-18	4:20	31.7	1079.4	118.5	28.2
1-Jun-18	4:40	34.8	1082.8	118.5	32.1
1-Jun-18	5:00	37.8	1085.6	118.6	35.3
1-Jun-18	5:20	40.6	1088.2	118.6	38.6
1-Jun-18	5:40	43.3	1090.5	118.6	41.4
1-Jun-18	6:00	46.1	1092.7	118.7	44.3
1-Jun-18	6:20	48.9	1094.9	118.7	47.1
1-Jun-18	6:40	52	1097.1	118.7	50.1
1-Jun-18	7:00	55.1	1099.4	118.7	53.2
1-Jun-18	7:20	58.5	1101.7	118.8	56.5
1-Jun-18	7:40	62.3	1104.2	118.8	60.1
1-Jun-18	8:00	66.7	1107	118.8	64.2
1-Jun-18	8:20	88.8	1114.5	118.9	75.8
1-Jun-18	8:40	139	1134.3	119.2	109.5
1-Jun-18	9:00	160.5	1153.1	119.4	146.4
1-Jun-18	9:20	172.9	1162.2	119.5	165.5
1-Jun-18	9:40	184.7	1169	119.6	180.7
1-Jun-18	10:00	198.3	1174.5	119.7	193.2
1-Jun-18	10:20	215.3	1181.3	119.8	209.1
1-Jun-18	10:40	238	1188.4	119.9	226.2
1-Jun-18	11:00	270.6	1199.2	120	253.5
1-Jun-18	11:20	324.9	1211.7	120.2	297.5
1-Jun-18	11:40	455.6	1235.6	120.6	390.4
1-Jun-18	12:00	891.3	1297.2	121.6	673.2
1-Jun-18	12:20	555.4	827.3	116.6	2886.8
1-Jun-18	12:40	368.8	1.6	101.1	462.1
1-Jun-18	13:00	289.5	1	100.5	329.2
1-Jun-18	13:20	248	0.9	100.2	268.8
1-Jun-18	13:40	222.6	0.8	100	235.3
1-Jun-18	14:00	204.8	0.7	99.9	213.7
1-Jun-18	14:20	190.9	0.7	99.8	197.9
1-Jun-18	14:40	179.8	0.7	99.7	185.6
1-Jun-18	15:00	170.5	0.7	99.7	175.4
1-Jun-18	15:20	162.8	0.6	99.6	166.5
1-Jun-18	15:40	99	0.5	99.4	130.9
1-Jun-18	16:00	75.9	0.4	99.1	87.5
1-Jun-18	16:20	68	0.4	98.9	72
1-Jun-18	16:40	63.6	0.3	98.9	65.8
1-Jun-18	17:00	60.5	0.3	98.8	62.1
1-Jun-18	17:20	57.6	0.3	98.8	59.1
1-Jun-18	17:40	55.2	0.3	98.8	56.3
1-Jun-18	18:00	53	0.3	98.8	54
1-Jun-18	18:20	50.9	0.3	98.8	52.1
1-Jun-18	18:40	48.9	0.3	98.7	49.8
1-Jun-18	19:00	47.2	0.3	98.7	48.3
1-Jun-18	19:20	45.7	0.3	98.7	46.7
1-Jun-18	19:40	44.3	0.3	98.7	45.2
1-Jun-18	20:00	42.9	0.3	98.7	43.8
1-Jun-18	20:20	41.7	0.3	98.7	42.5
1-Jun-18	20:40	40.5	0.3	98.6	41.3
1-Jun-18	21:00	39.3	0.2	98.6	40.1
1-Jun-18	21:20	38.3	0.2	98.6	39
1-Jun-18	21:40	37.4	0.2	98.6	38.1
1-Jun-18	22:00	36.5	0.2	98.6	37.1
1-Jun-18	22:20	35.5	0.2	98.6	36.2
1-Jun-18	22:40	34.8	0.2	98.6	35.6
1-Jun-18	23:00	34.1	0.2	98.6	34.6
1-Jun-18	23:20	33.4	0.2	98.6	34.1
1-Jun-18	23:40	32.7	0.2	98.6	33.2
2-Jun-18	0:00	32.1	0.2	98.5	31.8

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura A5 – Simulação para a Barragem de Salineiro.

Date	time	inflow(m ³ /s)	storage (1000m ³)	elevation, (m)	outflow (m ³ /s)
1-Jun-18	0:00	0	719.4	256.5	0
1-Jun-18	0:20	0	719.4	256.5	0
1-Jun-18	0:40	0	719.4	256.5	0
1-Jun-18	1:00	0	719.4	256.5	0
1-Jun-18	1:20	0	719.4	256.5	0
1-Jun-18	1:40	0	719.4	256.5	0
1-Jun-18	2:00	0	719.4	256.5	0
1-Jun-18	2:20	0	719.4	256.5	0
1-Jun-18	2:40	0.2	719.5	256.5	0
1-Jun-18	3:00	0.8	720.1	256.5	0
1-Jun-18	3:20	2	721.7	256.5	0.2
1-Jun-18	3:40	3.5	724.6	256.6	0.6
1-Jun-18	4:00	5	728.5	256.6	1.4
1-Jun-18	4:20	6.4	733	256.7	2.5
1-Jun-18	4:40	7.7	737.6	256.7	3.9
1-Jun-18	5:00	8.8	741.9	256.8	5.4
1-Jun-18	5:20	9.9	745.7	256.8	6.9
1-Jun-18	5:40	10.8	748.9	256.8	8.3
1-Jun-18	6:00	11.7	751.8	256.9	9.5
1-Jun-18	6:20	12.6	754.2	256.9	10.6
1-Jun-18	6:40	13.4	756.4	256.9	11.7
1-Jun-18	7:00	14.3	758.4	256.9	12.7
1-Jun-18	7:20	15.2	760.3	257	13.7
1-Jun-18	7:40	16.2	762.1	257	14.7
1-Jun-18	8:00	17.2	764	257	15.7
1-Jun-18	8:20	18.8	766.1	257	16.8
1-Jun-18	8:40	22.6	769.5	257.1	18.8
1-Jun-18	9:00	29.4	775.7	257.1	22.5
1-Jun-18	9:20	36.9	784.5	257.2	28.4
1-Jun-18	9:40	43.3	794.1	257.4	35.2
1-Jun-18	10:00	48.4	802.4	257.5	41.8
1-Jun-18	10:20	53	809.3	257.5	47.5
1-Jun-18	10:40	57.9	815.3	257.6	52.7
1-Jun-18	11:00	63.6	821.3	257.7	58.1
1-Jun-18	11:20	71.2	828.1	257.7	64.5
1-Jun-18	11:40	83.7	837.4	257.9	73.7
1-Jun-18	12:00	112.7	852.6	258.1	96.2
1-Jun-18	12:20	153.5	861.3	258.4	133.1
1-Jun-18	12:40	166.8	49.3	242.4	227.3
1-Jun-18	13:00	150.8	40.4	241.9	158.9
1-Jun-18	13:20	122.8	38.3	241.7	136.8
1-Jun-18	13:40	102.1	35.8	241.5	112.4
1-Jun-18	14:00	87.1	33.8	241.4	94.6
1-Jun-18	14:20	76.2	32.3	241.2	81.6
1-Jun-18	14:40	68.1	31.1	241.1	72.1
1-Jun-18	15:00	62	30.2	241.1	65
1-Jun-18	15:20	57.3	29.5	241	59.7
1-Jun-18	15:40	52.2	28.8	240.9	54.7
1-Jun-18	16:00	44.2	27.9	240.9	48.2
1-Jun-18	16:20	35.6	26.6	240.8	39.9
1-Jun-18	16:40	28.7	25.4	240.7	32.2
1-Jun-18	17:00	24.5	24.4	240.6	26.7
1-Jun-18	17:20	21.7	23.8	240.5	23.1
1-Jun-18	17:40	19.8	23.3	240.5	20.8
1-Jun-18	18:00	18.4	23	240.5	19.2
1-Jun-18	18:20	17.3	22.7	240.5	17.9
1-Jun-18	18:40	16.4	22.4	240.4	16.3
1-Jun-18	19:00	15.6	22.3	240.4	15.8
1-Jun-18	19:20	15	22.1	240.4	15
1-Jun-18	19:40	14.4	22	240.4	14.5
1-Jun-18	20:00	13.9	21.9	240.4	14
1-Jun-18	20:20	13.4	21.8	240.4	13.5
1-Jun-18	20:40	13	21.7	240.4	13.1

Fonte: elaborado pelo autor.

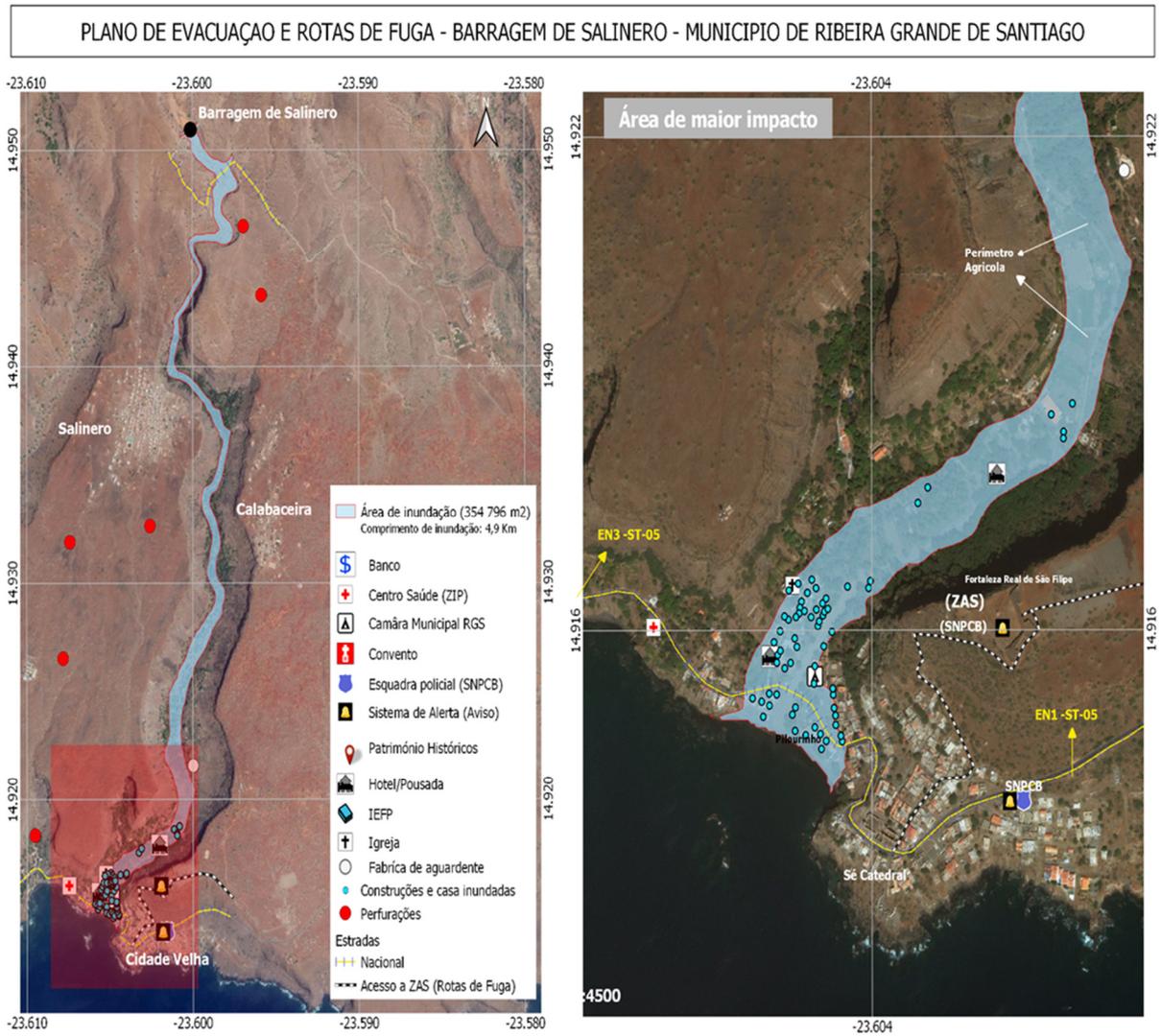
Figura A6 – Simulação para a Barragem de Saquinho.

Date	time	inflow(m3/s)	storage (1000m3)	elevation, (m)	outflow (m3/s)
1-Mar-18	0:00	0	423	312	0
1-Mar-18	0:10	0	423	312	0
1-Mar-18	0:20	0	423	312	0
1-Mar-18	0:30	0	423	312	0
1-Mar-18	0:40	0	423	312	0
1-Mar-18	0:50	0	423	312	0
1-Mar-18	1:00	0	423	312	0
1-Mar-18	1:10	0	423	312	0
1-Mar-18	1:20	0	423	312	0
1-Mar-18	1:30	0	423	312	0
1-Mar-18	1:40	0	423	312	0
1-Mar-18	1:50	0	423	312	0
1-Mar-18	2:00	0	423	312	0
1-Mar-18	2:10	0	423	312	0
1-Mar-18	2:20	0	423	312	0
1-Mar-18	2:30	0.1	423	312	0
1-Mar-18	2:40	0.4	423.2	312	0
1-Mar-18	2:50	0.9	423.5	312	0
1-Mar-18	3:00	2	424.4	312	0.2
1-Mar-18	3:10	3.7	425.8	312.1	0.5
1-Mar-18	3:20	6.1	428.3	312.1	1.3
1-Mar-18	3:30	9.3	431.7	312.2	2.7
1-Mar-18	3:40	13	436.1	312.2	5
1-Mar-18	3:50	17.1	441.1	312.3	8.3
1-Mar-18	4:00	21.4	446.4	312.4	12.3
1-Mar-18	4:10	25.8	451.7	312.5	16.9
1-Mar-18	4:20	30.1	456.8	312.6	21.8
1-Mar-18	4:30	34.5	461.5	312.7	26.7
1-Mar-18	4:40	38.9	465.9	312.8	31.7
1-Mar-18	4:50	43.5	470.1	312.9	36.6
1-Mar-18	5:00	48.5	474.1	313	41.6
1-Mar-18	5:10	54.4	478.2	313.1	47
1-Mar-18	5:20	62.3	482.9	313.1	53.5
1-Mar-18	5:30	73.2	488.6	313.2	61.9
1-Mar-18	5:40	88.3	496	313.4	73.5
1-Mar-18	5:50	108.4	505.5	313.6	89.5
1-Mar-18	6:00	137.6	517.8	313.8	112
1-Mar-18	6:10	175.4	533.6	314.1	142.4
1-Mar-18	6:20	220	553.6	314.4	180.4
1-Mar-18	6:30	266.1	575.3	314.8	225.3
1-Mar-18	6:40	299.1	594.5	315.1	267.8
1-Mar-18	6:50	314.9	607.2	315.3	297.6
1-Mar-18	7:00	315.7	613.1	315.4	311.3
1-Mar-18	7:10	302.4	230.3	307.2	401.2
1-Mar-18	7:20	279.9	207.9	306.5	298.2
1-Mar-18	7:30	249	200.5	306.3	266.9
1-Mar-18	7:40	218.3	192.9	306.1	236.4
1-Mar-18	7:50	190.8	186	305.8	206.5
1-Mar-18	8:00	166.2	180	305.6	180.4
1-Mar-18	8:10	144.9	174.4	305.4	157.5
1-Mar-18	8:20	126.4	169.3	305.2	137.6
1-Mar-18	8:30	111.4	164.7	305	120.8
1-Mar-18	8:40	99.1	160.7	304.9	106.9

Fonte: elaborado pelo autor.

ANEXOS

ANEXO A – EXEMPLO DE PLANO DE EVACUAÇÃO E ROTAS DE FUGA



Localidades Afetadas, Rotas de Fuga e ZAS, ZIP, ZIS**A1 - Localidades Afetadas, Rotas de Fuga e ZAS, ZIP, ZIS**

Localidade	Detalhamento	Número Previsto de Afetados	Rota de Fuga	ZAS, ZIP, ZIS	Abrigo Previsto	Tempo de Chegada de Onda (min)	Distância (km)
Faveta	Ribeira de Pico	400	Seguir para cotas mais elevadas	Ach. Leitação	Oficina da CMSSM	< 15	1
				R. Pico	Escola ou P; Saúde	< 30	3
Ribeirão Boi	Rib. Santa Cruz	300	Seguir para cotas mais elevadas	Boaventura	Casa de Vizinho	< 15	2
Flamengos	Flamengos	300	Seguir para cotas mais elevadas	Delg. Municipal	Casa de Vizinho	< 30	3
Rib. Seca	Rib. Seca	360	ME-EN1-ST-04-R. Seca	Rest. Rota de Carne	Casa de Vizinho	< 15	4
			MD-EN1-ST-02-Ach. Fazenda	P. Saúde	P. Saúde	< 120	6
Vale R. Grande-ST	Cidade Rib. Grande-ST	500	Sé Catedral	Forte Real S. Filipe	Forte Real	< 30	4.9
Charco	Charco	30	Seguir para cotas mais elevadas	Vila R. Barca-C. saúde	Tenda ou casa vizinho	< 50	7

Capa ou página de rosto do PEB**Identificação de documento**

1. Índice
2. Apresentação
3. Classificação das Barragens
4. Objetivos
5. Entidades envolvidas na organização de controlo de segurança de barragem em Cabo Verde
6. Descrição de Barragens:
 - Descarregador de cheias
 - Descarga de fundo
 - Tomada de água
 - Câmara de válvulas
 - Estação de bombagem
 - Galeria de injeção e drenagem
7. Localização e acessos
8. Detecção, Avaliação e classificação de emergências
9. Fluxograma para situação de emergência
10. Mapas de inundação
11. Responsabilidades
12. Encerramento das operações: Recursos humanos, Centro de operação de emergência, equipamento de comunicação e aviso e recursos materiais
13. Aprovação do PAE/PEB
14. Anexos

Capa 2 do PEB

GOVERNO DA REPÚBLICA DE CABO VERDE
MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E AMBIENTE
DIREÇÃO GERAL DE AGRICULTURA

PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA – PAE
EM CASO DE EMERGÊNCIA DA BARRAGEM DE _____

Qual é a situação de emergência?

Incidente envolvendo a barragem

Ver PEB

PREPARADO POR:

Endereço: _____

Telefone: _____

Data: ____/____/____

Capa 3 do PEB

GOVERNO DA REPÚBLICA DE CABO VERDE
MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E AMBIENTE
DIREÇÃO GERAL DE AGRICULTURA

PLANO DE EMERGÊNCIA DA
BARRAGEM DE _____

Local:
Município:
Versão:

PREPARADO POR:

Endereço: _____

Telefone: _____

Data: ____/____/____

Ficha de controle de revisão

Controle de Revisão			
Revisão	Data	Ítem	Descrição das alterações
			Emissão Inicial
Distribuição de cópias::			
Elaborado por: Manuel Moreira Fernandes			Verificado por:
Aprovado por:			Data:

Ficha de contatos internos

Contatos Internos						
Equipe	Nome	Função	Telefone comercial	Telefone particular	Site	Celular
Equipe local / Equipe de apoio operativo		Operador / líder da equipe opera- tiva				
Coordenação Executiva / DG		Engenheiro res- ponsável pela barragem				
Diretor Geral		Proprietário				
Coordenação técnica Civil /LEC		Responsável pela Segurança da barragem				
Coordenador PAE		Gerente de pla- nejamento estra- tégico				
ANAS		Observação e inspeção				
Equipe de apoio logístico		Brigadista / líder da equipe logís- tica				
Equipe de apoio comuni- cação		Brigadista / líder da equipe logís- tica				
Equipe de apoio logístico		Assessor de se- gurança / mem- bro da equipe				
DGASP		Repres. Proprie- tário				
DMAA		Repres. Local				
Associação de Agricultores		Equipe de apoio				

Mensagens de Alerta Padrão

Anexo B – Mensagens de Alerta Padrão

MENSAGEM DE ALERTA

A Coordenação de Proteção Civil do Município de _____ alerta que devido às condições da Barragem de _____ a população deverá evitar as áreas próximas à Ribeira desde a barragem até ao mar de _____.

Fiquem atentos para outras informações.

REPETIR PERIODICAMENTE

MENSAGEM DE EVACUAÇÃO

A Coordenação de Proteção Civil do Município de _____ está avisando a todos os moradores que vivem a jusante da Barragem de _____ que evacuem a área imediatamente. Evacuem a área compreendida pelas localidades (ler LOCALIDADES, DETALHAMENTO e Zonas de Auto-salvamento-ZAS a seguir no plano de evacuação) . Se você necessitar de abrigo durante essa emergência, deverá se reportar aos Agentes de Proteção Civil dispostos na ZAS/ZIP/ZIS .

REPETIR PERIODICAMENTE

INCIDENTE RESOLVIDO – SEGURO PARA RETORNAR

A Coordenação de Proteção Civil do Município de _____ está avisando aos moradores da área a jusante da Barragem de _____ que o problema na barragem foi resolvido e que os moradores podem retornar aos seus lares.

Fiquem atentos para outras informações.

REPETIR PERIODICAMENTE

ANEXO B1- MODELO DE MENSAGEM NOTIFICAÇÃO

Urgente. Mensagem derivada da aplicação do plano de Emergência da barragem de XXXXXX.

Nós estamos o nível de segurança _____ do nosso plano de emergência da barragem porque _____.

Esta é uma mensagem de (declaração / alteração) do nível de segurança feita por _____ coordenador do plano de emergência da barragem, à hora _____ do dia _____.

A causa de declaração é (descrição mínima da situação identificação da circunstancia anormal estragos, risco de ruptura potencial ou real etc.).

Estas mensagem está sendo enviada simultaneamente a XXXXX.

As circunstancias ocorridas fazem com que devem aplicar sua cópia do plano de emergência da barragem de XXXXX e os respectivos mapas de inundação.

Favor comunicar o recebimento desta comunicação a XXXXXX no telefone número XXXXXXXXXXX, fax número XXXXXX.

Nós os manteremos atualizados da situação em de mudança do nível de segurança, caso ela se resolve ou se torne pior. Tentaremos chamá-lo novamente dentro de _____ horas para dar uma atualização.

Para outras informações, contate _____ no telefone _____ os responsáveis e os números de telefone também estão disponíveis no plano de emergência da barragem.

Fim da mensagem.

ANEXO B2 – MODELO DE RELATÓRIO DE FINAL DE EMERGÊNCIA

Relatório Final de Emergência () nível de alerta (adotar Amarelo, Laranja e Vermelho).

- I – Identificação da instalação que originou a emergência:
- II – Data e hora estimadas da emergência: hora dia/mês/ano:
- III – Localização da emergência: se possível, usar coordenadas geográficas:
- IV – Causa provável da emergência:
- V – Cronologia dos eventos principais: data/ horário (dos fatos mais importantes);
- VI – Atuação da equipe de resposta: (dos fatos mais importantes);
- VII – Descrição detalhada dos impactos (quantificas e qualificar);
- VIII – Recurso materiais utilizados: (quantificas e qualificar);
- IX – Recursos humanos utilizadas: (quantificas e qualificar);
- X – Serviços públicos de emergência:
- XI- Outras informações julgadas pertinentes:

Assinatura

Lista de Contatos

C – Lista de Contatos	
Entidade/Departamento	Telefone
Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros-SNPCB Presidente de SNPCB	
Serviço Municipal de Proteção Civil-SMPC Coordenador de SMPC	
Centro Municipal de Proteção Civil e Bombeiros-CMPCB	
Câmara Municipal-CM Gabinete de Presidente	
Comando de Polícia Regional-CPR Gabinete de Comandante	
Estado Maior das Forças Armadas-EMFA Gabinete de Presidente	
Corpo de Bombeiros Chefe	
Serviços de saúde Cruz Vermelha	

ANEXO C – DIVULGAÇÃO, TREINAMENTO E ATUALIZAÇÃO DO PEB

Nesse item são definidas as reuniões de implementação, os exercícios de simulação para o treinamento e aperfeiçoamento do plano.

Os Principais objetivos são:

- Divulgar os planos
- Treinar os equipes de respostas e a coordenação da mesma;
- Testar a eficácia das ações e os recursos emergência;
- Estruturas a confiança das profissionais de emergências; e
- Identificar as possibilidades de melhoria das ações definidas;

1. Seminários de divulgação (frequência quando necessário)

Reuniões para divulgação dos planos a serem implementado e para informação de atualização e modificações realizadas serão divididos em dois momentos.

Primeiro momento implantação do plano de emergência da barragem, onde serão discutidos com a presença de todos os envolvidos, os procedimentos descritos, a organização a metodologia e demais temas pertinentes ao plano.

Segundo momento treinamento em sala através de palestras orientativas de como utilizar o plano.

2. Simulado de comunicação (frequência anual)

Avaliação da efetividade de todo o processo de comunicação interna e externamente) com frequência anual. Verifica se a pessoa contatada é a apropriada para responder a emergência e qual seria a ação que ela tomaria dada a natureza do risco.

3. Simulada em sala de treinamento (frequência bianual)

Forma de se avaliar o conhecimento de todos os envolvidos, em suas respectivas atribuições para o controlo da emergência, por meio de dramatização em sala com frequência anual, pode ser feito com a definição de uma situação emergencial, gerando discussões sobre as soluções a serem adotadas.

ANEXO D – RESPOSTA A POSSÍVEIS CONDIÇÕES EMERGENCIAIS

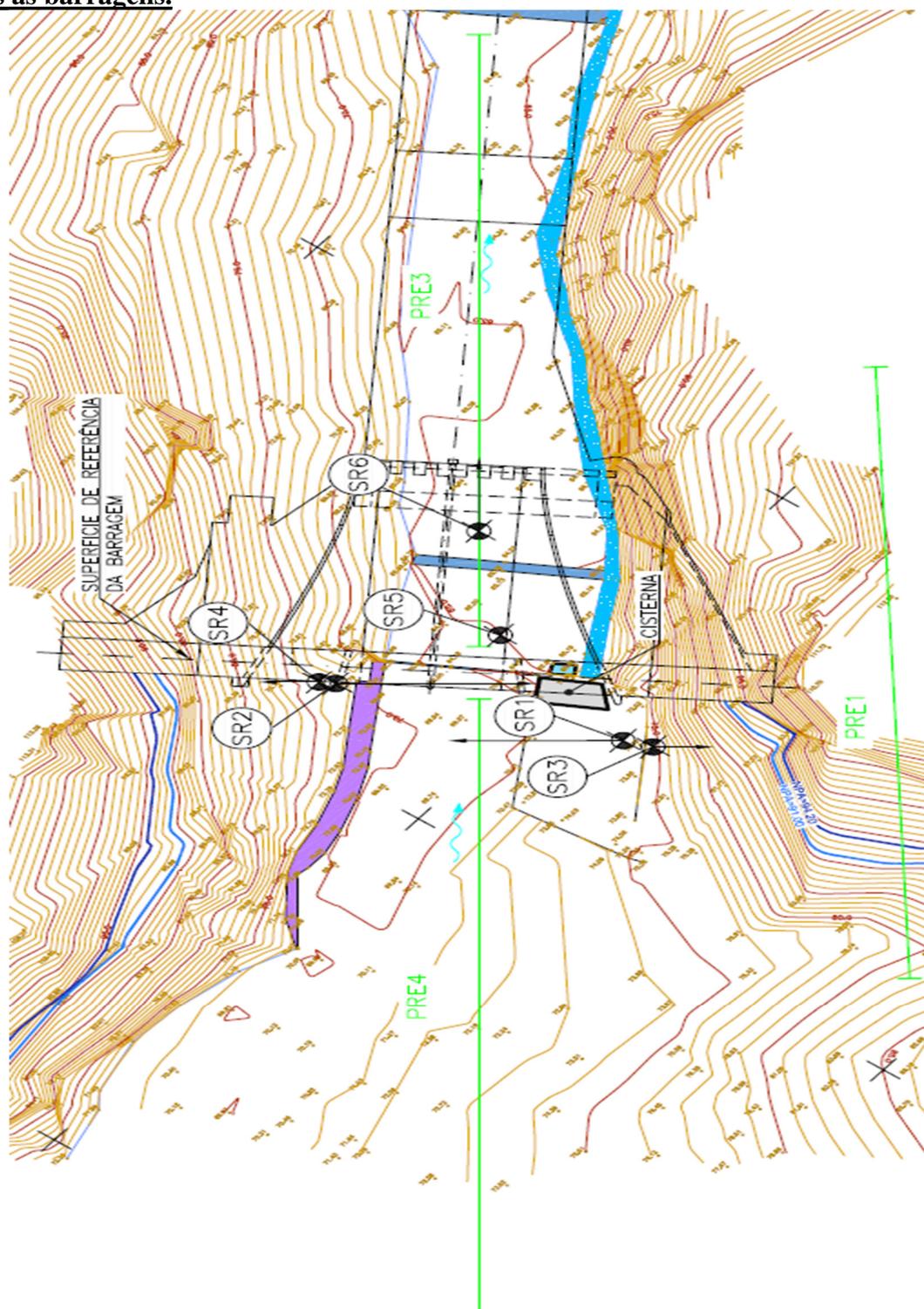
ANEXO D – RESPOSTA A POSSÍVEIS CONDIÇÕES EMERGENCIAIS			
Ocorrência excepcional	Medidas Corretivas e Preventivas	Nível de alerta / consultar QUADRO	
Instrumentação	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar funcionamento dos instrumentos • Refazer leituras • Analisar demais instrumentos e comportamento da estrutura 	Verde	
Anomalias estruturais na barragem e ombreiras	Trincas	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorar evolução (visualmente ou através de instrumentos) • Documentar e monitorar a sua evolução 	Verde
	Surgências	Documentar e monitorar a sua evolução Se houver indícios de <i>piping</i> : <ul style="list-style-type: none"> • deplecionar o reservatório e promover reparos necessários • deve-se lançar algum material que impeça a saída dos sólidos como: bentonita, areia etc. 	Amarelo QUADRO 3
	Vazamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorar e promover reparo para ficar no nível Verde • Deplecionar o reservatório a um nível que permita o reparo 	Laranja QUADRO 4
Cheias	Nível	<ul style="list-style-type: none"> • Abrir descarga de fundo e controlar o nível em condições aceitáveis • Verificar se aparecem novas surgências a jusante. 	Amarelo QUADRO 3
	Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Reparar imediatamente os equipamentos • Se não for possível reparar e iniciar o galgamento, deve-se instituir o nível laranja. 	
	Galgamento da Barragem iniciado	<ul style="list-style-type: none"> • Abrir imediatamente descarga de fundo • Estudar formas de esvaziar o reservatório antes que a barragem não suporte a carga de água 	Laranja QUADRO 4
Falha dos sistemas de alerta e de aviso	Período seco	<ul style="list-style-type: none"> • Reparar os sistemas imediatamente • Adquirir um meio de comunicação alternativo que permita contatar os envolvidos fora da usina 	Verde
	Período chuvoso	<ul style="list-style-type: none"> • Adquirir um meio de comunicação alternativo • Manter contato com a proteção civil para que o aviso, se necessário, seja comunicado pelo meio alternativo 	Amarelo QUADRO 3
		<ul style="list-style-type: none"> • Verificar previsões climáticas para a região 	Laranja QUADRO 4
Ruptura da Barragem	<ul style="list-style-type: none"> • Promover a evacuação das áreas potencialmente inundáveis • Emitir os alertas e avisos previstos 	Vermelho QUADRO 5	

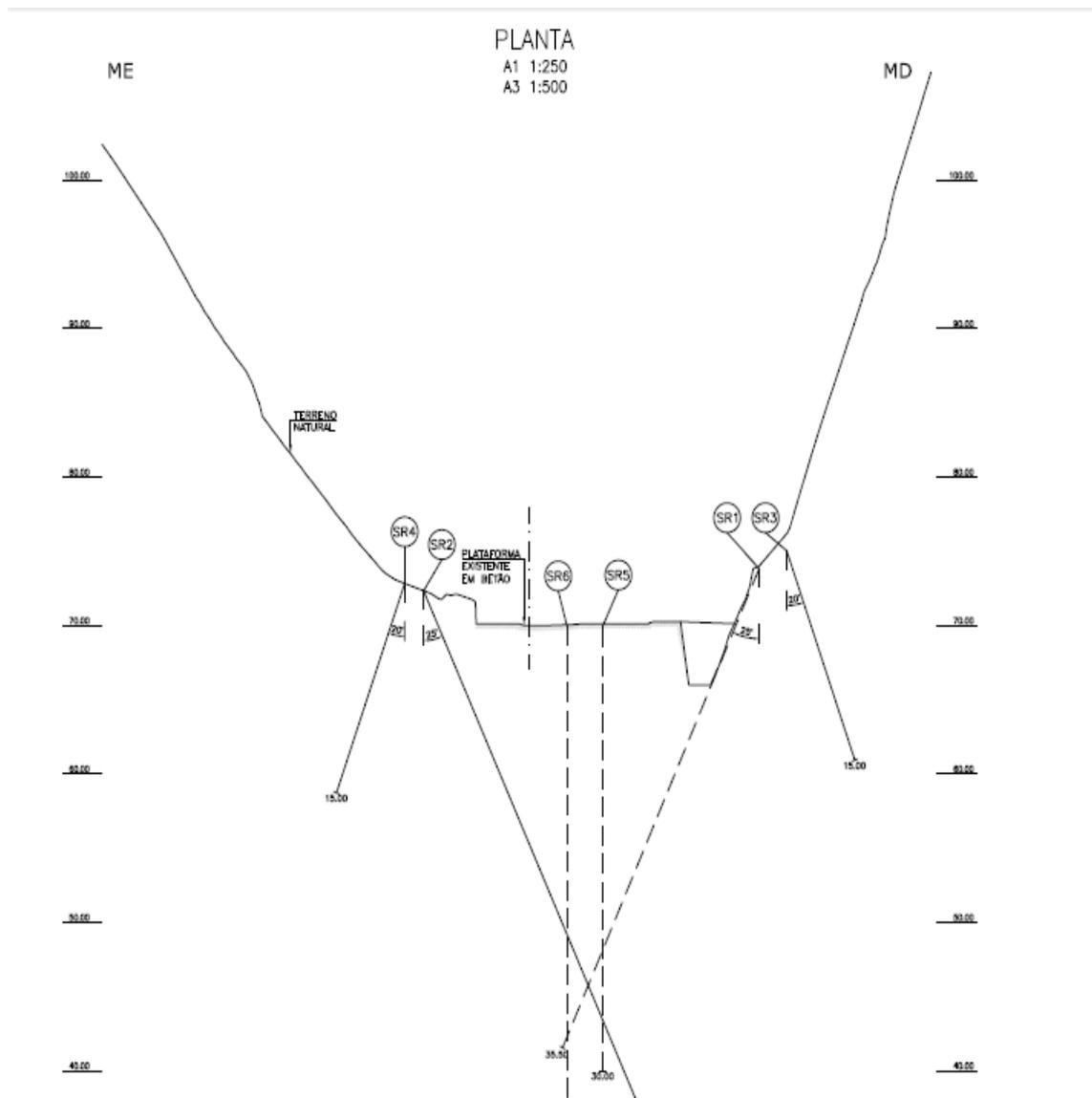
Lista de Recursos Materiais

D1 Lista de Recursos Materiais				
MATERIAL/ EQUIPAMENTO	QUANT./ CAPACIDADE	PROPRIETÁRIO/ FORNECEDOR	LOCAL	CON- TATO
Ambulância		Governo		
Autocarro		Município		
Camionetes		SNPCB		
Camião				
Autogrua				
Gerador				
Cones				
Cavaletes				
Ferramentas				
Holofotes				
Tratores				
Retroescavadora				
Pá Carregadora				
Giratória				
Motoniveladora				
Caminhão Basculante				
Bomba submersível				
Equipamentos de terraplanagem				
Barcos				
Combustíveis		Fornecedor		
Sacos				
Sinalizadora noturno				
Garrafas de água				
Corda				

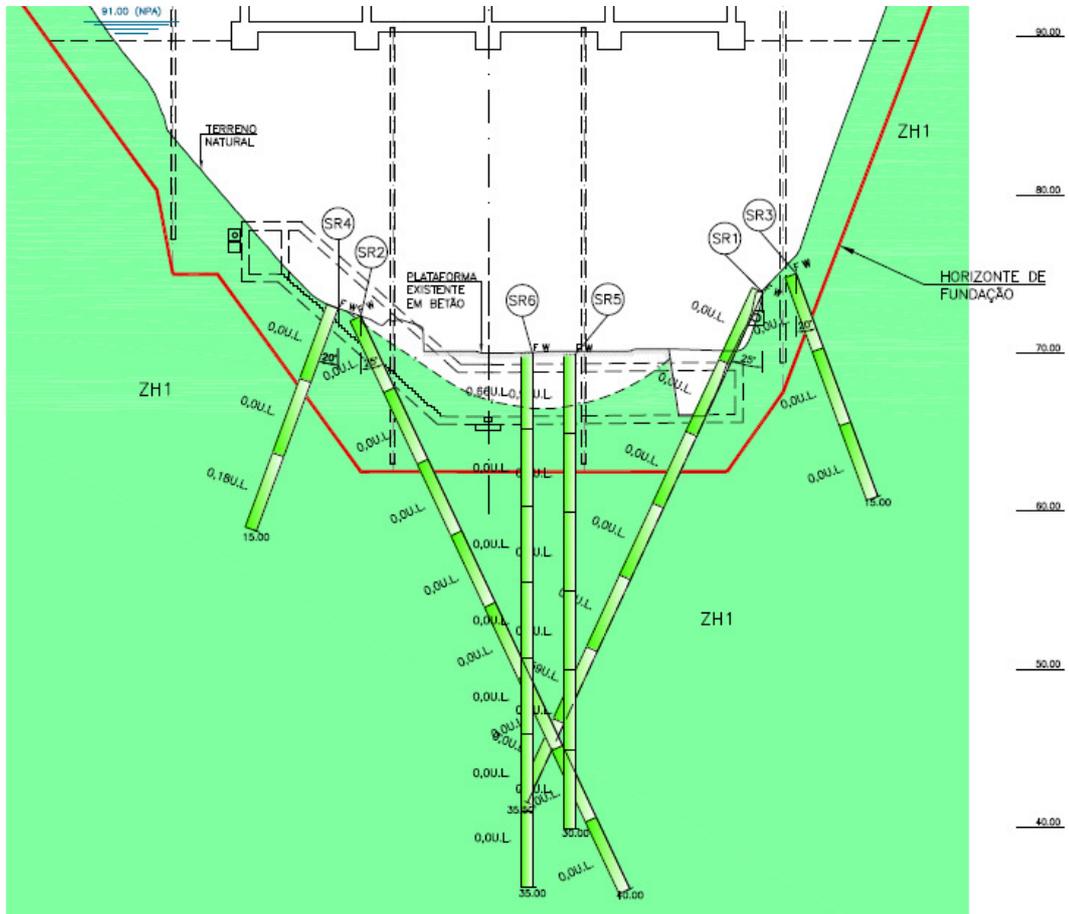
ANEXO E – PERFIS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DE FUNDAÇÃO DAS BARRAGENS

E1 – Plantas de sondagens à rotação e perfis de resistividade elétrica- são semelhantes à todas às barragens.



E2 – Corte de pontos de sondagens à rotação

E3 – Zonamento Hidráulico de fundação



LEGENDA

- Zona Hidráulica 1
- Zona Hidráulica 2
- Zona Hidráulica 3
- Limite Hidráulico
- - - Limite Hidráulico provável
- SR — Sondagem à Rotação

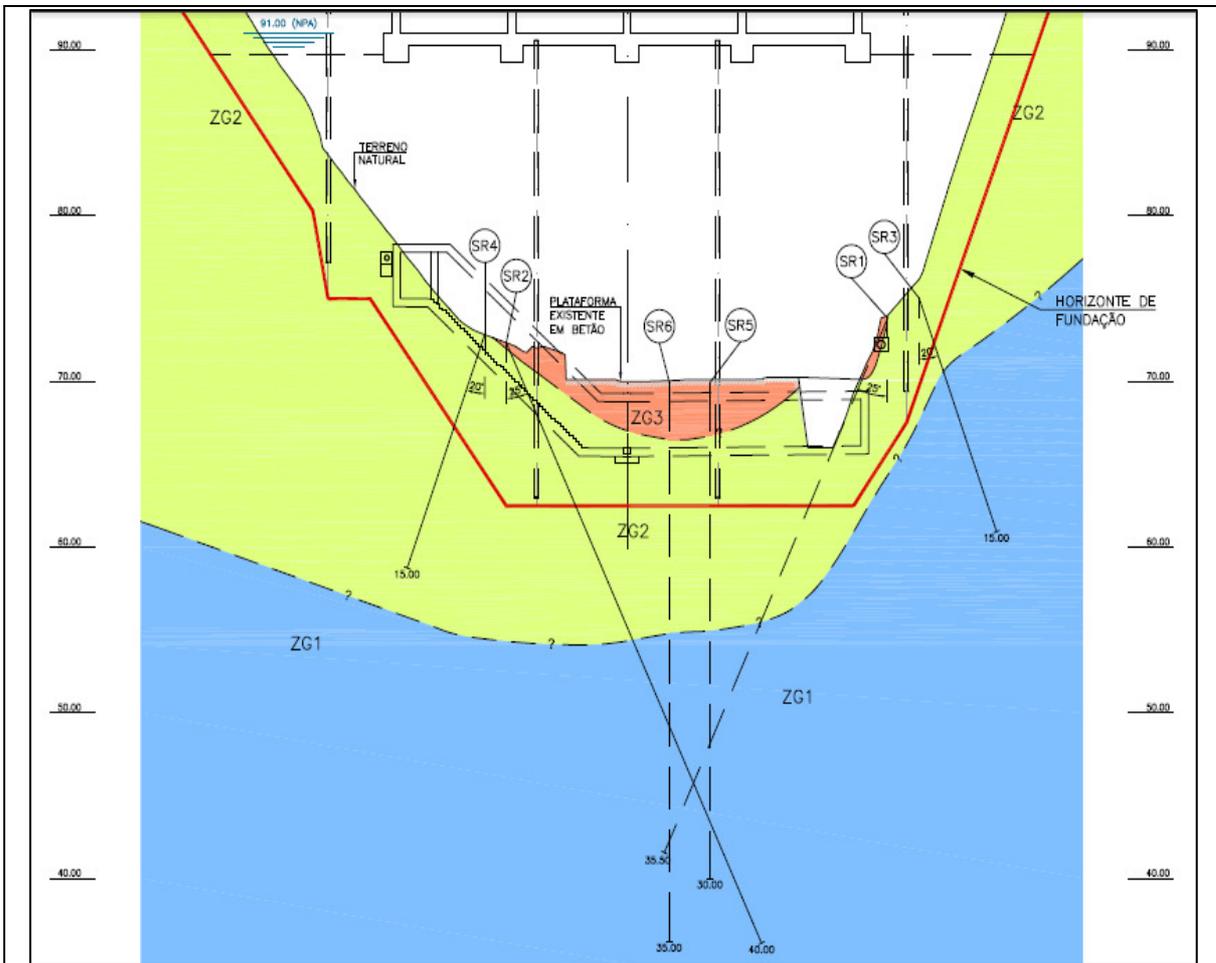
The borehole log shows a vertical shaft with a diameter of 35.40. The top is at 000.00. The shaft is divided into segments representing different absorption levels:

- 0 < Absorção < 10 U.L. (Green)
- 1 < Absorção < 30 U.L. (Blue)
- 3 < Absorção < 100 U.L. (Yellow)
- Absorção > 100 U.L. (Red)
- Pêda Total (Black)

* Não se conseguiu obter obturação derivado do carácter bastante fracturado e alterado do maciço, que indica elevada permeabilidade, aparecendo água à boca do furo em todas as tentativas.

ZONA HIDRÁULICA	ABSORÇÕES DE ÁGUA (U.L.)
ZH3	> 3
ZH2	1 – 3
ZH1	< 1

E4 – Zonamento Geotécnico



LEGENDA

- ZG1 – Zona Geotécnica 1
- ZG2 – Zona Geotécnica 2
- ZG3 – Zona Geotécnica 3
- Limite Geotécnico
- ? – Limite Geotécnico Provável
- Horizonte de Fundação da Barragem

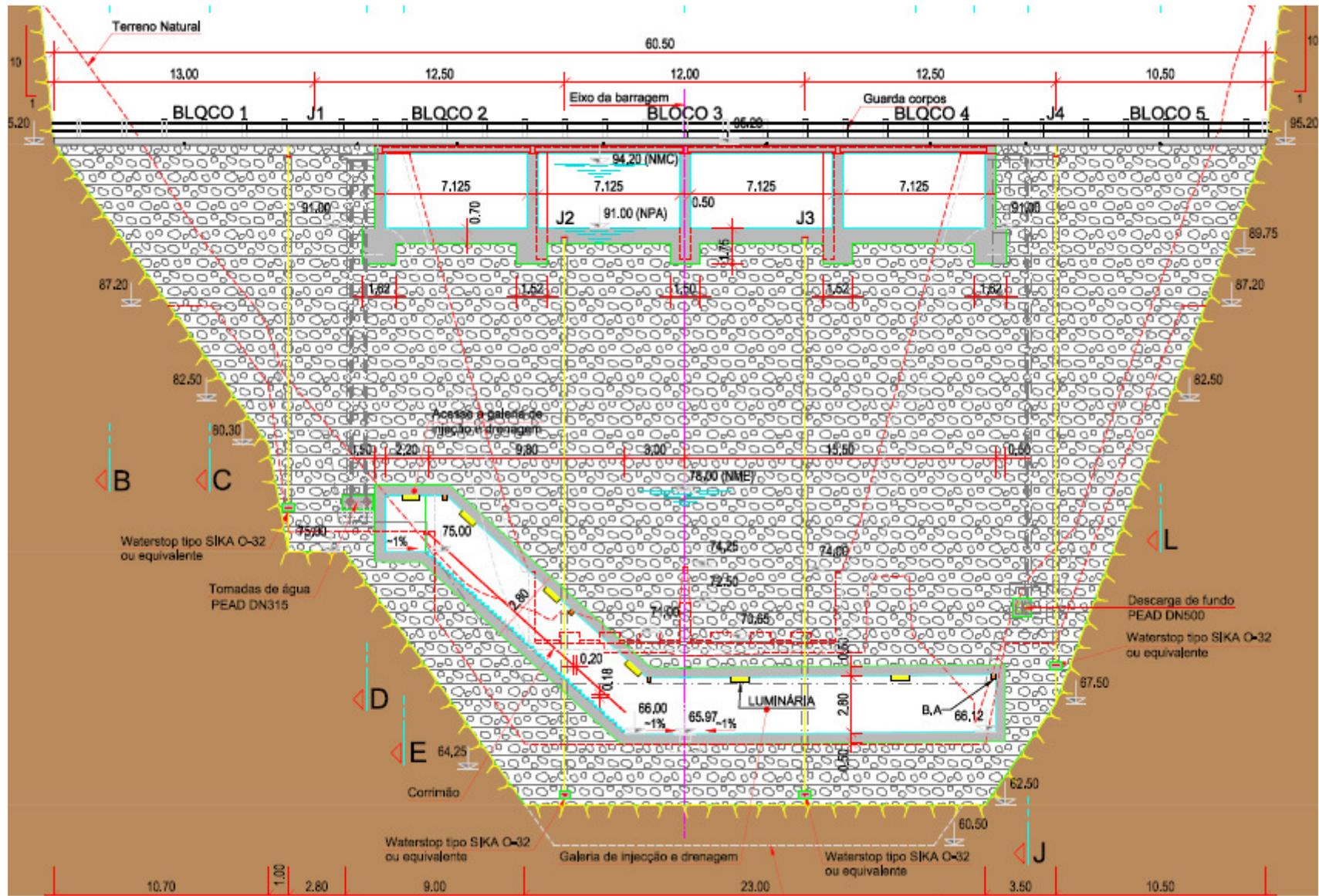
NOTAS:

1- Após ser atingida a cota do horizonte de fundação deverá proceder-se à limpeza manual de toda a superfície. Após a execução destes trabalhos deverá ser realizada uma inspeção à mesma, de forma a serem verificados os pressupostos geotécnicos que definiram a superfície de fundação.

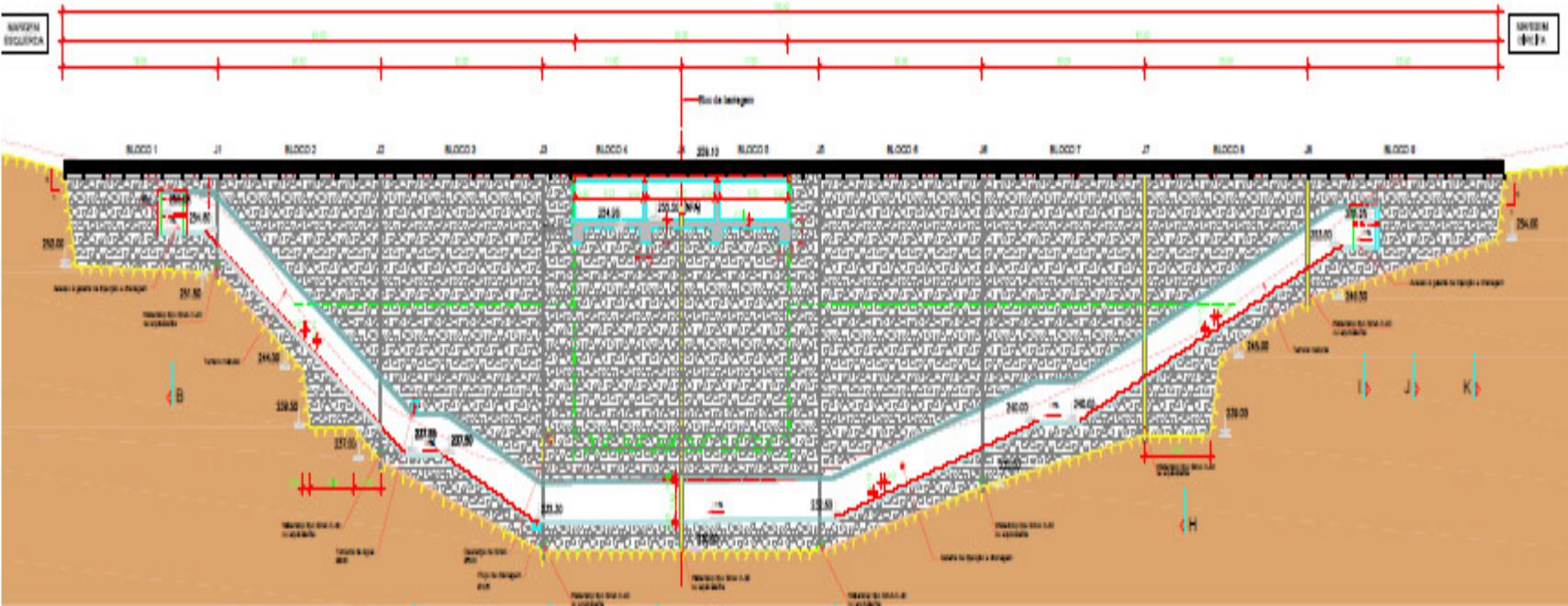
CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

ZONA GEOMECÂNICA	CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA	
	RMR	CLASSE DO MACIÇO
ZG3	≤ 40	IV
ZG2	41 – 60	III
ZG1	≥ 61	II

F2 – Barragem de Figueira Gorda. Corte longitudinal pela superfície de referência da barragem



F4 – Barragem de Salineiro. Corte longitudinal da barragem



F5 – Barragem de Saquinho. Corte longitudinal pela superfície de referência da barragem

