

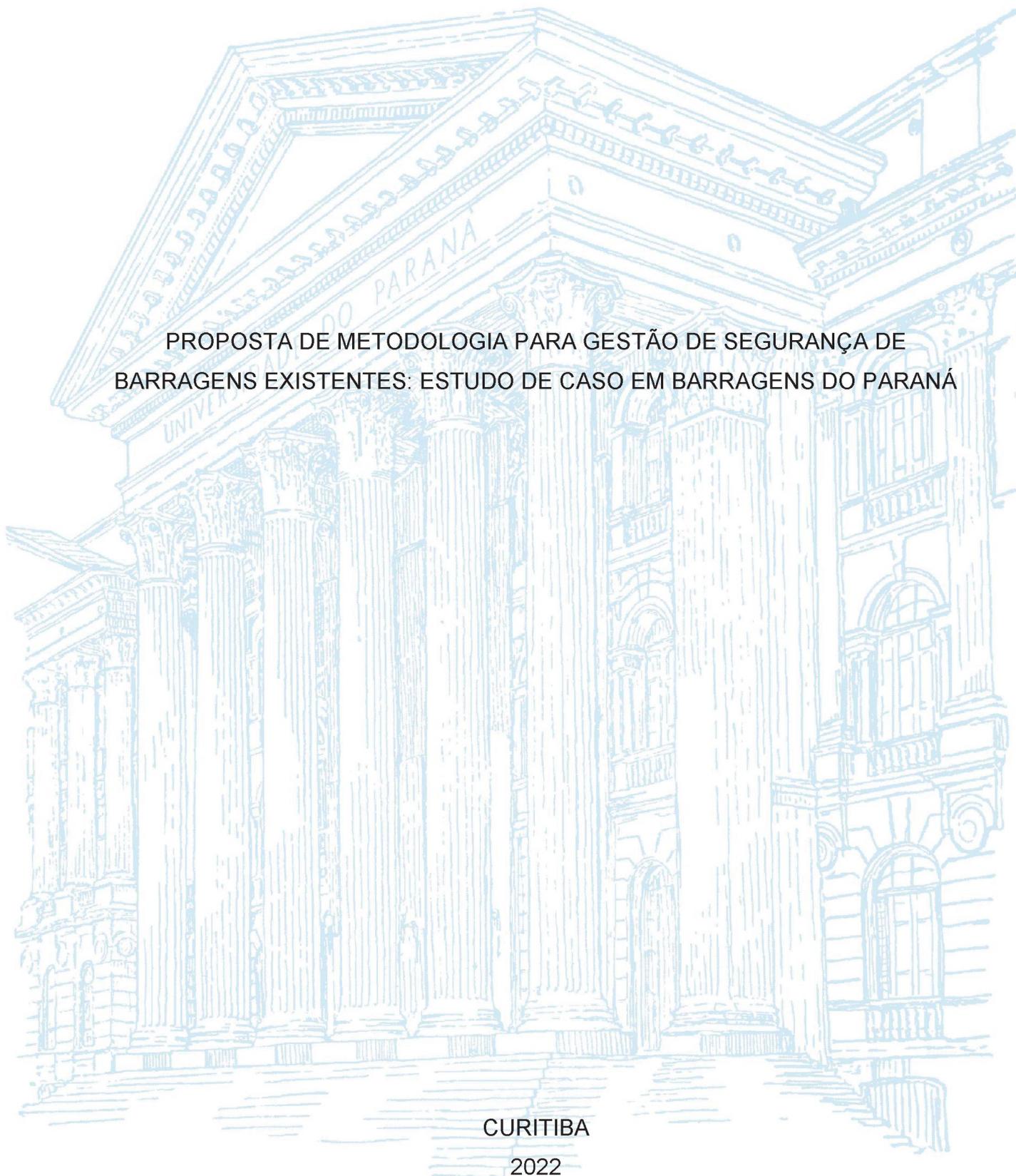
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELA MAIER FARIAS CZAP

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA GESTÃO DE SEGURANÇA DE
BARRAGENS EXISTENTES: ESTUDO DE CASO EM BARRAGENS DO PARANÁ

CURITIBA

2022



MARCELA MAIER FARIAS CZAP

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS
EXISTENTES: ESTUDO DE CASO EM BARRAGENS DO PARANÁ

Trabalho apresentado como requisito parcial
para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

CURITIBA

2022

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

Czap, Marcela Maier Farias

Proposta de metodologia para gestão de segurança de barragens existentes: estudo de caso em barragens do Paraná / Marcela Maier Farias Czap. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: José Marques Filho

1. Barragens e açudes – Segurança – Paraná. 2. Barragens de terra. 3. Barragens de concreto. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Marques Filho, José. IV. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MARCELA MAIER FARIAS CZAP** intitulada: **PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS EXISTENTES: Estudo de caso em barragens do Paraná**, sob orientação do Prof. Dr. JOSÉ MARQUES FILHO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 22 de Março de 2022.

Assinatura Eletrônica

25/03/2022 09:52:52.0

JOSÉ MARQUES FILHO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/03/2022 10:15:34.0

ROBERTO DALLEDONE MACHADO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

24/03/2022 17:26:21.0

MARCELO GIULIAN MARQUES

Avaliador Externo (UNIVER. FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica

28/03/2022 08:47:50.0

SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

23/03/2022 16:42:08.0

ANTONIO NUNES DE MIRANDA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ)

À Deus pela graça concedida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela saúde e disposição que me permitiu a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, José Marques Filho, por toda atenção e dedicação e pelos conselhos profissionais, acadêmicos e pessoais que me ajudaram no processo de amadurecimento.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil por todo conhecimento transmitido.

À secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil por todo auxílio prestado durante os anos de doutorado.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelos anos de afastamento integral proporcionados para os estudos necessários deste curso.

À Companhia de Saneamento do Paraná pela colaboração e pelos dados fornecidos para este estudo.

Aos meus colegas da Coordenação de Engenharia Civil da UTFPR de Guaruapuava pelo apoio e auxílio prestados.

Aos colegas de pós-graduação.

À família e aos amigos.

A todos que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

RESUMO

O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) tem registro de mais de 22 mil barragens existentes no país, porém sabe-se que há mais de 170 mil espelhos d'água artificiais com área maior que 5 hectares no território nacional. Sabe-se, também que existe uma quantidade significativa de barragens com algum problema, portanto soluções devem ser estudadas com base na tecnologia e conceitos contemporâneos. Desta maneira, tendo em vista a importância da garantia de segurança nas barragens existentes, o panorama legislativo nacional a respeito de segurança de barragens e a necessidade de normatização de processos neste campo de atuação, este trabalho objetiva propor uma metodologia de avaliação de segurança em barragens existentes, que engloba conceitos de probabilidade e considera a variabilidade dos parâmetros envolvidos no problema de segurança global do empreendimento. Essa metodologia é composta por três níveis de segurança e dez etapas de verificação, onde pode-se classificar a barragem estudada em "incerta", "segura" e "informada". Duas barragens do estado do Paraná foram utilizadas como estudo de caso para aplicação da metodologia proposta, a barragem do Iraí e a barragem da Derivação do Rio Jordão. Análises de estabilidade foram realizadas com o auxílio de softwares comerciais e conceitos de probabilidade, que abrangem a variabilidade intrínseca dos materiais componentes da barragem. As duas barragens apresentaram nível de segurança como "informada", onde há segurança e todos os documentos exigidos pelos fiscalizadores constam no SNISB. A aplicação da metodologia proposta se mostrou viável mesmo quando há escassez de informações públicas sobre a barragem em questão, o que pode se caracterizar como uma ferramenta útil especialmente para os órgãos fiscalizadores.

Palavras-chaves: Segurança de Barragens. Análise de confiabilidade. Monte Carlo.

ABSTRACT

The National Information System on Dam Safety (SNISB) records more than 22,000 dams in the country, but it is known that there are more than 170,000 artificial water bodies with an area greater than 5 hectares in the national territory. It is also known that there is a significant amount of dams with some kind of problem, so solutions must be designed based on contemporary technology and concepts. Thus, in view of the importance of guaranteeing existing dams, the national legislative panorama regarding dam safety and the standardization of processes in this field of activity, this work aims to propose a methodology for assessing safety in existing dams, which encompasses the concepts of probability and considers the variability of the parameters involved in the global safety problem of the enterprise. This methodology is composed of three safety levels and ten verification steps, where classifying a dam can be "uncertain", "safe" and "informed". Two dams in the state of Paraná were used as a case study for the application of the proposed methodology, the Iraí dam and the dam of the Rio Jordão Derivation. Stability analyzes were offered with the aid of commercial software and probability concepts, which encompass the intrinsic variability of the materials dam components. The dams presented a security level as "informed", where there is security and all mandatory documents are included in the SNISB. The application of the proposed methodology proved to be viable even when there is a lack of public information about the dam in question, which can be characterized as a useful tool especially for inspection bodies.

Key-words: Dam Safety. Reliability analysis. Monte Carlo.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Pilares básicos da segurança de barragens. Fonte: Biedermann (1997)	27
FIGURA 2 – Evolução do número de acidentes e incidentes nos Relatórios de Segurança de Barragens. Fonte: ANA (2021b)	34
FIGURA 3 – Relação $A^2\sqrt{V}$ para pequenas barragens. Fonte: ICOLD (2011) .	37
FIGURA 4 – Classificação de pequenas e grandes barragens. Fonte: ICOLD (2011)	38
FIGURA 5 – Suíça: Conceito global de segurança e manutenção. Fonte: adaptado de Méan et al. (2012), <i>Swiss guidelines, Swiss Federal Office of Energy, Service of Dam Safety</i>	40
FIGURA 6 – Níveis do sistema de segurança de barragens da Áustria. Fonte: Zenz, Obernhuber e Czerny (2012)	43
FIGURA 7 – Resistência mobilizável e resistência mobilizada para superfícies potenciais circulares de ruptura de taludes. Fonte: Silva et al. (2011)	60
FIGURA 8 – Elementos do processo de monitoramento de barragens. Fonte adaptado de ICOLD (2014)	64
FIGURA 9 – Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento. Fonte: adaptado de ELETROBRAS (2003)	66
FIGURA 10 – Instrumentação de Barragens de Concreto. Fonte: adaptado de ELETROBRAS (2003)	66
FIGURA 11 – Anos de vida <i>versus</i> Número de rupturas. Fonte: adaptado de Serafim (1981)	77
FIGURA 12 – Processo de classificação de risco de barragens e ações de gestão. Fonte: Zhou et al. (2015)	82
FIGURA 13 – Curvas de tolerabilidade ao risco social na Inglaterra e Holanda, e nos estados de SP, RJ e RS. Fonte: Beck (2019)	83
FIGURA 14 – Critério RSA de ANCOLD. Fonte: Comitê Australiano de Grandes Barragens ANCOLD (2003)	84
FIGURA 15 – Elementos para gestão de riscos em barragens segundo a PNSB. Fonte: Fusaro (2012)	93
FIGURA 16 – Problema de otimização de custos sobre o ciclo de vida e nível de confiabilidade ótimo. Fonte: Beck (2019)	94
FIGURA 17 – Esquema fundamental da modelagem de incertezas. Fonte: Faber (2003)	97
FIGURA 18 – Problema fundamental de confiabilidade (interferência entre populações). Fonte: adaptado de Beck (2019)	98

FIGURA 19 – Representação de $M = R - S$. Fonte: Kohler (2011)	99
FIGURA 20 – Probabilidade de falha em termos da variável normal padrão Y . Fonte: Beck (2019)	100
FIGURA 21 – Representação da função $g(x)$. Fonte: Kohler (2011)	101
FIGURA 22 – Representação de uma simulação de eventos. Fonte: Faber (2003)	105
FIGURA 23 – Exemplo genérico de modelagem. Fonte: elaborado pela autora.	108
FIGURA 24 – Fluxograma da metodologia proposta. Fonte: elaborado pela autora.	113
FIGURA 25 – Localização da Barragem de Iraí. Fonte: COBA (1996)	128
FIGURA 26 – Perfil estratigráfico longitudinal da Barragem de Iraí. Fonte: COBA (1996)	130
FIGURA 27 – Seção Transversal Típica da Barragem de Iraí. Fonte: adaptado de COBA (1996)	130
FIGURA 28 – Barragem de Derivação do Rio Jordão. Fonte: COPEL (2021) . .	137
FIGURA 29 – Seção típica da soleira vertente- Barragem de Derivação do Rio Jordão. Fonte: adaptado de Levis (2006)	138
FIGURA 30 – Resultados determinísticos da seção P11: (a) Talude de jusante no final de construção; (b) Talude de montante no final de construção; e (c) No enchimento do reservatório. Fonte: Elaborado pela autora.	142
FIGURA 31 – Resultados determinísticos da seção P11: (a) No regime perma- nente de fluxo - nos níveis Mínimo, Normal, Máximo e Maximorum; (b) Na ineficiência do sistema de drenagem; e (c) Na ocorrência de sismos. Fonte: Elaborado pela autora.	143
FIGURA 32 – Resultados determinísticos da seção P11: (a) Após deformações na fundação e corpo do aterro; e (b) No rebaixamento rápido do reservatório. Fonte: Elaborado pela autora.	144
FIGURA 33 – Teste de convergência para o número de simulações de Monte Carlo. Fonte: elaborado pela autora.	146
FIGURA 34 – Probabilidade de falha e índice de confiabilidade <i>versus</i> número de simulações de Monte Carlo. Fonte: elaborado pela autora. . .	147
FIGURA 35 – Comparativo de Superfícies Potenciais de Ruptura para análises determinísticas e probabilísticas, na seção P11 para o regime permanente em nível de reservatório Normal. Fonte: elaborado pela autora.	149
FIGURA 36 – Resultado da análise de sensibilidade. Fonte: elaborado pela autora.	150
FIGURA 37 – Percolação da água, na seção transversal P5, na ineficiência dos drenos. Fonte: elaborado pela autora.	151
FIGURA 38 – Percolação da água, na seção transversal P11, na ineficiência dos drenos. Fonte: elaborado pela autora.	152

FIGURA 39 – Percolação da água, na seção transversal P14, na ineficiência dos drenos. Fonte: elaborado pela autora.	152
FIGURA 40 – Perfil básico considerado para a análise de estabilidade	157
FIGURA 41 – Teste de convergência para o modelo de cálculo de estabilidade de uma barragem de concreto	160

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Critérios de regulação de barragens em alguns países	35
TABELA 2 – Classificação de Dano Potencial Associado (DPA)	37
TABELA 3 – Categorias de risco de barragens de acordo com ANCOLD	49
TABELA 4 – Ações a serem consideradas em cada condição de carregamento.	56
TABELA 5 – Fatores de segurança mínimos para barragens de concreto à gravidade	57
TABELA 6 – Coeficientes de Segurança Recomendados para barragens de terra	59
TABELA 7 – Resumo da variabilidade inerente de propriedades de resistência em solos	62
TABELA 8 – Áreas gerais de preocupação com a segurança de barragens . .	69
TABELA 9 – Lista de verificação do modelo para inspeções do corpo da barra- gem e da fundação	70
TABELA 10 – Lista de verificação do modelo para inspeções de estruturas auxili- ares	71
TABELA 11 – Métodos de análise de risco	80
TABELA 12 – Exemplo genérico de uma matriz de risco	85
TABELA 13 – Frequência de Reavaliação da Ruptura de uma Barragem.	88
TABELA 14 – Classificação segundo a ELETROBRAS (2003) de Barragens quanto às consequências de uma ruptura.	91
TABELA 15 – Nível de segurança de uma barragem de acordo com a metodolo- gia proposta.	114
TABELA 16 – Etapa 1: Identificação	115
TABELA 17 – Etapa 2: Banco de dados	116
TABELA 18 – Etapa 3: Materiais	117
TABELA 19 – Etapa 4: Carregamentos	117
TABELA 20 – Etapa 5: Estabilidade	118
TABELA 21 – Etapa 6: Instrumentação	119
TABELA 22 – Etapa 7: Estruturas auxiliares	120
TABELA 23 – Etapa 8: Segurança de barragens	120
TABELA 24 – Etapa 9: Operação	121
TABELA 25 – Etapa 10: Descaracterização	122
TABELA 26 – Peso específico da Barragem de Derivação do Rio Jordão	127
TABELA 27 – Parâmetros das variáveis adotadas no estudo da barragem da derivação do Rio Jordão	128
TABELA 28 – Resumo de informações registradas no SNISB	129

TABELA 29 – Principais características da Barragem do Iraí.	131
TABELA 30 – Campanha de investigações geológico-geotécnicas da Barragem do Iraí.	132
TABELA 31 – Campanha de investigações geotécnicas dos materiais de construção da Barragem do Iraí.	134
TABELA 32 – Parâmetros geotécnicos da fundação e dos materiais de construção da Barragem do Iraí.	135
TABELA 33 – Níveis de água adotados no reservatório	139
TABELA 34 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 1	140
TABELA 35 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 2	140
TABELA 36 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 3	141
TABELA 37 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 4	141
TABELA 38 – Resumo dos resultados das análises de estabilidade realizadas para a Barragem do Iraí	145
TABELA 39 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 5	146
TABELA 40 – Variáveis aleatórias utilizadas na análise de estabilidade da Barragem de Iraí	147
TABELA 41 – Resumo dos resultados das análises probabilísticas de estabilidade realizadas para a Barragem do Iraí	148
TABELA 42 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 6	150
TABELA 43 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 7	153
TABELA 44 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 8	153
TABELA 45 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 9	154
TABELA 46 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 10	154
TABELA 47 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 1	155
TABELA 48 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 2	155
TABELA 49 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 3	155
TABELA 50 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 4	156
TABELA 51 – Resumo das ações consideradas para a análise de estabilidade .	158
TABELA 52 – Verificação da estabilidade através de análise determinística . . .	158
TABELA 53 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 5	159
TABELA 54 – Resultados da análise de estabilidade probabilística	160
TABELA 55 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 6	161

TABELA 56 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 7	161
TABELA 57 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 8	162
TABELA 58 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 9	162
TABELA 59 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 10	163

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

- ABGE** Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
- ABMS** Associação Brasileira de Mecânicas dos Solos e Engenharia Geotécnica
- ABNT** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRAGE** Associação Brasileira de Empresas Geradoras de Energia Elétrica
- ABRH** Associação Brasileira de Recursos Hídricos
- ALARP** *As-Low-AsReasonably-Practicable*
- ANA** Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
- ANCOLD** *Australian National Committee on Large Dams*
- ANEEL** Agência Nacional de Energia Elétrica
- CBDB** Comitê Brasileiro de Barragens
- CCC** Condição de Carregamento de Construção
- CCE** Condição de Carregamento Excepcional
- CCN** Condição de Carregamento Normal
- CCR** concreto compactado a rolo
- CEMIG** Companhia Energética de Minas Gerais
- CIUC** ensaio triaxial de compressão consolidado, isotrópico e não drenado
- CNGB** Comitê Nacional de Grandes Barragens
- CNRH** Conselho Nacional de Recursos Hídricos
- COV** Coeficiente de Variação
- CPSLS** *Cost-Per-Statistical-Life-Saved*
- CRI** Categoria de Risco
- CWC** *Central Water Commission*
- DEAP** *Dam Emergency Action Plans*
- DPA** Dano Potencial Associado

DS ensaio de cisalhamento direto

EAP *Emergency Action Plans*

EIA *Environmental Impact Assessment*

ETA *Event Tree Analysis* ou Análise por Árvore de Eventos

FEMA *Federal Emergency Management Agency*

FERC *Federal Energy Regulatory Commission*

FMEA *Failure Mode and Effect Analysis* ou Análise de Modos de Falha e seus Efeitos

FORM *First Order Reliability Method*

FS Fator de Segurança

FSD_φ Fator de Segurança contra o Deslizamento considerado fundação em material sem coesão

FSD_c Fator de Segurança contra o Deslizamento considerado fundação em material com coesão

FSF Fator de Segurança contra a Flutuação

FST Fator de Segurança contra o Tombamento

FTA *Fault Tree Analysis* ou Análise por Árvore de Falhas

IBRACON Instituto Brasileiro de Concreto

IBRAM Instituto Brasileiro de Mineração

ICOLD *International Commission on Large Dams*

LCI Diagramas de Localização, Causas e Indicadores de Falhas

MI Ministério da Integração Nacional

MoEF *Ministry of Environmental and Forests*

N.A. Nível de água

PAE Plano de Ação de Emergência

PCH Pequenas Centrais Hidrelétrica

PNSB Política Nacional de Segurança de Barragens

PSB Plano de Segurança da Barragem

PeR População em Risco

RPSB Revisão Periódica de Segurança de Barragens

RSB Relatório de Segurança de Barragens

SABESP Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SCR Superfície Crítica de Ruptura

SEED *Safety Evaluation os Existing Dams*

SMC Simulação de Monte Carlo

SNISB Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

SORM *Second Order Reliability Method*

SPANCOLD *Comité Nacional Español de Grandes Presas*

SPR Superfície potencial de ruptura

SoS *Standard of Serviceability*

TC ensaio triaxial

UC ensaio não confinado

USACE *U.S. Army Corps of Engineers*

USBR *United States Bureau of Reclamation*

USS Resistência não drenada

USSD *United States Society on Dams*

UU ensaio triaxial de compressão não consolidado, não drenado

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Altura da barragem
V	Volume de reservação
R	forças resistentes ou capacidade de resistência
S	esforços solicitentes
COV	coeficiente de variação
σ	desvio padrão da amostra
μ	média da amostra
Am	amplitude da amostra
E	Evento
$P(E)$	Probabilidade de ocorrência de um evento
$C(E)$	Medida de consequências geradas pela ocorrência de um evento
$risco(E)$	Risco de um evento
p	Probabilidade ou frequência
n	Número potencial de vítimas
α	Coeficiente de aversão ao risco
f	Probabilidade de falha
I	Importância
P	Grau de Periculosidade
V	Grau de Vulnerabilidade
PR	Potencial de Risco
p_f	probabilidade de falha
r	distribuição de probabilidades de R
s	distribuição de probabilidades de S

$f_{RS}(r, s)$	distribuição de probabilidades destas variáveis no espaço bidimensional RS
P	probabilidade
Ω_f	domínio de falha
M	margem de segurança
Y	variável normal padrão de M
Φ	distribuição cumulativa normal padrão
β	índice de confiabilidade
$g(\mathbf{X})$	equação limite
\mathfrak{R}	confiabilidade
m	representar todas as respostas para a simulação de um evento
n	o número destas respostas que representem a falha
\underline{X}	variável aleatória com distribuição uniforme $f(a, b)$
\hat{I}	média amostral
N	número de simulações a realizar
ϕ_{cr}	ângulo de atrito concreto-rocha
γ_s	peso específico do sedimento
ϕ_s	ângulo de atrito interno do sedimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	22
1.2	JUSTIFICATIVA	23
1.3	OBJETIVO	25
1.4	ESTRUTURA DO ESTUDO	25
2	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	SEGURANÇA DE BARRAGENS	27
2.2	CONTEXTO NACIONAL	28
2.3	LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL	35
2.3.1	<i>International Commission on Large Dams (ICOLD)</i>	36
2.3.2	França	38
2.3.3	Reino Unido	39
2.3.4	Suíça	40
2.3.5	Áustria	42
2.3.6	Espanha	44
2.3.7	Portugal	46
2.3.8	EUA	47
2.3.9	Canadá	47
2.3.10	Austrália	48
2.3.11	Índia	49
2.3.12	China	50
2.3.13	Barragens em fronteiras	50
2.3.14	Comparativo	51
2.4	ASPECTOS DE PROJETO DE BARRAGENS	52
2.4.1	Investigações preliminares	52
2.4.2	Projeto de barragens	53
2.4.3	Operação e manutenção	63
2.4.4	Sistema de instrumentação	65
2.4.5	Inspeções visuais	67
2.5	ENVELHECIMENTO DE BARRAGENS	73
2.6	RUPTURAS DE BARRAGENS	75
2.6.1	Histórico mundial	76
2.6.2	Histórico nacional	78
2.6.3	Análise de riscos	79

2.6.3.1	Quantificação do risco	81
2.6.3.2	Gestão de riscos	92
2.6.3.3	Confiabilidade estrutural em barragens	96
2.7	NECESSIDADES DO SETOR	108
2.7.1	Normatização	109
2.7.2	Guias de boas práticas	110
2.7.3	Aplicação dos conceitos de análise de risco	110
3	MATERIAIS E MÉTODOS	111
3.1	METODOLOGIA PROPOSTA	111
3.1.1	Etapa 1: Identificação	115
3.1.2	Etapa 2: Banco de dados	116
3.1.3	Etapa 3: Materiais	116
3.1.4	Etapa 4: Carregamentos	117
3.1.5	Etapa 5: Estabilidade	118
3.1.6	Etapa 6: Instrumentação	119
3.1.7	Etapa 7: Estruturas auxiliares	119
3.1.8	Etapa 8: Segurança de Barragens	120
3.1.9	Etapa 9: Operação	121
3.1.10	Etapa 10: Intervenção ou Descaracterização	121
3.2	GEO STUDIO	122
3.2.1	SEEP/W	123
3.2.2	SLOPE/W	123
3.2.3	SIGMA/W	124
3.2.4	PROGRAMAÇÃO EM PHYTON	125
3.3	EXCEL	126
3.3.1	Análise determinística	126
3.3.2	Abordagem probabilística	126
3.4	A BARRAGEM DE IRAÍ	128
3.4.1	Complexidade geológica local	132
3.4.2	Materiais de construção	133
3.4.3	Incertezas na caracterização de solos	136
3.4.4	Incertezas de cálculo	136
3.5	A BARRAGEM DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO	136
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	140
4.1	BARRAGEM DO IRAÍ	140
4.1.1	Levantamento de dados	140
4.1.2	Análises determinísticas	141

4.1.3	Análises probabilísticas	146
4.1.4	Outras análises	150
4.1.4.1	Sensibilidade	150
4.1.4.2	Eficiência dos drenos	151
4.1.5	Análise Holística	152
4.1.6	Documentação	153
4.2	BARRAGEM DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO	154
4.2.1	Levantamento de dados	154
4.2.2	Análises determinísticas	156
4.2.3	Análises probabilísticas	159
4.2.4	Documentação	162
5	CONCLUSÕES	164
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	166
	REFERÊNCIAS	168

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB)(CBDB, 2021), barragens são definidas como obstáculos artificiais com a capacidade de reter água ou qualquer outro líquido, rejeitos, detritos, para fins de armazenamento ou controle. Podem variar em tamanho, desde pequenos maciços de terra, usados frequentemente em fazendas, a enormes estruturas de concreto ou de aterro, geralmente usadas para fornecimento de água, de energia hidrelétrica, para controle de cheias e para irrigação, além de diversas outras finalidades. Sua construção é complexa, de risco potencial elevado e exige grandes investimentos públicos e privados.

As barragens são construídas para servir a propósitos úteis, mas como todas as estruturas feitas pelo homem, elas precisam de atenção constante para aumentar sua vida útil, por um lado, e para remover qualquer perigo potencial que possam apresentar, por outro (ADAMO et al., 2021).

Segundo Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, ANA (2021b), uma barragem segura é uma barragem bem cuidada, na qual esforços, energia, atenção, recursos e profissionais capacitados são direcionados para uma boa concepção, um bom projeto, uma construção que siga as boas práticas da engenharia e para as etapas posteriores à construção: primeiro enchimento, manutenção, operação e desativação, se for o caso.

O Brasil possui um cadastro, chamado Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), com 22.338 barragens registradas, com diferentes finalidades, como acúmulo de água, de rejeitos de minérios ou industriais e para geração de energia, que foram informadas até o ano de 2021 por 33 órgãos fiscalizadores. Mas sabe-se que no Brasil há mais de 170 mil espelhos d'água artificiais (massas d'água) com área maior que 5 hectares, conforme informado no relatório produzido pela ANA (ANA, 2018a). O total de barramentos será conhecido quando todos os órgãos e entidades fiscalizadoras cadastrarem todas as barragens sob sua jurisdição, conforme estabelece, entre outras obrigações, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 e complementada pela Lei nº 14.087/2020. (ANA, 2021a, 2018b).

Os recentes acidentes de barragens no Brasil, notadamente no setor de mineração, em barragens de rejeito, aumentaram significativamente a preocupação da sociedade com relação à segurança desses empreendimentos, bem como, estendeu essa sensação aos empreendimentos hidráulicos. Como pode ser observado em ANA

(2021b), existe uma quantidade significativa de barragens com algum problema, e soluções devem ser estudadas com base na tecnologia e conceitos contemporâneos.

Porém, ainda se tem como base e critério de projeto a utilização de fatores de segurança, que apresentam dificuldades na consideração das variabilidades intrínsecas dos materiais e fundações, dos métodos executivos e das alterações no tempo (SOUZA, 2017), indicando a necessidade de novas propostas baseadas em análise de confiabilidade que permitam análises de risco confiáveis.

1.2 JUSTIFICATIVA

A função de controle de enchentes das barragens salvou a humanidade de grandes perdas de vidas e poupou terras ricas de inundações e danos. Porém, a importância das barragens foi crescente no século passado devido à necessidade de energia elétrica, necessária às indústrias e às aplicações humanas, de forma que grande parte da energia elétrica brasileira é gerada por barragens atualmente (ADAMO et al., 2020).

Historicamente, as barragens têm servido como fonte confiável de água para a vida das pessoas ao longo dos últimos 5 mil anos, de acordo com registros arqueológicos que se baseiam em investigações de ruínas e na observação de estruturas ainda em funcionamento. As barragens permitem que as populações colem e armazenem água quando abundante e depois a usem nas épocas de seca. Elas têm sido então fundamentais na formação de estoques de água, indispensáveis ao estabelecimento e ao sustento de cidades e de fazendas, para a irrigação e para a produção de alimentos (CBDB, 2021).

Portanto, o número de novas barragens aumenta continuamente, sendo necessárias ações precisas em todas as fases do empreendimento: projeto, construção, operação e desativação. Qualquer mal funcionamento dessas estruturas pode ocasionar uma anomalia grave ou até mesmo um rompimento, causando perdas econômicas, ambientais e de vidas humanas (MUANIS PERSECHINI et al., 2015).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através de estudos sobre segurança de barragens, relata que há mais de 40 países que adotam programas de segurança de barragens. O índice anual, em 2016, de acidentes em países como Suécia, Suíça, Canadá, Estados Unidos, Inglaterra e Espanha, é de um acidente em 10 mil barragens por ano. O Brasil possuía, em 2016, o pior índice diante do cenário mundial: um acidente para 250 barragens por ano (WOLNEY, 2016).

Porém, no domínio das barragens, a prática da análise da segurança permanece associada a conceitos simples, tais como o do coeficiente global de segurança. Estes coeficientes globais, são geralmente interpretados no enquadramento de uma

escala de aceitação com base em alguma experiência prévia, resultando numa pobre base probabilística. O coeficiente global de segurança, sendo um resultado de uma análise determinística, exclui a variabilidade dos parâmetros envolvidos, e devido à aleatoriedade, por exemplo, dos parâmetros geotécnicos, a utilização do fator de segurança pode gerar um falso senso de segurança. Para o caso de empreendimentos hidráulicos, as normativas atuais sugerem a utilização desses fatores para majorar os esforços e minimizar resistências (EUROCODE, 2002; USACE, 1999; ELETROBRAS, 2003).

Com a instituição da PNSB o setor esperava que as condições de segurança das barragens melhorassem, mas os casos de Mariana e Brumadinho deixam evidente que o problema é bem mais complexo e não pôde ser solucionado somente pela PNSB. É preciso uma melhoria na qualidade dos projetos, das manobras da operação, das manutenções e das avaliações de segurança das barragens. O corpo técnico de engenheiros de barragens precisa, e deve, acompanhar o desenvolvimento acadêmico e tecnológico, afim de extrair dos mesmos ferramentas que viabilizem modelos comportamentais mais próximos da realidade.

Com tamanha preocupação do setor e, observando o desenvolvimento das diretrizes e regras estabelecidas pela PNSB, torna-se essencial, neste momento, a discussão, estudo e elaboração de normas técnicas que auxiliem os processos e procedimentos necessários à segurança desses empreendimentos. Ao ler os Relatórios de Segurança de Barragens (RSB), publicados pela ANA, fica evidente a dificuldade dos empreendedores de entregarem, ou mesmo desenvolverem, os documentos necessários para atestar a segurança das barragens. Isto se deve, em muito, pela falta de conhecimento técnico ou falta de corpo técnico capaz e experiente para tal tarefa. Uma norma técnica auxiliaria no treinamento e capacitação desses profissionais. Além de fornecer subsídio para os agentes fiscalizadores em suas atividades. Outras vantagens seriam evidentes, como:

- Fomento da cultura da segurança de barragens;
- Aspectos mínimos de qualidade em processos e procedimentos;
- Padronização de documentos;
- Organização do corpo técnico envolvido;
- Critérios mínimos para as inspeções;
- Entre outras.

1.3 OBJETIVO

Tendo em vista a importância da garantia de segurança nas barragens existentes no país, o panorama legislativo nacional a respeito de segurança de barragens e a necessidade de normatização de processos neste campo de atuação, este trabalho objetiva propor uma metodologia de avaliação de segurança em barragens existentes, que engloba conceitos de probabilidade e considera a variabilidade dos parâmetros envolvidos no problema da segurança global do empreendimento. Para isto, foram utilizados softwares usualmente empregados a fim de fornecer uma ferramenta que poderá ser utilizada pela comunidade técnica de maneira imediata.

Este trabalho busca, também:

- Propor uma metodologia sintetizada para maximizar a utilização de análises probabilísticas na avaliação de segurança de barragens existentes;
- Avaliar a segurança de uma barragem de terra no estado do Paraná através de métodos de cálculo de estabilidade determinísticos e probabilísticos;
- Avaliar a segurança de uma barragem de concreto no estado do Paraná através de métodos de cálculo de estabilidade determinísticos e probabilísticos;
- Validar a metodologia proposta através das barragens estudadas.

1.4 ESTRUTURA DO ESTUDO

No capítulo 1, o tema é introduzido, as justificativas da pesquisa são apresentadas e o objetivo do estudo é descrito.

No capítulo 2, a revisão de literatura aborda os tópicos de:

- segurança de barragens, incluindo a definição e aspectos importantes sobre o tema;
- contexto nacional, apresentando a magnitude do problema enfrentado no país;
- legislação internacional, descrevendo as ações realizadas por alguns países;
- Aspectos de projeto, que devem ser ressaltados devido a sua importância na segurança dos empreendimentos;
- Envelhecimento, discutindo aspectos sobre a deterioração de barragens;
- Ruptura de barragens, com um breve relato histórico mundial e nacional;

- Necessidades do setor, evidenciando a necessidade normativa em processos e procedimentos relacionados à segurança de barragens.

No capítulo 3, são descritos os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa, iniciando com a apresentação da metodologia proposta, depois com os softwares e suas funcionalidades importantes para este contexto e do algoritmo desenvolvido para validar as ferramentas utilizadas e, por fim, a descrição das barragens em estudo, a definição das variáveis (aleatórias ou não) a serem utilizadas, .

No capítulo 4, os resultados e discussões são apresentados. E no capítulo 5, as conclusões do estudo são abordadas, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Segurança de barragem é a condição que visa a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (BRASIL, 2010), é a capacidade da barragem de satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais.

Biedermann (1997) considera que a segurança de barragens pode ser obtida apoiando-se em três pilares básicos: segurança estrutural (projeto, construção e manutenção adequados), monitoramento e gestão de emergência, como apresentado na Figura 1.

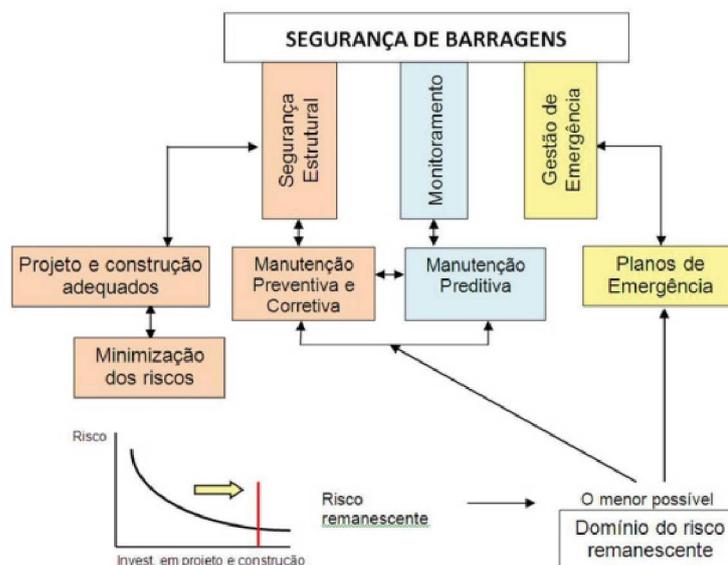


FIGURA 1 – Pilares básicos da segurança de barragens. Fonte: Biedermann (1997)

Não há como falar de segurança de barragens e considerar apenas o empreendimento, ou todo o valor monetário que a sua falha pode custar, pois uma barragem está inserida em um vale, em uma bacia hidrográfica, em uma comunidade, em um município. Toda a sociedade regional depende dela, dos seus bens e serviços prestados, do seu bom funcionamento.

Adamo et al. (2020) relaciona Segurança de Barragens em dois problemas principais. Estes são:

- A segurança da própria estrutura da barragem;

- A segurança da População em Risco (PeR).

As análises de segurança de uma barragem devem ser realizadas por um engenheiro profissional, externo, especializado, e inclui as disciplinas de hidrologia, geologia e engenharia, todas relevantes para as questões de segurança de barragens (ADAMO et al., 2021). Segundo o mesmo autor, são áreas que devem ser consideradas na Segurança de Barragem:

- Condições geológicas de fundação;
- Fatores hidrológicos e hidráulicos;
- Acúmulo de depósitos de cascalho;
- Fissuração e deslocamento de estruturas de concreto;
- Filtros e camadas de drenagem entupidos;
- Rebaixamento rápido de um reservatório.

Obviamente, para a conceituação adequada de segurança de barragens são importantes os conceitos da *International Commission on Large Dams* (ICOLD), e várias regulamentações nacionais e internacionais que se desenvolvem desde meados do século passado.

Portanto, além das áreas citadas por Adamo et al. (2021), deve-se ter importante atenção aos documentos exigidos pelas agências regulamentadoras, a exemplo, os relatórios de inspeções, de revisões periódicas, o Plano de Ação em Emergências (PAE) e outros que serão abordados mais adiante neste trabalho.

2.2 CONTEXTO NACIONAL

Segundo MENESCAL (2009), todo o Arcabouço Legal brasileiro tem como ponto de partida a sua Constituição Federal, promulgada em 1988. Mais especificamente, a legislação brasileira que trata sobre a política pública das águas teve seu início por meio do Decreto Federal nº 24.643, de 10/07/1934, conhecido como Código de Águas. Porém, quando trata-se de Gestão das Águas ou de Recursos Hídricos destaca-se a Lei Federal nº 9433, 08/01/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Recursos Hídricos. Mas foi o Ministério da Integração o precursor na publicação de diversos livros e manuais relacionados com gestão da segurança de barragens.

Desde 2010, a regulamentação de segurança de barragens, conforme estabelecido na Lei No. 12.334 (Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB) e

resoluções complementares, emanadas do CNRH, tem por finalidade, garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas conseqüências; 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; coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos; e fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos, entre outros.

A PNSB foi estabelecida para prevenir acidentes, regulamentando padrões de segurança, visando manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente. Tal preocupação se traduz pela dispersão de direitos a serem tutelados pelo Estado e que são diretamente afetados nos casos de acidentes (SILVA; FAIS; FREIRIA, 2020). Recentemente, a Lei 12334 de 2010 foi alterada pela Lei 14066/20, como reflexo dos acidentes de Mariana e Brumadinho.

Com base na definição de (ICOLD, 2011), a PNSB se destina a barragens que se enquadre em ao menos uma das seguintes características:

- Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros);
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);
- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- Categoria de DPA, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

Um dos diferenciais da PNSB é a atribuição da responsabilidade objetiva àquele que detém os direitos reais sobre o bem que suportará a construção de uma barragem, ou que a explora. A este ente responsável, que pode ser Pessoa Física ou Jurídica, governamental ou particular, a lei passa a chamar de empreendedor, que responde civil, administrativa e criminalmente pelas ocorrências com a barragem. Inova ainda, atribuindo idêntica responsabilidade e nomeação legal àquele que explorar a barragem, para uso particular ou em detrimento da coletividade, mesmo que não seja o proprietário (SILVA; FAIS; FREIRIA, 2020).

O Relatório de Segurança de Barragens (RSB), disponibilizado anualmente é um documento elaborado pela ANA com o objetivo de apresentar à sociedade um panorama da evolução da gestão da segurança das barragens brasileiras e da imple-

mentação da PNSB e apontar diretrizes para a atuação de fiscalizadores e empreendedores de barragem e da Defesa Civil, além de destacar os principais acontecimentos no ano de referência (ANA, 2021b).

A PNSB demanda que as informações sobre os instrumentos de prevenção contra incidentes e acidentes decorrentes de problemas técnicos, administrativos e operacionais inerentes às barragens, devem ser organizadas e disponibilizadas para a comunidade técnica e população em geral, com base no princípio do diálogo e transparência. Essa exigência é atendida pelo SNISB.

A ANA, através da Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 2020b), visando ferramentar a segurança de barragens, estabeleceu do SNISB, e colaborou na articulação dos órgãos fiscalizadores e na elaboração dos RSB, visando um planejamento voltado para a segurança destas estruturas (SILVA; FAIS; FREIRIA, 2020).

O SNISB é um registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo o território nacional. As informações e dados são obtidos e produzidos de forma descentralizada, sendo o acesso aos dados e informações garantidos à sociedade. Este sistema é organizado, implantado e gerido pela ANA (ANA, 2021b).

A PNSB estabelece, em seu art. 7º, que as barragens sejam classificadas por:

- DPA, em alto, médio ou baixo, em função do potencial de perdas de vidas humanas e impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes de eventual ruptura da barragem;
- CRI, em alto, médio ou baixo, em função de características técnicas, estado de conservação do empreendimento e atendimento ao plano de segurança da barragem e
- Volume do reservatório, sendo a graduação do volume do reservatório influenciada pelo DPA.

O índice CRI alto significa maior número de ameaças à segurança da barragem e, por sua vez, o DPA alto indica que, em caso de um acidente, as consequências seriam graves. Estes e os demais critérios do sistema de classificação de barragens foram estabelecidos pelo CNRH, por meio da Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012, estando hoje em discussão para ajustes e melhorias.

Após o rompimento da Barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho – MG, foram propostas alterações na PNSB e em outubro de 2020 foi aprovada a Lei n. 14.066 que altera a Lei n. 12.334/2010. Dentre as mudanças importantes ressalta-se aquelas relacionadas ao Plano de Ação de Emergências (PAE), além da inserção de um capítulo

específico para as infrações e sanções a que estarão sujeitas os proprietários cujas barragens sofrerem rompimento, provocados danos ao meio e à população do entorno (SILVA; FAIS; FREIRIA, 2020).

A Lei nº 14.066 incrementou exigências aos empreendedores de barragens, sobretudo os de mineração, impondo um período de adaptação tanto dos fiscalizadores como dos empreendedores. Por exemplo, a tarefa de regulamentação da Lei nº 12.334/2010, que já havia sido realizada por praticamente todos os fiscalizadores, terá de ser refeita, para que os regulamentos se adaptem à nova redação da Lei (ANA, 2021b).

São documentos mínimos exigidos pela Lei 14066/20, a PNSB:

- Relatórios das Inspeções de Segurança Regular e Especial, que devem ser contempladas nas atualizações do Plano de Segurança da Barragem (PSB);
- Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RPSB), com o objetivo de verificar o estado geral de segurança da barragem;
- Plano de Ação de Emergência (PAE) acessível à população, para todas as barragens classificadas como de médio e alto dano potencial associado; ou alto risco, a critério do órgão fiscalizador; ou, ainda destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração.

Dentre os conteúdos mínimos exigidos para um PSB, está a identificação e avaliação dos riscos, com definição das hipóteses e dos cenários possíveis de acidente ou desastre (BRASIL, 2020a). Este conteúdo só é possível de se obter através de uma correta e completa quantificação dos riscos, de um plano de gerenciamento do risco e do auxílio de análises mais complexas de estabilidade das barragens.

A PNSB preconiza, através do item X do art. 8º, que este tipo de análise de riscos complexa seja efetivada para todas as barragens que se enquadram na Lei, através do PSB. Sendo, inclusive alvo de seus principais objetivos o fomento à cultura de segurança de barragens e, também, a gestão de riscos. Com base nisso, pode-se afirmar que os métodos convencionais de análise de estabilidade para barragens, com base em fatores de segurança numéricos e pontuais, não têm mais espaço na engenharia de barragens. Portanto, com o desenvolvimento técnico e tecnológico disponível é possível realizar análises condizentes com o grau de complexidade e de responsabilidade deste tipo de empreendimento. Ou seja, é necessário que o mais alto nível de detalhamento e precisão seja atingido. Para isto, as técnicas de análise com abordagem probabilística, que consideram as variações prováveis dos parâmetros de projeto e/ou dos observados, devem ser amplamente utilizadas pelos engenheiros de

barragens na elaboração dos PSB e das declarações de condição de estabilidade de barragens.

A Lei é abrangente e está bem estruturada, porém, muitas vezes, os órgãos responsáveis pela fiscalização têm que lidar com falta de recursos materiais e humanos para que as inspeções sejam realizadas adequadamente, além de outras questões. (SILVA; FAIS; FREIRIA, 2020)

O processo legislativo que permeia a segurança de barragens pode parecer bastante claro e objetivo para operadores do direito, porém a legislação destina-se a construtores, gestores e empreendedores que deverão executar e fiscalizar cada atividade ligada à exploração das barragens, sempre atentos ao impacto de curto a longo prazo nas sociedades e biomas que circundam o empreendimento. Isso é um processo contínuo que demanda aperfeiçoamento e unidade de decisão, até que se atinja um patamar de segurança ambiental, técnica e jurídica (SILVA; FAIS; FREIRIA, 2020).

Como pode-se observar em 2020, a PNSB é uma lei que será revisada sempre que necessário, mas sempre visando a melhoria dos níveis de segurança das barragens. Para a próxima década, (ANA, 2021b) identifica como alguns dos principais desafios no avanço da cultura da segurança de barragens: ampliar o universo de barragens cadastradas e classificadas no SNISB; e melhorar a comunicação da temática com a sociedade e com os diversos atores envolvidos.

Segundo ANA (2021b), em 2020, haviam 1.174 barragens classificadas simultaneamente como CRI e DPA altos. 20% das barragens nessa situação não possuíam empreendedor identificado no SNISB. Das 5.347 barragens submetidas à PNSB, cerca de 22% possuíam PSB e 1,8% foram objeto de ao menos uma inspeção de segurança no período de 2019 a 2021. Para as 3.679 barragens com DPA Alto que deveriam possuir o PAE, em apenas 27% esse documento se encontrava concluído. Verifica-se que 17% das barragens submetidas à PNSB possuíam RPSB. A maioria dos PSBs e seus componentes elaborados referiam-se às barragens destinadas à geração de energia hidrelétrica e contenção de rejeitos de mineração. Além disso, 61% das barragens submetidas à PNSB foram construídas em terra.

Segundo MENESCAL (2009), atuam no Brasil diversas organizações não-governamentais que trabalham no sentido de congregar profissionais e desenvolver e estimular estudos e pesquisas para a melhoria das técnicas e procedimentos relacionados com a gestão da segurança de barragens. Como exemplo, pode-se citar:

- ABGE: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental;
- ABMS: Associação Brasileira de Mecânicas dos Solos e Engenharia Geotécnica;

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ABRAGE: Associação Brasileira de Empresas Geradoras de Energia Elétrica;
- ABRH: Associação Brasileira de Recursos Hídricos;
- CBDB: Comitê Brasileiro de Barragens;
- Fundação COGE;
- IBRACON: Instituto Brasileiro de Concreto;
- IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração.

De acordo com o art. 2º da Resolução nº 144/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), considera-se que acidente é o comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrollável do conteúdo de um reservatório, ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa. Já um incidente se refere a qualquer ocorrência que afete o comportamento da barragem ou estrutura anexa que, se não for controlada, pode causar um acidente.

De acordo com o RSB de 2020 (ANA, 2021b), durante este ano foram relatados 44 acidentes e 95 incidentes em 16 estados, sobretudo nas regiões sudeste e centro-oeste do país. A maioria desses eventos ocorreram devido a chuvas intensas nos meses de janeiro a março, ocasionando o galgamento (transbordamento) das barragens, alguns deles “em cascata”.

ANA (2021b) destaca, ainda, que os eventos de rompimentos e transbordamentos em barragens em cascata, se deram em:

- 5 pequenos barramentos no município de Quiterianópolis (CE), que causaram o rompimento sequencial do açude Pontal;
- 3 barragens no município de Catalão (GO), bem como o transbordamento de outras 5;
- 2 barragens no município de Hidrolândia (GO);
- 2 barragens no município de Aricanduva (MG) e
- Galgamento de 15 barragens em Florestal (MG).

A Figura 2 mostra a evolução dos registros de acidentes e incidentes reportados pelos Relatórios de Segurança de Barragens de 2011 a 2020.

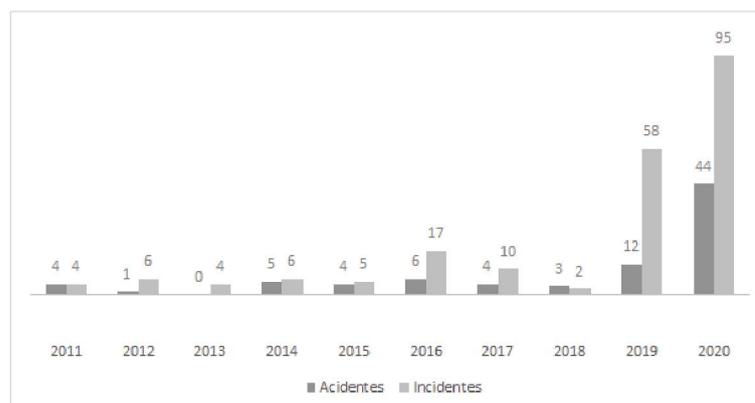


FIGURA 2 – Evolução do número de acidentes e incidentes nos Relatórios de Segurança de Barragens. Fonte: ANA (2021b)

Os quantitativos observados são muito superiores aos verificados em todos os anos anteriores, inclusive ao ano de 2019, onde já havia ocorrido aumento significativo. Esse aumento foi ocasionado por eventos de chuvas intensas verificados no primeiro trimestre de 2020 nas regiões sudeste e centro-oeste do país, sendo janeiro o mês com mais eventos. Não foram reportadas vítimas fatais.

Em empreendimentos como barragens, uma série de agentes, como os dirigentes, gestores públicos, agências reguladoras, construtores, projetistas, consultores, técnicos, dentre outros, são responsáveis pela tomada de decisões que se propagam em toda a organização do empreendimento, com reflexo na sua qualidade final e sua segurança. São entes responsáveis por uma série de fatores que incidem de forma latente, na segurança do empreendimento, tendo como agentes causais: a falta de treinamento (ou qualificação), projeto deficiente, falha na supervisão, problemas de manutenção, erros em procedimentos, automação e instrumentação, etc (MEDEIROS; PINTO, 2014).

A maior parte das barragens de usos múltiplos cadastradas no SNISB não possui informações suficientes para avaliação quanto ao enquadramento na PNSB, tampouco para avaliação de suas condições de segurança. Das barragens de usos múltiplos submetidas à PNSB, apenas 6,6% possuem PSB, 6,4% possuem PAE, e 6,3% foram submetidas a inspeções regulares por seus empreendedores (ANA, 2021b).

Atualmente existem 122 barragens indicadas, pelos seus fiscalizadores, em 23 estados, com algum comprometimento estrutural importante. Os principais motivos de preocupação citados pelos fiscalizadores estão relacionados ao estado de conservação, indicado em 52% dos casos (63 barragens), bem como a classificação quanto ao DPA e à CRI, indicados em 34% dos casos (42 barragens). Outros motivos citados são características de projeto, principalmente dos órgãos estravadores (8), barragens “órfãs” - aquelas que não tem identificação do responsável por sua operação e manutenção

(empreendedor) - (5) e ausência de documentos, como por exemplo a Declaração de Estabilidade da Barragem ou outorga (4). Muitas vezes as estruturas possuem mais de uma dessas preocupações (ANA, 2021b).

2.3 LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL

Em um grande número de países, a classificação de segurança de barragens e as medidas necessárias de proteção de segurança pública são definidas por legislações na forma de leis, regulamentos e diretrizes (ADAMO et al., 2020). Elas abrangem, em sua maioria, apenas grandes barragens.

A maioria dos países adotam critérios para classificação de segurança de barragens com base nos parâmetros de altura ou tamanho dos reservatórios e/ou os riscos potenciais que causam perda de vidas e perdas econômicas (ADAMO et al., 2020). A Tabela 1 apresenta os principais sistemas de classificação de grandes barragens pelo mundo.

TABELA 1 – Critérios de regulação de barragens em alguns países

País	Critérios para aplicar a legislação (Altura (A) e Volume (V))
África do Sul	$A > 5 \text{ m}$ e $(V) > 50.000 \text{ m}^3$
Alemanha	$A > 5 \text{ m}$ ou $V > 100.000 \text{ m}^3$
Austrália	$A > 10 \text{ m}$ e $V > 20.000 \text{ m}^3$ ou $A > 5 \text{ m}$ e $V > 50.000 \text{ m}^3$
Áustria	$A > 15 \text{ m}$ ou $V > 500.000 \text{ m}^3$
Canadá	$A > 7,6 \text{ m}$ e $V > 61.670 \text{ m}^3$
Eslovênia	$A > 15 \text{ m}$ ou $A > 10 \text{ m}$ e $V > 1.000.000 \text{ m}^3$
Espanha	$A > 15 \text{ m}$ ou $A > 10 \text{ m}$ e $V > 1.000.000 \text{ m}^3$
Estados Unidos	$A > 7,6 \text{ m}$ e $V > 18.500 \text{ m}^3$ ou $A > 6 \text{ m}$ e $V > 64.000 \text{ m}^3$
Finlândia	$A > 3 \text{ m}$
Inglaterra	$V > 25.000 \text{ m}^3$
Itália	$A > 15 \text{ m}$ ou $V > 1.000.000 \text{ m}^3$
Noruega	$A > 4 \text{ m}$ ou $V > 500.000 \text{ m}^3$
Portugal	$A > 15 \text{ m}$ ou $V > 100.000 \text{ m}^3$
Suécia	$A > 15$ ou $V > 500.000 \text{ m}^3$
Suíça	$A > 10 \text{ m}$ ou $A > 5 \text{ m}$ e $V > 50.000 \text{ m}^3$
Zimbábue	$A > 8 \text{ m}$
Brasil	$A > 15 \text{ m}$ ou $V > 3.000.000 \text{ m}^3$

Fonte: Persechini et al. (2015)

É evidente que, para todas as classificações, barragens de dimensões semelhantes, com perfis de perigo semelhantes e apresentando riscos semelhantes podem ser classificadas em duas categorias diferentes de risco. Isso representa um problema, pois os custos envolvidos nas documentações e atestados requeridos por lei e normativas mudam drasticamente com uma mudança na categoria (NIPFP, 2021).

Gradualmente, está havendo uma tendência de migração entre uma metodologia padrão básica de classificação de barragens para uma metodologia baseada no risco informado. A abordagem baseada no risco é hoje uma prática padrão ou em vias de adoção na Austrália (por exemplo, New South Wales), no Canadá (Ontário), no Reino Unido e em alguns reguladores/empreendedores federais nos Estados Unidos, como o *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), o *U.S. Bureau of Reclamation* (USBR) e a *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC). Outros países, como a França, Portugal e Espanha, já estão examinando essa abordagem para classificar suas barragens com base no risco e priorizar o financiamento na tomada de medidas para a redução de riscos (PERSECHINI et al., 2015).

Todos os países têm em vista a segurança pública e a redução dos riscos que as barragens representam para o público (DEC, 1989; PROGRAM", 1993). Por isso, para a construção de barragens, seu monitoramento e sua avaliação de segurança, as diretrizes seguidas são principalmente os boletins da *International Commission on Large Dams* (ICOLD). Os boletins são elaborados em comitês internacionais e representam, pelo menos em parte, o que há de mais atual tecnicamente (ZENZ; OBERNHUBER; CZERNY, 2012).

2.3.1 *International Commission on Large Dams* (ICOLD)

Para o ICOLD, a classificação de grandes barragens tem como base as diretrizes do Comitê Francês de Barragens e Reservatórios (ICOLD, 2011). Estas diretrizes consideram dois parâmetros: (A), a altura máxima da barragem em metros e (V), o volume do reservatório em m^3 ; na definição de um índice numérico $A^2\sqrt{V}$ para classificar o DPA. A relação pode ser obtida usando escala semi-logarítmica. (V) no eixo X e (A) no eixo Y , conforme mostrado no gráfico dado na Figura 3. Este gráfico pode ser lido em conjunto com a Tabela 2 para obter a classificação de DPA para pequenas barragens, não superiores a 25 m de altura e com reservatório de volume não superior a 100 milhões de m^3 .

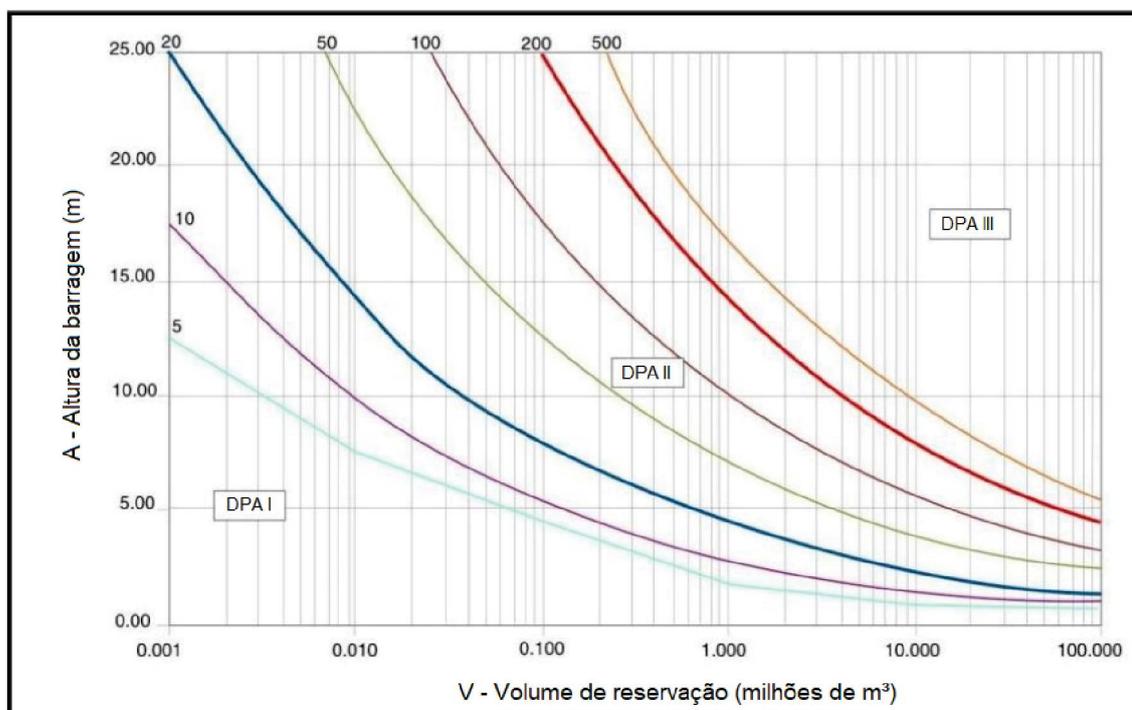


FIGURA 3 – Relação $A^2\sqrt{V}$ para pequenas barragens. Fonte: ICOLD (2011)

TABELA 2 – Classificação de Dano Potencial Associado (DPA)

Componente	Dano Potencial Associado (DPA)		
	Baixo (I)	Médio (II)	Alto (III)
$A^2\sqrt{V}$	$A^2\sqrt{V} < 20$	$20 < A^2\sqrt{V} < 200$	$A^2\sqrt{V} \geq 200$
Risco de perdas de vidas	~ 0	< 10	≥ 10
Risco econômico	Baixo	Moderado	Alto ou extremo
Risco ambiental	Baixo ou moderado	Alto	Extremo
Disrupção social	Baixo (área rural)	Regional	Nacional

Fonte: ICOLD (2011)

Assim, a diferenciação de pequenas barragens de grandes barragens segue os limites da Figura 4. Esta classificação está diretamente relacionada aos perigos apresentados por essas barragens (ADAMO et al., 2020).

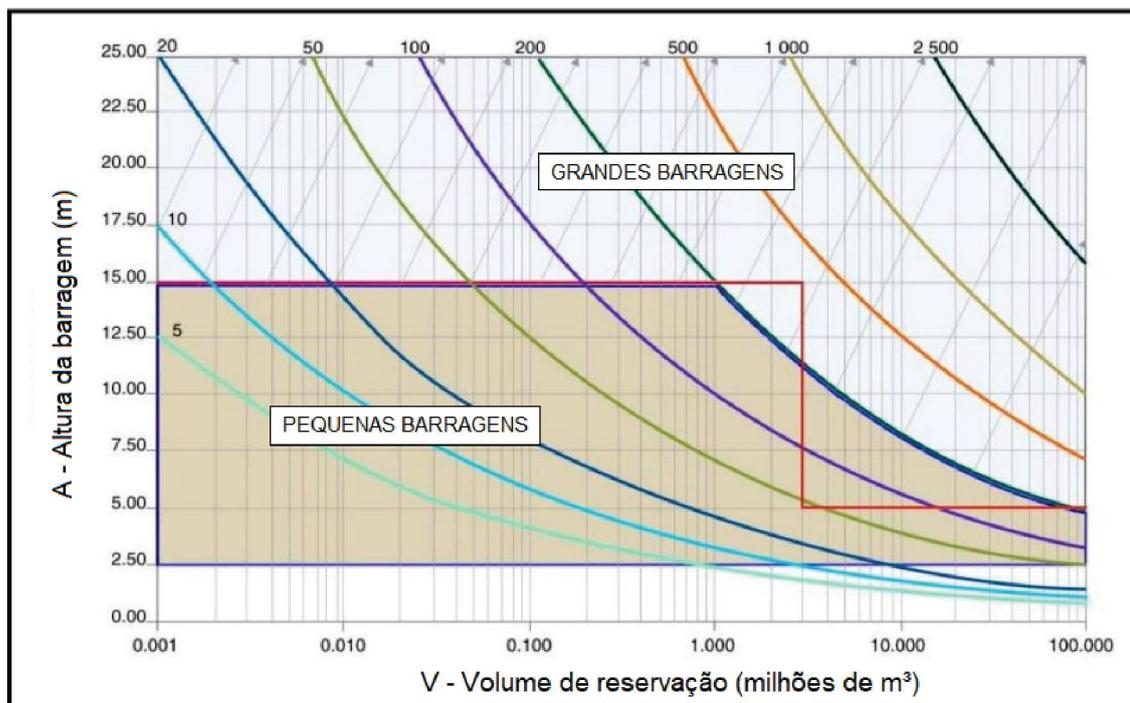


FIGURA 4 – Classificação de pequenas e grandes barragens. Fonte: ICOLD (2011)

2.3.2 França

Na França, a proteção de pessoas e bens é responsabilidade do Governo, que deve legislar (criar regulamentação) e fazer cumprir as normas por meio de órgãos administrativos (agência, departamento, escritório, etc.) para garantir a segurança e proteção das pessoas, bens e meio ambiente (ADAMO et al., 2021).

Segundo Adamo et al. (2021), três ministérios são responsáveis pelas barragens: O Ministério dos Transportes, para estruturas associadas a canais; o Ministério da Indústria, para hidrelétricas e barragens de rejeitos; e o Ministério do Meio Ambiente, para outras barragens.

Os novos regulamentos franceses exigem inspeções anuais das barragens. Reconhecendo que as tragédias de Malpasset e Vajont aconteceram durante o enchimento do reservatório, as regras francesas impõem requisitos de inspeção especialmente rígidos na fase inicial de represamento. Eles estabelecem e regulam a taxa de enchimento do reservatório, exigem leituras de instrumentação semanais e exigem inspeções em intervalos diários, semanais e mensais. A vigilância regular das áreas periféricas do reservatório está incluída. Um relatório sobre o desempenho da barragem e do reservatório deve estar pronto após 6 meses (ADAMO et al., 2021).

A legislação atual da França exige que:

- As questões de segurança sejam abordadas já na fase de projeto;

- Os requisitos para inspeções de barragens, revisões de segurança e controle variam com base no tamanho da barragem e do reservatório;
- Para cada nova barragem com altura superior a 20 m e/ou o tamanho do reservatório superior a $15.10^6 m^3$, um arquivo técnico deve ser submetido pelo proprietário às autoridades governamentais para aprovação e deve estar sujeito aos regulamentos de planejamento de emergência (MCGRATH, 2000).

Adamo et al. (2021) ainda ressalta que as inspeções, revisões de segurança e reparações de barragens antigas são normalmente supervisionadas por uma comissão técnica denominada “Comissão Permanente”, que é formada por membros dos ministérios anteriormente mencionados e atua como “Autoridade de Supervisão”.

2.3.3 Reino Unido

Adamo et al. (2021) também relata a condição legislativa do Reino Unido. Lá, o *Reservoirs Act* - Lei dos Reservatórios - de 1975 foi escrito como uma atualização das antigas regras que foram colocadas em vigor após as rupturas das barragens britânicas em Dolgarrog e Skelmorlie em 1925. A nova lei fornece autoridade para os reguladores intervirem quando um relatório do engenheiro de inspeção não obteve resposta adequada. Em tais casos, os reguladores têm poderes para efetuar as medidas corretivas necessárias e cobrar os custos ao proprietário. Os regulamentos britânicos também exigem certificados que especifiquem os limites do nível de operação do reservatório seguro.

Uma inspeção deve ser conduzida por um engenheiro civil qualificado independente no máximo dois anos após a emissão do “certificado de conclusão final” e sequencialmente em intervalos adequados. Deve-se considerar dois anos como o intervalo de tempo máximo entre os exames de campo (no local) e seis anos como intervalo de tempo máximo entre as avaliações. Além disso, o pessoal operacional faz exames periódicos dedicados principalmente à operação e manutenção (ADAMO et al., 2021; JANSEN, 1983).

A legislação atual é (ADAMO et al., 2021):

- Na Inglaterra e no País de Gales: Lei de Reservatórios, 1975;
- Na Escócia: Lei de Reservatórios da Escócia, 2011;
- Na Irlanda do Norte: Lei de Reservatórios da Irlanda do Norte, 2015.

Essas leis cobrem as análises de segurança de todos os reservatórios no Reino Unido com pelo menos 10.000 ou 25.000 m^3 de água, dependendo da localização

(atualmente o limite inferior de 10.000 m^3 só se aplica no País de Gales) (ADAMO et al., 2021).

De acordo com essas leis, existem "Painéis"(ou grupos) de engenheiros civis que são responsáveis por verificar a segurança desses reservatórios e suas barragens. Eles são chamados de "Engenheiros do Painel" e só podem pertencer aos Painéis se forem considerados profissionalmente qualificados e experientes em questões de segurança de reservatórios (ADAMO et al., 2021).

Outras informações relevantes são relatadas por Adamo et al. (2021): Cada reservatório deve ter sua segurança revisada a cada 10 anos, ou mais frequentemente, quando for necessário; os engenheiros do painel também se envolvem com a construção de novos reservatórios e reparos e alterações nos existentes.

2.3.4 Suíça

O conceito global de monitoramento e manutenção de estruturas suíças é definido pelo fluxograma ilustrado na Figura 5 a seguir (MÉAN et al., 2012).

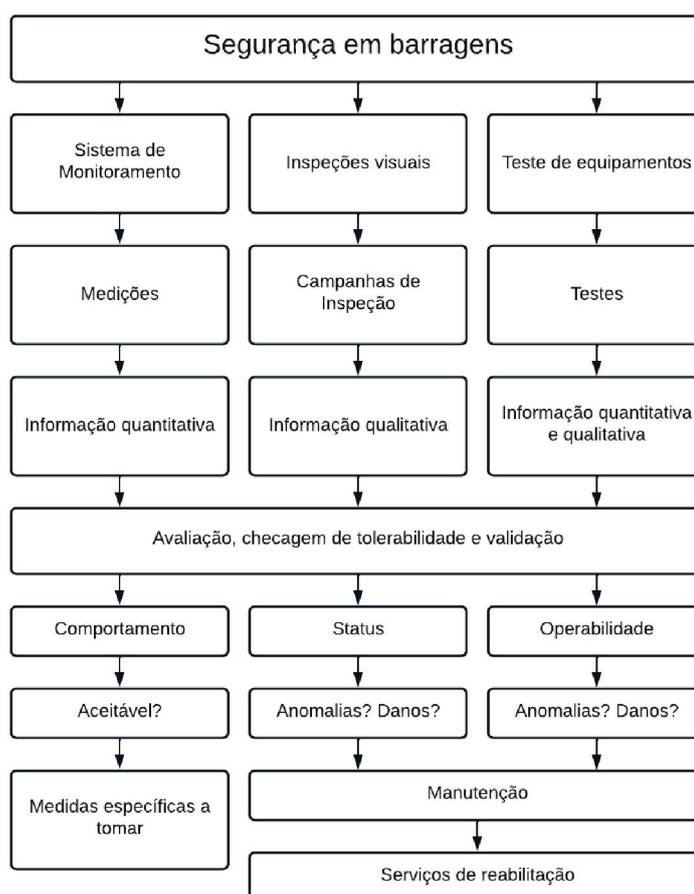


FIGURA 5 – Suíça: Conceito global de segurança e manutenção. Fonte: adaptado de Méan et al. (2012), *Swiss guidelines, Swiss Federal Office of Energy, Service of Dam Safety*

A organização da segurança de barragens na Suíça exige três níveis de competência diferentes (MÉAN et al., 2012):

- Nível 1: O operador da barragem procede a inspeção visual detalhada periódica, medições com os equipamentos e dispositivos de monitoramento, testa e verifica os equipamentos de monitoramento e segurança e realiza os trabalhos de manutenção;
- Nível 2: Um engenheiro experiente encomendado pelo proprietário da barragem analisa os resultados das medições de monitoramento e identifica as anomalias de comportamento da estrutura. Ele realiza uma inspeção anual da barragem (controle visual do estado e manutenção, controle da qualificação dos operadores da barragem) e elabora um relatório anual;
- Nível 3: Dois especialistas independentes confirmados, um engenheiro civil e um geólogo, aprovados pelas Autoridades, avaliam a cada cinco anos a segurança da barragem. O engenheiro faz uma inspeção minuciosa do estado da estrutura, analisa o comportamento da barragem e suas fundações. Em caso de anomalia, aconselha sobre as medidas a tomar e sobre a operacionalidade. Ele verifica o estado e a manutenção da estrutura e assiste aos testes das tomadas de segurança (comportas e descarregadores). Elaboro um relatório às Autoridades, no qual expõe as suas observações e recomendações. O geólogo avalia o comportamento das ombreiras e fundação da barragem e das margens do reservatório.

Ademais, a legislação suíça baseia-se na responsabilidade principal do proprietário da barragem em cumprir as metas de segurança. A organização administrativa do proprietário da barragem desempenha o mais importante papel. Neste país, a gestão de uma infraestrutura como uma barragem implica a existência de três atores (MÉAN et al., 2012):

- O "Proprietário", uma pessoa jurídica com direitos de propriedade sobre a barragem, beneficiário dos direitos da água e com obrigações para com os usuários finais da água;
- O "Gestor de Ativos", entidade técnica e administrativa encarregada de manter o desempenho desejado de longo prazo da barragem;
- O "Operador", entidade operacional responsável pelas atividades de operação e manutenção da barragem.

Onde as principais atividades de um gestor de ativos são:

- Definição de um padrão de manutenção (*Standard of Serviceability* - SoS) que é o desempenho normal do ativo atendendo aos requisitos do proprietário;
- Avaliação do estado atual da infraestrutura;
- Identificação do grau mínimo de condição aceitável da infraestrutura (grau mínimo de utilização);
- Gestão das medidas de emergência a serem tomadas se o grau de condição mínima aceitável for atingido;
- Identificação das ações de médio / longo prazo necessárias para sustentar o SoS;
- Estabelecimento de um perfil de custo prospectivo para operar e manter a infraestrutura em condições de sustentar o SoS.

O gerente de ativos é, portanto, um profissional especializado em tarefas complexas que requerem conhecimentos técnicos, jurídicos e financeiros. Em geral, recursos financeiros e humanos suficientes estão disponíveis para a organização gerencial eficiente de grandes barragens. Infelizmente, geralmente não é o caso de barragens menores, onde os recursos permanecem limitados. Nesse caso, a Gestão de Ativos pode ser realizada de forma insatisfatória (MÉAN et al., 2012).

Méan et al. (2012) ainda relata que, na Suíça, cada proprietário de barragem subcontrata sua Gestão de Ativos para uma Organização de Gestão de Ativos centralizada por meio de um Acordo de Nível de Serviço.

2.3.5 Áustria

Na Áustria, as regras e diretrizes relevantes para essas obras foram emitidas pela *Austrian Reservoir Commission* (ZENZ; OBERNHUBER; CZERNY, 2012):

- Diretriz para a avaliação de segurança de barragens de aterro;
- Guia para análise sísmica de barragens;
- Diretriz para a verificação da segurança de enchentes para barragens.

O sistema austríaco para garantir a segurança de barragens consiste em três níveis (MELBINGER, 1991) (Figura 6):

1. as empresas operacionais;
2. vigilância de barragens pelas províncias federais;
3. fiscalização de barragens pela federação.

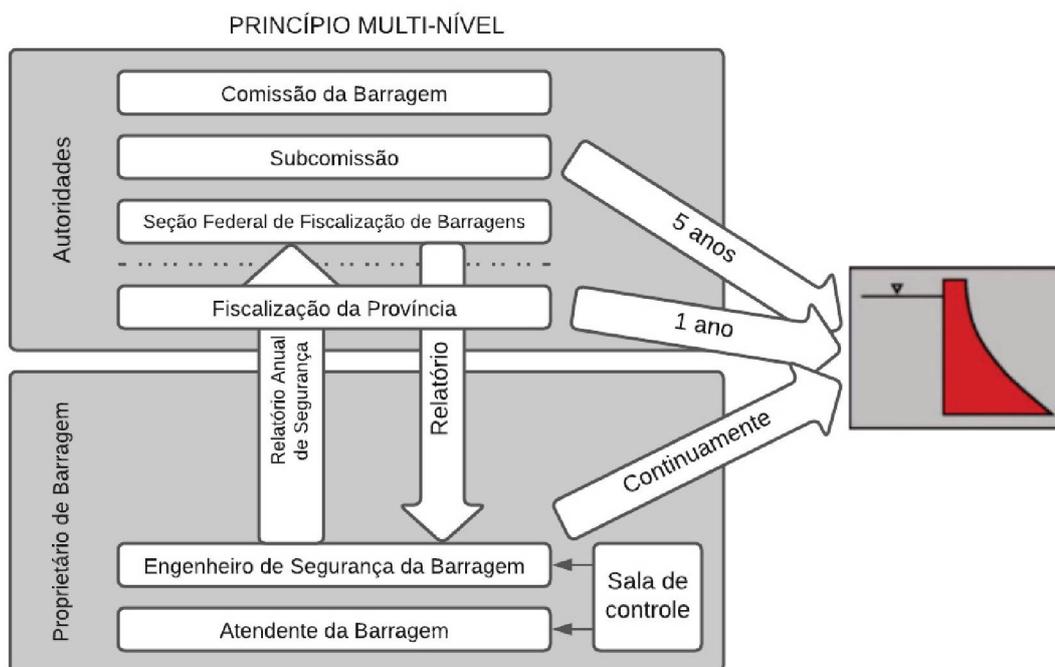


FIGURA 6 – Níveis do sistema de segurança de barragens da Áustria. Fonte: Zenz, Oberhuber e Czerny (2012)

Na Áustria, o empreendedor deve nomear um engenheiro de segurança de barragens que seja responsável pela barragem, sendo responsável por todos os aspectos técnicos e organizacionais para garantir a segurança da barragem (ZENZ; OBERNHUBER; CZERNY, 2012).

Pelo menos uma vez por ano, este engenheiro de segurança de barragens deve inspecionar as instalações e redigir um relatório anual. Este relatório, em particular, deve documentar o comportamento da instalação, possíveis medidas e observações específicas. O relatório também deve conter uma avaliação de segurança e as condições para a operação futura da barragem. Além disso, um geólogo especialmente qualificado deve inspecionar a instalação e avaliar sua condição e comportamento. Deve-se dar atenção principalmente ao reservatório, às encostas do reservatório, à fundação da barragem, às áreas de jusante da barragem e aos vários túneis, e também devem ser abordadas as questões relativas à estabilidade dos inclinômetros e da medição geodésica. O relatório do geólogo faz parte do relatório anual. De importância primordial é que a avaliação do comportamento da barragem pelo engenheiro de segurança de barragens contenha uma visão geral da barragem e sua fundação, uma vez que essas duas partes formam uma unidade e não podem ser consideradas separadas (ZENZ; OBERNHUBER; CZERNY, 2012).

Zenz, Oberhuber e Czerny (2012) relata que, para o segundo nível de vigi-

lância, são realizadas inspeções pelo subcomitê da Comissão Austríaca de Barragens que acontecem a cada cinco anos. No terceiro nível de vigilância, o supervisor federal da barragem inspeciona as instalações no local a cada cinco anos.

Para fornecer o conhecimento especial necessário, o Comitê Nacional Austríaco de Barragens oferece cursos especialmente elaborados para barragens, a saber (ZENZ; OBERNHUBER; CZERNY, 2012):

- Treinamentos para engenheiros de segurança de barragens com palestras sobre temas como barragens de concreto, barragens de aterro, filosofia de segurança, monitoramento, avaliação de segurança, fundamentos legais e medidas emergenciais;
- Treinamentos para assistentes de barragens constituídos por um curso básico (parte teórica) e um curso prático;
- Curso para equipe operacional (pessoal do centro de controle);
- Treinamentos para engenheiros de segurança de barragens para instalações de armazenamento menores.

Por último, mas não menos importante, foi reconhecido na Áustria, anos atrás, que transferir conhecimento sobre barragens para a próxima geração é uma tarefa importante (ZENZ; OBERNHUBER; CZERNY, 2012).

2.3.6 Espanha

O atual contexto de regulamentação de segurança de barragens na Espanha inclui principalmente duas normativas (CASTILLO-RODRIGUEZ; MORALES-TORRES; ESCUDER-BUENO, 2013):

- a "Instrução para o Projeto, Construção e Operação de Grandes Barragens" (*Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas*) publicado em 1967, e,
- o "Regulamento Técnico de Segurança de Barragens e Reservatórios" (*Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses*) publicado em 1996.

O Regulamento Técnico de Segurança de Barragens e Reservatórios foi aprovado um ano após a adoção da Diretiva Básica do Planejamento da Proteção Civil contra Riscos de Inundações (1995). Até este ponto, a gestão da segurança de barragens tinha se concentrado quase exclusivamente na infraestrutura; no entanto, a Diretiva de Proteção Civil de 1995 incorporou a consideração de ambos os componentes do risco de inundação (probabilidade e consequências). Portanto, a Diretiva de

Proteção Civil de 1995 representa um marco no quadro regulamentar de segurança de barragens, exigindo a implementação de Planos de Ação de Emergência de Barragens (*Dam Emergency Action Plans* - DEAP) para aqueles que foram previamente classificados como Categoria A ou B com base em seu risco potencial (considerando a possibilidade de consequências potenciais adversas em caso de rompimento ou liberação descontrolada da barragem). Esta classificação foi definida pelo Regulamento Técnico de 1996 (CASTILLO-RODRIGUEZ; MORALES-TORRES; ESCUDER-BUENO, 2013).

A atualização de 2008 do Regulamento Espanhol de Águas Públicas adicionou um capítulo que trata da segurança de barragens, incluindo a necessidade de considerar a gestão de risco como um aspecto chave para a segurança de barragens, cujo objetivo principal é unificar todos os critérios de segurança de barragens para ser aplicado a todas as barragens. Consequentemente, três Normas Técnicas foram publicadas em 2011, que substituem tanto a Instrução de 1967 quanto o Regulamento Técnico de 1996 (CASTILLO-RODRIGUEZ; MORALES-TORRES; ESCUDER-BUENO, 2013).

Segundo Castillo-Rodríguez, Morales-Torres e Escuder-Bueno (2013), além dos documentos regulamentares mencionados, um conjunto de Diretrizes Técnicas para Segurança de Barragens foi publicado pelo Comitê Nacional Espanhol de Grandes Barragens (*Comité Nacional Español de Grandes Presas* - SPANCOLD). Essas diretrizes incluem o estado da arte em vários aspectos de segurança de barragens e fornecem recomendações para o cumprimento dos padrões atuais.

Publicado em 2012, o Guia Técnico de Segurança de Barragens, Operação de Barragens e Reservatórios, intitulado "Análise de Risco aplicada à Gestão de Segurança de Barragens" é um marco recente no contexto espanhol e descreve o processo geral de implementação da Análise de Risco para informar a decisão, a elaboração e a priorização de medidas de redução de risco para a gestão da segurança de barragens. Esta diretriz pode ser considerada uma contribuição significativa para a segurança integrada de barragens informada sobre gestão de riscos (CASTILLO-RODRIGUEZ; MORALES-TORRES; ESCUDER-BUENO, 2013).

Na Espanha uma série de condições práticas, pautadas na análise de riscos, contribuíram para aplicação da regulamentação sobre segurança de barragens, incluindo (CASTILLO-RODRIGUEZ; MORALES-TORRES; ESCUDER-BUENO, 2013):

- A necessidade de análise do risco existente devido à inclusão da responsabilidade pública dos proprietários de barragens na regulamentação, aliada à demanda social por maiores níveis de segurança e pela justificativa do uso de recursos públicos e privados.
- A necessidade de priorizar ações corretivas para redução de riscos.

- A necessidade de otimizar a gestão dos recursos hídricos, bem como de aumentar a capacidade de regulação da barragem.
- A dificuldade de construção de novas barragens, principalmente por questões socioambientais, que previsivelmente tornarão necessário o prolongamento da fase de operação da barragem.
- O envelhecimento das barragens existentes (a maioria delas com mais de 30 anos na Espanha).

Castillo-Rodriguez, Morales-Torres e Escuder-Bueno (2013) enfatizam que tudo isso representa os primeiros passos de uma jornada para proprietários de barragens, visando alcançar uma governança de segurança de barragens eficiente, transparente e robusta. Nos próximos anos, os proprietários de barragens enfrentarão desafios impulsionados por uma mudança na sociedade, no meio ambiente e no contexto regulatório. O novo paradigma de risco fornece aos proprietários de barragens informações essenciais para o estabelecimento de estratégias de gestão da segurança de barragens para cenários presentes e futuros. Além disso, a revisão da legislação nacional passa por uma revisão, sendo que, em um futuro próximo, novas diretrizes possam ser estabelecidas.

2.3.7 Portugal

A principal lei portuguesa em segurança de barragens é o Decreto-Lei 11 de 1990. A legislação engloba também um glossário de termos e especifica vários requisitos em termos de projeto e planos de monitoramento durante o tempo de vida do empreendimento, assim como aspectos de segurança a serem considerados durante a fase de construção, primeiro enchimento, exploração, abandono e demolição (ZUFFO; GENOVEZ, 2009).

Em Portugal, houve um grande número de barragens construídas na década de 90, portanto a legislação dá uma ênfase especial às barragens novas. o Regulamento prevê a necessidade da elaboração do chamado “livro técnico da obra”, onde dados do projeto de execução, um resumo dos fatos ambientais com maior relevância para a obra, relatórios de inspeções de segurança subsequentes e alterações do projeto inicial e/ou da obra após a construção, deverão estar devidamente registrados. Este Livro será peça fundamental à medida que as barragens forem envelhecendo e as inspeções de segurança identificarem quaisquer anomalias e, assim, se fizer necessárias análises mais detalhadas. É fato que se estes registros existissem para as barragens mais antigas, as avaliações de segurança das obras seriam bem mais precisas e confiáveis (ZUFFO; GENOVEZ, 2009).

2.3.8 EUA

A Lei de Inspeção de Barragens, Lei Pública do Congresso dos EUA 92-367, sancionada em 8 de agosto de 1972, autorizou o Secretário do Exército, agindo por meio do Chefe de Engenheiros, a realizar um programa nacional de inspeção de barragens. Sob esta autoridade, o Corpo de Engenheiros (USACE), pôde (ADAMO et al., 2021):

- Compilar um inventário de barragens federais e não federais;
- Conduzir uma pesquisa das capacidades, práticas e regulamentos de cada agência estadual e federal em relação ao projeto, construção, operação e manutenção de barragens;
- Desenvolver diretrizes para inspeções de segurança e avaliações de barragens; e
- Formular recomendações para um programa nacional abrangente de segurança de barragens.

Nos EUA, a classificação de barragens adotada e utilizada pela *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) segue dois critérios:

- Perda de vidas;
- Perdas econômicas, ambientais e de salvamento.

As descobertas de um programa de inspeções, estabelecido entre 1978 e 1981, foram responsáveis por estabelecer programas de segurança de barragens na maioria dos estados e, em última instância, pela criação do Programa Nacional de Segurança de Barragens (OFFICIALS, 2020).

Pelo mesmo motivo, as inspeções de barragens e o número de *Emergency Action Plans* (EAP) para barragens de alto potencial de risco aumentaram, e melhores ferramentas e orientações para a operação e manutenção de barragens foram desenvolvidas (ADAMO et al., 2021).

A Lei de Segurança de Barragens de 2006 exigiu que a FEMA apresentasse um relatório bienal sobre o Programa Nacional de Segurança de Barragens ao Congresso. A implementação das “Diretrizes Federais para Segurança de Barragens (FEMA, 2004)” também ocorreu neste contexto (AGENCY, 2014).

2.3.9 Canadá

O Canadá não tem uma agência reguladora federal ou programa geral para orientar o desenvolvimento de requisitos para o gerenciamento seguro de barragens. O

Governo Federal, no entanto, tem requisitos regulamentares sobre alguns aspectos, como aprovação de barragens a serem construídas em rios navegáveis, barragens localizadas em rios de fronteiras com os EUA e barragens construídas e operadas pela indústria nuclear canadense (ADAMO et al., 2021).

Adamo et al. (2021) relata que as jurisdições provinciais e territoriais geralmente têm sua própria estrutura regulatória e diretrizes para informar os proprietários e operadores de barragens sobre as funções e responsabilidades, requisitos regulatórios, processos e procedimentos; bem como metodologias para garantia de conformidade. Desta forma são imprescindíveis as ações da *Canadian Dam Association* (CDA). Ela é uma organização sem fins lucrativos formada na década de 1980, que fornece orientação a proprietários de barragens, operadores, consultores, fornecedores e agências governamentais sobre questões de segurança de barragens no Canadá.

Segundo Adamo et al. (2021), as diretrizes e outras orientações desenvolvidas pelo CDA podem fornecer aos reguladores uma base para avaliar a segurança das barragens em suas respectivas jurisdições. Com base nelas, as ações e regulamentos de segurança de barragens podem lidar com a vigilância do local de barragens, suas inspeções formais e realização de testes de performance; atribuindo ao proprietário a responsabilidade de avaliar as condições da barragem durante a operação da barragem ou a alteração, melhoria ou substituição da barragem.

A revisão de segurança de qualquer barragem, cuja responsabilidade é do proprietário, deve ser realizada de acordo com a classificação de risco da barragem (alto, muito alto ou extremo). O proprietário deve garantir que um profissional de engenharia com qualificações e experiência em análise de segurança de barragens realize essa revisão de acordo com os requisitos do controlador ou gerente de água (GOVERNMENT, 2016, 1998).

2.3.10 Austrália

Em 1978, a Austrália lançou o Decreto de Segurança de Barragens, porém em dezembro de 2000 lançou, também, o Código de Segurança em Barragens, que é uma complementação do primeiro conjunto de Lei. Esta legislação prevê que todo barramento deve ser operado e mantido de acordo com as diretrizes da *Australian National Committee on Large Dams* (ANCOLD) e da *NSW Dam Safety Committee Technical Guidelines* (ZUFFO; GENOVEZ, 2009).

Na Tabela 3, é fornecido um resumo das diretrizes adotadas pelo ANCOLD para a classificação dos perigos potenciais de barragens. Essas diretrizes introduzem o termo População em Risco (PeR) que significa toda a população na planície de inundação a jusante, que está sujeita a riscos de rompimento de barragens (ANCOLD, 2003a,b).

TABELA 3 – Categorias de risco de barragens de acordo com ANCOLD

População em risco	Severidade do dano e das perdas			
	Aceitável	Mínimo	Médio	Máximo
0	Muito baixo	Muito baixo	Baixo	Significante
1-100	Baixo ^{1,4}	Baixo ^{4,5}	Significante ⁵	Alto C ⁶
11-100	1	Significante ^{2,5}	Alto C ⁶	Alto B ⁶
101-1000	1	2	Alto A ⁶	Alto A ⁶
>1000	1	2	3	Extremo ⁶

Fonte: ANCOLD (2003a,b)

¹Com um PeR de 5 ou mais pessoas, é improvável que a gravidade dos danos e perdas seja: Insignificante.

²Danos e perdas “menores” seriam improváveis quando o PeR exceder 10.

³Danos e perdas “médios” seriam improváveis quando o PeR exceder 1000.

⁴A mudança para significativa onde há o potencial de uma vida sendo perdida é reconhecida.

⁵Muda-se para Alto onde existe a possibilidade de uma ou mais vidas serem perdidas.

⁶Consulte as seções 2.7 e 1.6 das Diretrizes da ANCOLD (ANCOLD, 2003b) sobre as consequências da Ruptura de Barragens para obter uma explicação da faixa de Categorias de Alto Risco.

2.3.11 Índia

A Índia é o terceiro país no mundo que mais tem barragens, tem 5334 grandes barragens. Os regulamentos de segurança de barragens existentes são parte das notificações de Avaliação de Impacto Ambiental (*Environmental Impact Assessment - EIA*) emitidas sob a Lei de Proteção Ambiental de 1986 (NIPFP, 2021).

A nível nacional, a Comissão Central de Águas (*Central Water Commission - CWC*) fornece conhecimentos técnicos e orientação sobre todos os assuntos relacionados com barragens. O CWC emitiu diretrizes para:

- Procedimentos de segurança de barragens;
- Inspeção de segurança de barragens;
- Desenvolvimento e implementação de plano de ação de emergência (*Emergency Action Plan - EAP*) para barragens;
- Modelo de livro de dados padronizado, de lista de verificação de amostras e de formulário para inspeção periódica de barragens.

Essas diretrizes não são juridicamente vinculativas para todas as barragens. Eles são aplicáveis apenas a projetos que requerem autorização ambiental do Ministério do Meio Ambiente e Florestas (*Ministry of Environmental and Forests - MoEF*), do Governo da Índia sob a Lei de Proteção Ambiental de 1986 (NIPFP, 2021).

NIPFP (2021) relata que em 1994, tornou-se obrigatório para os construtores de barragens realizar uma análise de rompimento de barragens como parte do EIA para obter a autorização ambiental de acordo com a Lei de Proteção Ambiental de 1986. Os mapas de inundação também eram obrigatórios. A notificação de 1994 foi suspensa por uma notificação emitida em 2006, que não menciona explicitamente a exigência de análises de rompimento de barragens para limpeza ambiental. No entanto, em 2015, o MoEF publicou os Termos de Referência Padrão que tornaram obrigatória a análise de risco, a análise de falha de barragem e os mapas de inundação, e os classificou como componentes do EIA.

2.3.12 China

Após as múltiplas falhas de barragens na década de 1970, a China promulgou várias legislações de segurança de barragens em 1991. O Ministério de Recursos Hídricos criou o Centro de Gestão de Segurança de Barragens sob o Instituto de Pesquisa Hidráulica de Nanjing, e o Centro de Supervisão de Segurança de Grandes Barragens para conduzir avaliações de segurança de barragens, pesquisas em segurança de barragens, e para o desenvolvimento de normas e regulamentos. O Instituto de Pesquisa Hidráulica de Nanjing conduz análises de rompimento de barragens e análises de consequências para todas as grandes barragens (para exemplos, consulte Zhou et al. (2015) e Cuiyun et al. (2010)).

Por meio de pesquisas, a China desenvolveu um sistema sofisticado de gestão de risco para mitigar os riscos de rompimento de barragens. Análises de consequência para vários cenários de rompimento de barragens são usadas para quantificar a exposição e vulnerabilidade de habitações a jusante (CUIYUN et al., 2010). Esta análise de vulnerabilidade é então usada para regular o uso da terra nas áreas a jusante e para projetar sistemas de alerta precoce e planos de gestão de emergência para a região.

2.3.13 Barragens em fronteiras

Em países ribeirinhos que compartilham grandes rios transfronteiriços, as legislações de classificação e segurança de barragens em rios transfronteiriços se dá na forma de convenções e cooperação mútua. Isto tem importância especial, pois qualquer ameaça à segurança em um desses países terá suas implicações nos outros países participantes. Muitas dessas convenções foram desenvolvidas e assinadas para bacias hidrográficas do mundo. Um exemplo é a Convenção de proteção do rio Danúbio, realizada em 1998, entre quinze países europeus que compartilham a bacia do rio, que estipula, entre outras questões importantes, medidas preventivas para controlar os riscos originados de acidentes envolvendo inundações, gelo ou substâncias perigosas

(SAYED, 2018; ICPDR, 2020).

2.3.14 Comparativo

Zuffo e Genovez (2009), Costa e Silva et al. (2021), Méan et al. (2012) resumem os principais pontos das legislações internacionais como:

- A questão de segurança e proteção de barragens, nos EUA, engloba tanto os governos federal, estaduais e municipais. Esta segmentação parece adequada visto que se respeita diferenças regionais;
- A legislação australiana não prevê as partes da barragem que devem ser monitoradas e vistoriadas e, também, não discorre sobre o tamanho das barragens que são submetidas ao código legal;
- A Legislação Britânica aborda a questão da segurança de barragens de uma maneira abrangente e bem estruturada;
- A legislação canadense fica a encargo das províncias e a preocupação em manter o Manual de Segurança (*Dam Safety Guidelines*) sempre atualizado é evidente, pois já sofreu três alterações;
- As autoridades portuguesas conseguiram aprovar pelo menos três importantes leis que dão subsídio à manutenção da segurança de suas barragens. A primeira é mais genérica – Regulamento de Segurança de Barragens – e visa, principalmente, barragens de grande porte. A segunda aprova as normas de observação e inspeção de barragens que vêm a complementar a primeira. E a terceira, que apesar de se tratar de um regulamento específico para empreendimentos de pequeno porte, mostra-se abrangente e completa, pois contempla todas as “fases de vida” de uma barragem;
- Canadá, Austrália e EUA, mundialmente reconhecidos pela formulação de diretrizes sobre o tema, não possuem regulamentação específica para pequenas barragens;
- A semelhança entre o ordenamento jurídico e a organização administrativa do Brasil e de Portugal, mostra que o modelo português é uma importante referência para o legislador brasileiro;
- A Estrutura Regulatória de Segurança de Barragens da Suíça é única para todas as barragens e todos os procedimentos relativos à segurança de barragens são bem definidos.

2.4 ASPECTOS DE PROJETO DE BARRAGENS

Em 2000 foi elaborado e divulgado diretrizes que auxiliam os empreendedores do setor elétrico brasileiro, sistematizando os conhecimentos sobre os estudos, projetos e construção de Pequenas Centrais Hidrelétrica (PCH), a fim de possibilitar que equipes reduzidas de técnicos de nível superior, empreiteiros e fabricantes/fornecedores de equipamentos, de qualquer porte, desenvolvam e implantem esses empreendimentos (ELETROBRAS, 2000).

Nesta mesma intenção, o manual da ELETROBRAS (2003), que estabelece critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas foi elaborado com o objetivo de uniformizar e definir os critérios utilizados no desenvolvimento de projetos em nível de Viabilidade, Básico e Executivo de Usinas Hidrelétricas. Ressalta-se, em sua apresentação, que não se trata de um rol de exigências ou condições mínimas, mas de um documento de orientação ao estabelecimento do projeto com adequadas condições de qualidade técnica, segurança e custo.

Ambos os manuais compreendem as principais fontes relacionadas deste tópico. Já que representam um guia de boas práticas amplamente utilizado e proposto por agentes de todo o setor elétrico da época.

Para novas barragens, a construção de tais barragens deve ser permitida apenas após o cumprimento de todos os requisitos de investigações geológicas e hidrológicas completas e estudos analíticos profundos, preparação de projetos seguros e seguindo os procedimentos de construção adequados, que são proporcionais à classe da classificação de perigo da barragem em consideração (ADAMO et al., 2020).

No dimensionamento de barragens deve-se, basicamente, levar em consideração: os materiais que serão empregados na construção do corpo da barragem, a escolha da seção transversal típica e as análises de percolação, estabilidade e sísmica. Para a operação deve-se prever um plano de monitoramento através de instrumentos, além de inspeções visuais frequentes e regulares.

2.4.1 Investigações preliminares

As investigações para o projeto de uma barragem compreendem um conjunto de operações que visam uma completa caracterização geológica e geotécnica das áreas de implantação da obra. A metodologia para investigação inclui a investigação de campo, os meios prospectivos e os ensaios de laboratório (COSTA, W. D., 2016).

Os custos envolvidos nas investigações estão ligados ao nível de detalhamento requerido e, portanto, relacionados com a viabilidade técnica e econômica de cada etapa do projeto. Quantificar o número mínimo desses processos investigativos para atender o detalhamento de cada etapa do projeto, pode ser uma tarefa complexa, mas

será crescente conforme as etapas evoluem.

Walter Duarte Costa (2016) enfatiza que outros fatores podem influenciar a programação das investigações como: o porte da obra, a natureza geológica do local, os riscos envolvidos na implantação da obra e os impactos ambientais decorrentes.

Depois que a campanha de investigação é finalizada, procede-se à seleção dos materiais que irão ser utilizados na construção, sejam os aterros ou o concreto. Define-se, também, quais os valores dos parâmetros de projeto para todos os materiais escolhidos. Esta definição deve ser estabelecida após interpretação cuidadosa de todo o conjunto de ensaios de caracterização, procurando-se levar em consideração, na interpretação de cada ensaio, resultados já relatados na literatura científica.

Os parâmetros a adotar no projeto levarão em consideração a representatividade das amostras dos materiais ensaiados. E, por fim, a escolha dos materiais deve passar por uma análise econômica e técnica, pois se caracteriza por ser a maior parcela dos custos da obra (ELETROBRAS, 2003).

Cruz, Materón e Freitas (2009) ressaltam que cada material escolhido para compor a barragem deve ser ensaiado em laboratório para o conhecimento de suas propriedades básicas. Para os solos são necessários ensaios de limite de Atterberg, granulometria com sedimentação, massa específica dos grãos, umidade natural, Proctor Normal sem secagem prévia e sem reuso de material, além de uma classificação de cada solo de acordo com os limites de Atterberg, atividade coloidal e de acordo com a classificação de Casagrande. Materiais granulares devem ser ensaiados através da granulometria por peneiramento, massas específicas aparentes mínimas e máximas, características de forma dos grãos e mineralogia. Para as rochas destinadas à britagem é necessário o ensaio de massa específica aparente seca, absorção e ciclagem acelerada. Para as rochas de fundação é preciso ensaios de perda d'água e caracterização mineralógica. Para o concreto, estudos de dosagem, caracterização completa dos agregados e ensaios no estado fresco e endurecido são imprescindíveis.

2.4.2 Projeto de barragens

Com os resultados das investigações preliminares, pode-se escolher a seção transversal mais adequada para a barragem, e deve levar em consideração:

- As características dos materiais;
- A disponibilidade e economicidade dos materiais;
- As condições climáticas e trabalhabilidade;
- O cronograma de construção;

- O esquema de desvio;
- As características geológicas e topográficas da fundação e
- A integração ao arranjo geral.

A NBR 8681 (ABNT, 2004) define as principais ações de projeto que devem ser consideradas nas estruturas civis, e são divididas em cargas permanentes, variáveis e excepcionais. Na aplicação da norma nos casos de barragens, (ELETROBRAS, 2003) considera as seguintes ações: cargas permanentes, cargas acidentais, cargas móveis, vibração e impacto, pressões hidrostáticas, pressões hidrodinâmicas, pressões intersticiais, pressão do material assoreado, empuxo de terraplenos, ações devido ao vento, dilatação, retração e deformação lenta.

As cargas permanentes que devem ser consideradas são o peso próprio da estrutura civil e qualquer carga que não seja modificada ao longo da vida útil da obra. Já as cargas acidentais têm uma ação temporária na estrutura, como é o caso das ações necessárias à montagem de equipamentos ou estruturas especiais. As cargas móveis prevêm a ação do tráfego de veículos rodoviários ou especiais em uma combinação mais desfavorável possível. E a vibração e impacto deverão ser consideradas em equipamentos ou detalhes construtivos específicos sujeitos a estas ações, quando for o caso.

Para as pressões hidrostáticas, devem ser consideradas de forma estática e dinâmica. Estática no carregamento gerado pelo nível do reservatório e dinâmica no caso de estruturas auxiliares, como por exemplo, a tomada d'água e o vertedouro. A pressão intersticial, ou poropressão, considera a água que percola o aterro ou as fundações, gerando esforços de subpressão (ELETROBRAS, 2003).

Com o avanço da vida útil da estrutura, há o aumento do assoreamento do reservatório, que também deve ser devidamente considerado nas ações de carregamento da barragem.

Ainda observando as considerações da NBR 8681 (ABNT, 2004) e da (ELETROBRAS, 2000), é necessário considerar a combinação de carregamentos de forma a avaliar, pelo menos, quatro cenários, são eles:

1. Condição de Carregamento Normal (CCN): combinações de ações que apresentem grande probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura;
2. Condição de Carregamento Excepcional (CCE): combinação de ações com baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, consideram a ocorrência de somente uma ação excepcional;

3. Condição de Carregamento Limite (CCL): combinação de ações com baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, consideram a ocorrência de mais de uma ação excepcional; e
4. Condição de Carregamento de Construção (CCC): combinações de ações que apresentem probabilidade de ocorrência durante a execução da obra.

A Tabela 4 relaciona as ações que devem ser consideradas nos projetos de barragens segundo (ELETROBRAS, 2003).

TABELA 4 – Ações a serem consideradas em cada condição de carregamento.

Condição de Carregamento Normal (CCN)

- Peso próprio da estrutura e equipamentos;
- Carga acidental uniformemente distribuída, concentrada e cargas móveis;
- Carga relativa às atividades rotineiras de operação e manutenção da barragem;
- Empuxos hidrostáticos com o N.A. do reservatório e do canal de fuga variando entre os níveis máximo normal e mínimo normal, sendo que a condição mais severa de carregamento deverá ser selecionada para cada estrutura;
- Subpressão com drenagem operante;
- Empuxo de terraplenos e de assoreamento;
- Pressão hidrodinâmica devido a esforços hidráulicos;
- Pressão Intersticial;
- Esforços devido ao vento;
- Variação de temperatura e retração do concreto;
- Ancoragens ativas;
- Esforços sobre a estrutura no primeiro estágio, em casos onde o segundo estágio da estrutura deva ser completado posteriormente, com a usina em operação.

Condição de Carregamento Excepcional (CCE)

- Empuxos hidrostáticos e subpressão associada ao N.A. do reservatório e do canal de fuga variando entre os níveis d'água máximo maximorum e mínimo minimorum;
- Subpressão decorrente de drenagem inoperante ou de falhas no sistema de drenagem;
- Pressão hidrodinâmica devido a ação sísmica;
- Efeito de onda;
- Quaisquer esforços excepcionais sobre as estruturas de primeiro estágio.

Condição de Carregamento Limite (CCL)

- Empuxos hidrostáticos e subpressão associada ao N.A. do reservatório e do canal de fuga variando entre os níveis d'água máximo maximorum e mínimo minimorum;
- Subpressão decorrente de drenagem inoperante ou de falhas no sistema de drenagem;
- Pressão hidrodinâmica devido a ação sísmica;
- Efeito de onda;
- Quaisquer esforços excepcionais sobre as estruturas de primeiro estágio.

Condição de Carregamento de Construção (CCC)

- Condições normais de carregamento em estruturas incompletas, conforme for apropriado a cada caso em particular. Como exemplo, esforços sobre estruturas em 1º estágio, em casos onde o 2º estágio deva ser completado posteriormente, adufas vazias para o vertedouro, etc.;
- Cargas de equipamentos de construção e montagem;
- Cargas devidas à ancoragens provisórias para guinchos, guindastes; ou dispositivos de levantamentos de carga ou similares, cargas de compactação de aterros e reaterros;
- Cargas vivas excepcionais, devidas à movimentação e montagem de equipamentos;
- Cargas devidas a testes de equipamentos permanentes;
- Cargas hidrostáticas e subpressões anormais devidas a esvaziamentos temporários;
- Esforços devidos a injeções.

Fonte: ELETROBRAS (2003)

Já as análises de percolação, que têm por objetivo prever a distribuição de

pressões e o valor das vazões no maciço, nas fundações e demais áreas de interesse, fornece subsídios para estudos de estabilidade, para dimensionamento dos dispositivos de drenagem interna e para seleção e dimensionamento dos sistemas de impermeabilização e drenagem da fundação (ELETROBRAS, 2003).

Nestas análises utiliza-se as características hidrogeológicas encontradas no vale de interesse e previstas para o aterro, sendo realizada para os seguintes cenários:

- Condição de reservatório em operação: o nível d'água de montante será o máximo normal;
- Dimensionamento dos dispositivos de drenagem (maiores valores de vazão): o nível d'água de jusante será o nível mínimo a jusante da barragem;
- Análises de estabilidade: o nível de jusante a ser considerado será o que fornecer a combinação mais desfavorável de carregamento;
- Condição de rebaixamento rápido: os níveis d'água máximo e mínimo normal do reservatório.

Conforme ELETROBRAS (2003), na maior parte dos casos as análises podem ser simplificadas em redes de fluxo que contenham uma variação linear de perdas de carga ao longo de linhas de fluxo preferenciais.

Em conformidade com (ELETROBRAS, 2003), a verificação da estabilidade global de barragens de concreto corresponde a avaliação da segurança global quanto a movimentos de corpo rígido, sendo eles: flutuação; tombamento e deslizamento em qualquer plano; e análise de tensões. Os coeficientes de segurança para efeitos de estudos referentes às análises de comportamento da barragem de concreto serão descritos na Tabela 5.

TABELA 5 – Fatores de segurança mínimos para barragens de concreto à gravidade

Fatores de segurança mínimos	Casos de carregamento			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FSF ¹	1,3	1,1	1,1	1,2
FST ²	1,5	1,2	1,1	1,3
FSD _c ³	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)	1,3 (2,0)	2,0 (2,5)
FSD _φ ⁴	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)	1,1 (1,3)	1,3 (1,5)

Fonte: ELETROBRAS (2003)

¹ Fator de Segurança contra a Flutuação

² Fator de Segurança contra o Tombamento

³ Fator de Segurança contra o Deslizamento considerado fundação em material com coesão

⁴ Fator de Segurança contra o Deslizamento considerado fundação em material sem coesão

É indicado ainda, em situações em que os parâmetros de resistências dos materiais sejam precários ou não apresentem constância de comportamento, deve-se adotar os valores entre parênteses (CRSB, 1999).

Para verificação da estabilidade em barragens de terra, são utilizados métodos para calcular a estabilidade dos taludes que a compõem. As análises de estabilidade de taludes têm o objetivo de obter um coeficiente de segurança que determine se há estabilidade para cada condição de carregamento considerada.

Estes métodos foram desenvolvidos desde os anos 1920, através de várias hipóteses simplificadoras, mas continuam em desenvolvimento, procurando obter resultados cada vez mais exatos, acompanhando principalmente o desenvolvimento de ferramentas computacionais (FREDLUND; KRAHN, 1977; GRIFFITHS; LANE, 1999; CHENG, 2003; SARMA; TAN, 2006).

Para garantia de estabilidade ao escorregamento dos taludes de uma barragem de terra, os mesmos deverão ser verificados nas seguintes condições de carregamento:

- Final de construção;
- Rebaixamento rápido;
- Percolação estável;
- Sismos.

A condição de final de construção leva em consideração a estabilidade do aterro sem a presença de nível d'água a montante nem a jusante. Portanto, não há a presença de qualquer fluxo no maciço compactado, apenas na fundação devido a umidade nos materiais de fundação.

Para o rebaixamento rápido, deve-se considerar a diminuição do nível d'água do reservatório do nível máximo para o nível mínimo em um curto período de tempo. Esta ação geralmente se dá em manobras para manutenção ou, até mesmo, em casos de emergências. Isto pode resultar em uma combinação de carregamentos que pode ser crítico, com redução das tensões principais, inclusive com a mudança de direção das mesmas e condições transientes de fluxo gravitacional de água.

No caso de percolação estável, é considerado que o adensamento do aterro já tenha acontecido e que a percolação interna já tenha se estabilizado em função do nível do reservatório. Assim, o regime de percolação é permanente e a análise leva em consideração as tensões efetivas atuantes no maciço.

Já a análise sob a ação sísmica se faz importante para barragens em geral, haja visto a sua magnitude, mesmo em regiões consideradas assísmicas. Ações sísmicas

também podem ser induzidas pelo enchimento do reservatório, especialmente em barragens de grande porte (mais de 100m de altura) com reservatórios de grande volume (superior a $10^9 m^3$). (ELETROBRAS, 2003) recomenda análise pseudo-estática na avaliação das condições da barragem face a sismos naturais ou induzidos, adotando-se cargas sísmicas correspondentes a acelerações de 0,05g na direção horizontal e 0,03 da direção vertical.

ELETROBRAS (2003) recomenda, com base em USACE (2003), a utilização dos coeficientes de segurança mínimos para barragens de terra apresentados na Tabela 6, comparando a capacidade resistente com os esforços aplicados.

TABELA 6 – Coeficientes de Segurança Recomendados para barragens de terra

Caso	Coeficiente de Segurança	Taludes de Interesse
Final de Construção	1,3	Montante e Jusante
Rebaixamento Rápido	1,1 a 1,2	Montante
Percolação Estável	1,5	Jusante
Análise Sísmica	1,2	Montante e jusante

Fonte: ELETROBRAS (2003)

As análises de estabilidade de taludes envolvem métodos de análise limite, tensão-deformação ou equilíbrio limite. Para aquelas que têm base no equilíbrio limite, cuja hipótese básica é representada na Figura 7, objetiva-se a localização da Superfície Crítica de Ruptura (SCR) que corresponde ao menor coeficiente de segurança. As hipóteses básicas do problema são:

- Assume-se a existência de uma superfície de ruptura bem definida;
- A massa de solo ou rocha encontra-se em condições de ruptura generalizada iminente;
- Assume-se um critério de ruptura (em geral Mohr-Coulomb), o qual é satisfeito ao longo de toda a superfície de ruptura e
- Assume-se um coeficiente ou fator de segurança (FS) constante e único ao longo da superfície potencial de ruptura.

Os métodos de equilíbrio limite são determinísticos, pois consideram uma média para os parâmetros geotécnicos, obtida a partir de um banco de dados, preferencialmente obtido de ensaios de caracterização dos materiais, para então se obter um fator de segurança calculado para estabilidade de um talude. A desconsideração da variabilidade intrínseca nos parâmetros do solo embutem muitas incertezas, sub ou superdimensionando as obras de terra.

Cabe considerar que obviamente a caracterização dos materiais é peça fundamental do processo, e erros de caracterização podem gerar estruturas não seguras, mesmo satisfazendo ao critério de estabilidade adotado (representado pelo coeficiente de segurança), bem como a variabilidade dos parâmetros espacialmente também pode gerar desconfianças nesse processo de dimensionamento.

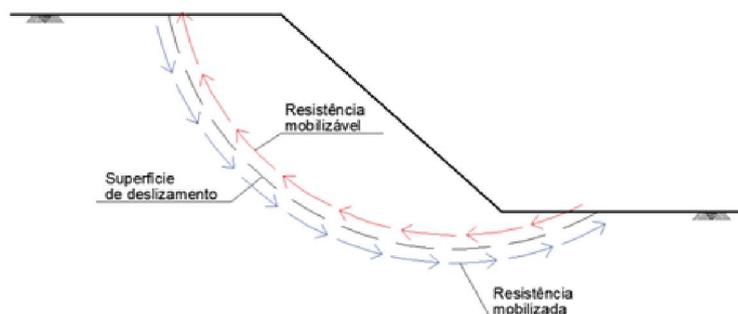


FIGURA 7 – Resistência mobilizável e resistência mobilizada para superfícies potenciais circulares de ruptura de taludes. Fonte: Silva et al. (2011)

Os métodos de análise de estabilidade de taludes são diversos e crescentes em número. Mas possuem como premissa a consideração da massa de solo em fatias, com ou sem consideração dos esforços presentes entre as fatias. A escolha do método a ser utilizado deve levar em consideração a superfície potencial de ruptura (planar, circular, mista ou qualquer). Dentre os principais métodos utilizados podemos citar:

- Método de Bishop Simplificado (1955);
- Método de Morgenstern e Price (1965);
- Método de Spencer (1967);
- Método de Janbu Generalizado (1968) e
- Método de Sarma (1979).

O método Bishop simplificado é provavelmente o mais utilizado. Quando incorporado a programas computacionais, na maioria dos casos apresenta resultados satisfatórios (BRAJA, 2011), obviamente se os parâmetros considerados foram adequadamente determinados.

Guo, Dias e Pan (2019) recomenda que um método de análise probabilístico seja utilizado no dimensionamento de obras tão importantes como barragens, para considerar as incertezas e a variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos. Variabilidade espacial é uma propriedade inerente aos solos devido a sua complexa formação, que depende da geologia, das intempéries e do meio antrópico a que está

sujeito. Por isso um modelo mais real é aquele que considera a variabilidade espacial nos parâmetros dos solos e rochas no dimensionamento geotécnico de estruturas (QI X H; LI, 2018).

Porém, como já ligeiramente abordado, análise de estabilidade de taludes é uma área da engenharia geotécnica que é altamente favorável ao tratamento probabilístico, e recebeu considerável atenção na literatura desde os anos 1970 (MATSUO; KURODA, 1974; ALONSO, 1976; TANG; YUCEMEN; ANG, 1976; VANMARCKE, 1977; D'ANDREA; SANGREY, 1982; CHOWDHURY; TANG, 1987; LI; LUMB, 1987; OKA; WU, 1990; MOSTYN; LI, 1993; LACASSE, 1994; CHRISTIAN; LADD; BAECHER, 1994; CHOWDHURY; XU, 1995; WOLFF, 1996; CHRISTIAN, 1996; LACASSE; NADIM, 1996; LOW, 1996; LOW; TANG, 1997b,a; LOW; GILBERT; WRIGHT, 1998; HASSAN; WOLFF, 1999; WHITMAN, 2000; DUNCAN, 2000; EL-RAMLY, 2002a; LOW, 2003; BHATTACHARYA et al., 2003; GRIFFITHS; FENTON, 2004; SIVAKUMAR BABU; MUKESH, 2004; XU; LOW, 2006; LOW; LACASSE; NADIM, 2007; CHO, 2007; SHINODA, 2007)

As análises probabilísticas de estabilidade de taludes requerem o conhecimento das distribuições de probabilidade ou das funções de densidade de probabilidade das variáveis envolvidas no problema, ou seja, dos parâmetros que caracterizam os materiais do talude em estudo. O número de dados disponíveis para determinar as distribuições de probabilidade, geralmente normais ou log-normais, e seu grau de dispersão em relação a média afetam sensivelmente a probabilidade de ruptura calculada.

Os autores Cornell (1969), Hasofer e Lind (1974), Ditlevsen (1979), Shinozuka (1983), Ang e Tang (1984) e Melchers e Beck (2018), entre outros; foram pioneiros no desenvolvimento de métodos probabilísticos de estabilidade de estruturas utilizando o equilíbrio limite como suporte para os métodos de análise de confiabilidade estrutural. Alguns dos mais importantes métodos de análise de confiabilidade estrutural são: *First Order Second Moment (FOSM)*, *First Order Reliability Method (FORM)*, *Second Order Reliability Method (SORM)*, Método da Superfície de Resposta e Método do Ponto Estimado. Apesar da simulação de Monte Carlo (SMC) não ser um método consagrado nas análises de estabilidade de taludes com foco em confiabilidade estrutural, tem sido cada vez mais utilizado, na obtenção de probabilidade de falha das estruturas e do índice de confiabilidade.

Na aplicação da confiabilidade estrutural, os problemas de engenharia de estruturas podem se resumir a um equilíbrio entre forças resistentes (R) e esforços solicitantes (S). Entre estas, em geral R é uma variável com menor variância, já que o comportamento de S , na maioria das vezes, é função do meio em que a estrutura está inserida e dos fenômenos naturais (FABER, 2003).

Em empreendimentos como as barragens são esforços solicitantes: a variação

do nível de água no reservatório, ações sísmicas e esforços gerados pelo adensamento natural dos solos. Além destes, ainda pode-se citar eventos mais esporádicos mas tão importantes quanto os primeiros: efeito das ondas do reservatório, efeito das chuvas, vibrações geradas por tráfego de veículos pesados, intemperismo e evolução hidrogeológica natural dos solos.

Uma forma de mensurar, de maneira adimensional, a variabilidade de um material é através do coeficiente de variação (COV), uma característica útil para indicar a variabilidade de uma variável aleatória em torno de seu valor esperado, calculado como:

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2.1)$$

onde σ é o desvio padrão da amostra e μ é a média da amostra.

Phoon (1995) resumiu os erros de medição para vários ensaios de laboratório em solos e obteve os coeficientes de variação (COV) dos parâmetros analisados, como descrito na Tabela 7.

TABELA 7 – Resumo da variabilidade inerente de propriedades de resistência em solos

Propriedade ⁽¹⁾	Tipo de solo	Número de dados por grupos	Número de ensaios por grupos		Valor da propriedade		COV (%)	
			Am ⁽²⁾	μ ⁽³⁾	Am ⁽²⁾	μ ⁽³⁾	Am ⁽²⁾	μ ⁽³⁾
USS,UC (kN/m^2)	Areia fina	38	2-538	101	6-412	100	6-56	33
USS,UU (kN/m^2)	Argila, silte	13	14-82	33	15-363	276	11-49	22
USS, CIUC (kN/m^2)	Argila	10	12-86	47	130-713	405	18-42	32
USS (kN/m^2)	Argila	42	24-124	48	8-638	112	6-80	32
ϕ (°)	Areia	7	29-136	62	35-41	37,6	5-11	9
ϕ (°)	Argila, silte	12	5-51	16	9-33	15,3	10-50	21
ϕ (°)	Argila, silte	9	-	-	17-41	33,3	4-12	9
$\tan \phi$,TC	Argila, silte	4	-	-	0,24-0,69	0,509	6-46	20
$\tan \phi$,DS	Argila, silte	3	-	-	-	0,615	6-46	23
$\tan \phi$	Areia	13	6-111	45	0,65-0,92	0,744	5-14	9

⁽¹⁾ USS (Resistência não drenada), UC (ensaio não confinado), UU (ensaio triaxial de compressão não consolidado, não drenado), CIUC (ensaio triaxial de compressão consolidado, isotrópico e não drenado), DS (ensaio de cisalhamento direto), TC (ensaio triaxial).

⁽²⁾ Am (amplitude da amostra)

⁽³⁾ μ (média da amostra)

⁽⁴⁾ ϕ (ângulo de atrito)

Fonte: Phoon (1995)

Phoon e Kulhawy (1999), em seu estudo sobre variabilidade intrínseca de solos, encontrou os valores de 5 a 15% para o coeficiente de variação (COV) relativo aos

erros de medição para a maioria dos ensaios de resistência em laboratório.

Portanto, pode-se dizer que há negligência em desconsiderar a variabilidade dos materiais envolvidos em obras como barragens. Não há como afirmar, honestamente, que uma barragem é segura tendo em mente as incertezas geradas pela variabilidade espacial, principalmente dos solos e rochas. Embora, a maior parte dos engenheiros de barragens tenham pleno conhecimento desta faceta em seus projetos, não há nenhuma normativa, técnica ou regulatória que exija a abordagem probabilística nos projetos de barragens.

Nos processos de dimensionamento de barragens, também são necessárias análises de tensão e deformação, com objetivo de avaliar a evolução de recalques e a compatibilidade de deformações entre os materiais de construção. Além disso, pode-se avaliar o risco de ocorrência de fissuras e balizar o planejamento da instrumentação.

Após o final da construção, é o momento de iniciar o processo de enchimento do reservatório, onde o primeiro enchimento pode ser considerado como a fase mais crítica da vida da barragem. As estruturas da barragem neste período começam a ajustar seu comportamento às novas cargas aplicadas. A fundação que está sendo submetida a novas cargas hidráulicas e fluxos de água deve se adaptar às novas condições, enquanto as infiltrações através do corpo da barragem devem se desenvolver até seu estado estável e devem estar dentro dos limites seguros. Ao mesmo tempo, o corpo da barragem aplicará todo o seu peso na fundação, que deve acomodar as novas cargas e se acomodar dentro dos valores calculados esperados, e como um todo a barragem deve se ajustar para qualquer possível recalque diferencial (ADAMO et al., 2021).

2.4.3 Operação e manutenção

Para barragens existentes, a operação segura, as inspeções e as manutenções de rotina devem ser pré estabelecidas, observadas e seguidas. No caso de algum defeito ou mal funcionamento ser descoberto, ações corretivas devem ser executadas. Uma lição aprendida com alguns casos reais do passado é que as questões orçamentárias não devem comprometer as ações corretivas necessárias, sendo o processo de priorização dos reparos necessários útil, mas não há espaço para negligência ou demora indevida, mesmo para pequenos problemas (ADAMO et al., 2020), o foco decisório sempre deve estar nas questões de segurança e comportamento adequado em serviço.

Os procedimentos de operação da barragem dependem da sua finalidade: produção de energia, abastecimento de água, amortecimento de enchentes, irrigação, etc. Em função da finalidade devem ser planejados os níveis de água da operação e efetuado o controle das vazões afluentes. Quando há reservatórios em cascata, como no rio Paraná ou no rio Tennessee, e as finalidades são múltiplas, uma entidade

coordena a operação dos empreendimentos em vista da complexidade e dos requisitos por vezes contrastantes entre os diversos usuários e finalidades (PIASENTIN, 2012a).

A operação segura, a verificação e a manutenção de segurança devem ser conduzidas conforme exigido por seus manuais de operação e manutenção e até mesmo pela introdução de inovações nesses campos, como novos tipos de sistemas de monitoramento, ou seja, novos instrumentos e/ou métodos de sensoriamento remoto (ADAMO et al., 2020).

O ICOLD (2014) divide as atividades de monitoramento em três elementos: Inspeção Visual, Instrumentação e Testes em equipamentos eletromecânicos, como apresentado na Figura 8.

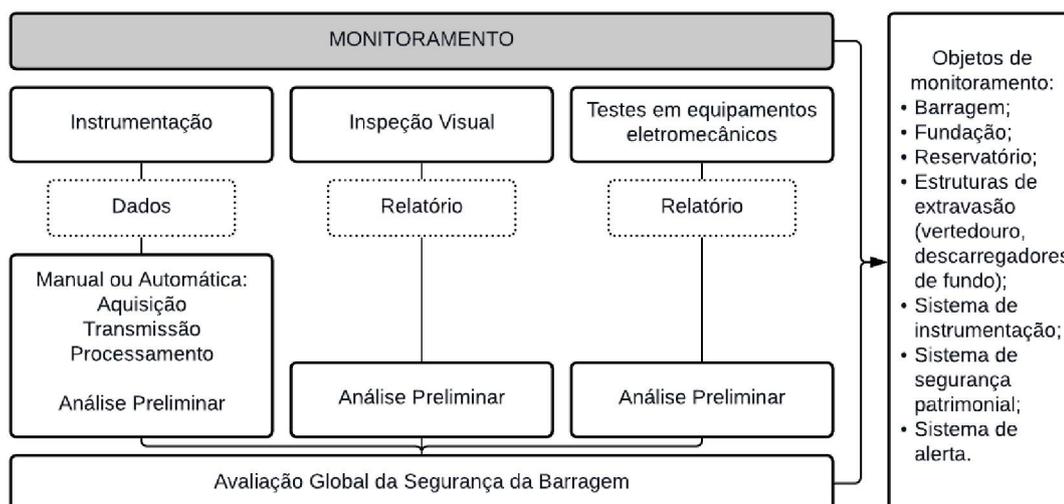


FIGURA 8 – Elementos do processo de monitoramento de barragens. Fonte adaptado de ICOLD (2014)

Tendo essas premissas em mente e considerando que reagir rapidamente ao desempenho inadequado, ou aos sinais de perigo, é um aspecto crítico contínuo para a segurança das barragens, um Manual de Monitoramento que contemple os três elementos expressos na Figura 8 pode compreender uma ferramenta eficiente (FUSARO et al., 2017).

Portanto devemos nos conscientizar das limitações e incertezas no projeto, da influência dos aspectos construtivos, por vezes imperfeitos ou desuniformes, e dos eventuais defeitos, da necessidade de acompanhar as estruturas durante toda sua vida útil com uma operação judiciosa, efetuando as manutenções periódicas e rotineiras de forma preventiva e reparadoras, quando necessário, por causa das deteriorações que porventura ocorram ao longo da vida útil (PIASENTIN, 2012a).

2.4.4 Sistema de instrumentação

O monitoramento é a ferramenta de diagnóstico da saúde da barragem e possibilita intervenções preventivas e corretivas, minimizando o risco de acidentes, preservando a segurança da estrutura, do meio ambiente e de terceiros em sua área de influência (ZUCULIN, 2012).

O sistema de monitoração e instrumentação de barragens, baseado nos estudos de segurança do empreendimento, na fase de projetos, tem finalidade de monitorar o desempenho e fornecer indicativos de situações de alerta e perigo. A quantidade de instrumentos deve ser suficiente para que seu desempenho e segurança possam ser adequadamente avaliados, mas deve ser lembrado que os instrumentos monitoram apenas regiões limitadas e não a estrutura como um todo (DUNNICLIFF, 1988).

Devemos instrumentar as barragens porque a instrumentação é a ferramenta objetiva do monitoramento. Os objetivos da instrumentação são (ZUCULIN, 2012):

- Fornecer dados para avaliar os critérios de projeto;
- Fornecer informações sobre o desempenho vigente da barragem e suas fundações e
- Observar o desempenho de áreas críticas.

No que se refere à instrumentação sísmica, tem constituído prática rotineira a instalação de uma rede de sismógrafos nas circunvizinhanças dos grandes reservatórios e, circunstancialmente, de alguns acelerógrafos nas barragens, objetivando detectar possíveis sismos induzidos pelo enchimento do reservatório. Os acelerógrafos devem ser instalados na crista, na fundação e à meia altura. Às vezes, em galerias no concreto ou na rocha (CBDB, 1996).

ELETOBRAS (2003) destaca a importância do sistema de instrumentação, relacionando os efeitos monitorados por cada instrumento, como representa a Figura 9, para barragens de terra e enrocamento e a Figura 10, para barragens de concreto.

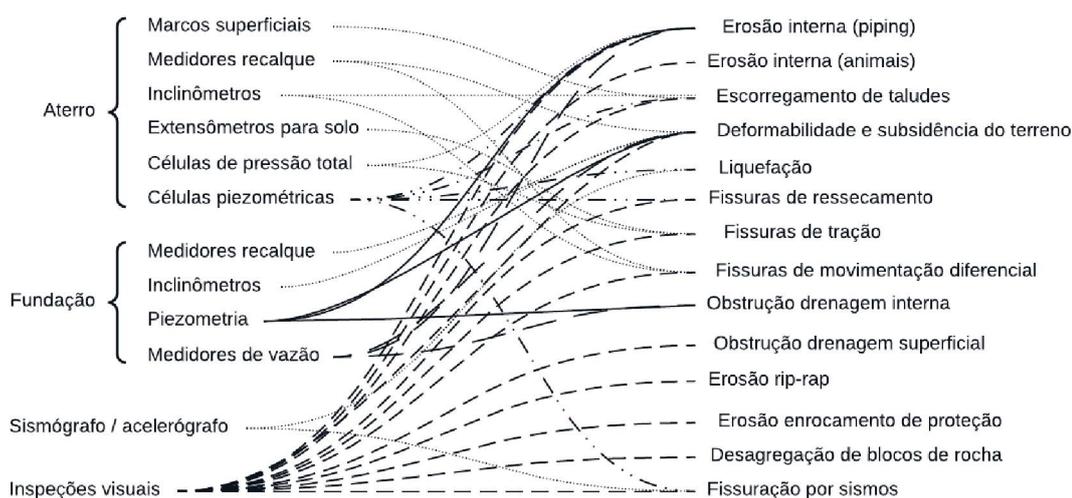


FIGURA 9 – Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento. Fonte: adaptado de ELETROBRAS (2003)

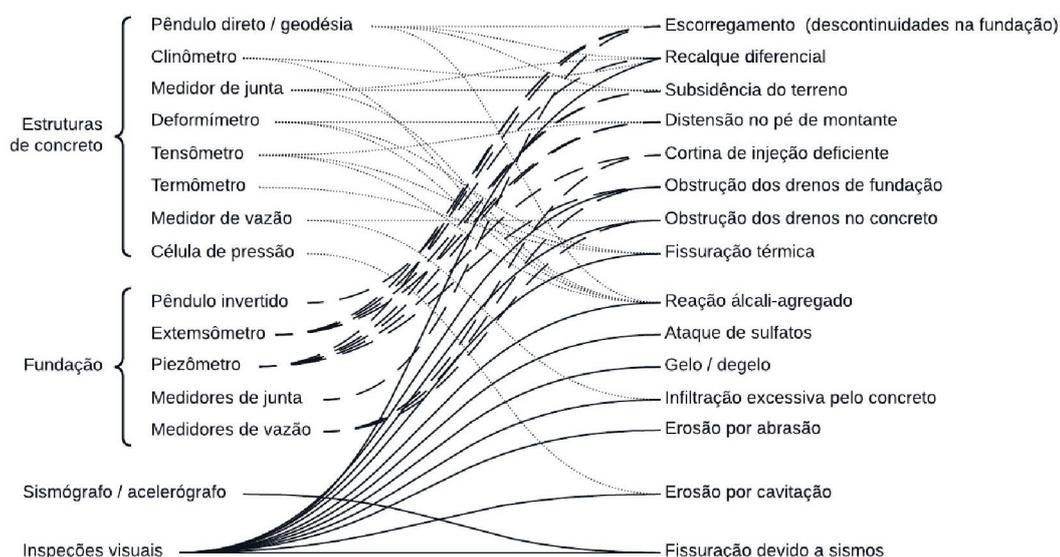


FIGURA 10 – Instrumentação de Barragens de Concreto. Fonte: adaptado de ELETROBRAS (2003)

Uma boa prática é incluir, no manual de operação e manutenção da barragem, instruções sobre a frequência e escopo do monitoramento, inspeções visuais, testes e pesquisas, além de fornecer uma lista de verificação das áreas de interesse com essas instruções (ADAMO et al., 2021).

O exame cuidadoso dos dados de instrumentação em uma base contínua pode revelar uma possível condição crítica. Os dados de instrumentação devem ser

coletados por pessoal treinado especificamente para este propósito. Esse treinamento deve incluir treinamento para reconhecer e relatar imediatamente anomalias nas leituras ou medições. Os dados de observação de desempenho devem ser tabulados adequadamente para facilitar a interpretação e podem ser apoiados por comentários, diagramas e curvas. É essencial que os dados de instrumentação sejam processados, revisados e avaliados em tempo hábil por especialistas familiarizados com o design, construção e operação do projeto (ADAMO et al., 2021).

A tendência atual é de automatizar os instrumentos. Sensores estão sendo desenvolvidos e implantados, buscando alternativas econômicas que viabilizem a aquisição de medidas on-line, conforme consta em (PÍNFAARI; CARNEIRO; CESTARI, 2011).

É preciso destacar que a inspeção visual na barragem durante as campanhas de leituras é importante. Não se trata aqui, somente daquela inspeção especializada e regulamentada em Lei, mas, das visitas dos técnicos de instrumentação e leituristas aos instrumentos, momento no qual circulam pela barragem e podem observar comportamentos anômalos que mereçam verificação mais acurada (ZUCULIN, 2012).

A relação intrínseca, entre os parâmetros de projeto e de monitoramento, vai estabelecer os valores de controle ou de referência, que devem ser observados durante a vida útil da barragem (ZUCULIN, 2012).

Os instrumentos devem ser examinados periodicamente para seu funcionamento adequado, e a situação dos instrumentos instalados deve ser avaliada de tempos em tempos por especialistas para determinar se eles são suficientes para avaliar o desempenho da barragem (ADAMO et al., 2021).

A inspeção do status dos instrumentos instalados e suas condições de trabalho é dever do pessoal de operação da barragem, enquanto a avaliação final das condições dos dispositivos, qualidade dos dados obtidos e a necessidade de mais deles é dever de um especialista em instrumentação trabalhando com a equipe de inspeção (ADAMO et al., 2021).

Além da instrumentação proposta em projeto, ou em barragens existentes sem instrumentos, pode-se realizar reinstrumentação da estrutura. Também pode-se enfatizar que duas situações indicam a necessidade de se reinstrumentar uma barragem: quando queremos monitorar grandezas ainda não instrumentadas, ou, para reposição de instrumentação perdida (ZUCULIN, 2012).

2.4.5 Inspeções visuais

Deve-se ter em mente que apenas a instrumentação, por mais sofisticada que seja, não é suficiente para garantir a segurança de uma barragem. A instrumentação

deve ser acompanhada por uma inspeção visual direta. Devido às grandes dimensões que uma barragem pode ter e ao fato de que os instrumentos não estão localizados necessariamente na região onde um fenômeno prejudicial se manifesta, é necessário vistoriar periodicamente toda a estrutura, procurando por sinais de possíveis problemas: fissuração, áreas úmidas, novas surgências, etc (PIASENTIN, 2012b).

Barragens devem ser operadas e mantidas de forma segura, através de inspeções para identificação de anomalias que comprometam a segurança, análises utilizando as tecnologias atuais e elaboração de projetos e ações corretivas, se necessário, com base em boas práticas de engenharia (MEDEIROS, 2012).

A inspeção visual de uma barragem é um exame da estrutura a partir do conhecimento do engenheiro. É o processo de manutenção preditiva subjetiva, onde o examinador lança mão de seus sentidos para determinar a situação da estrutura (PIASENTIN, 2012b).

O exame visual, as medições e a verificação de rotina do desempenho das barragens são partes importantes do trabalho de monitoramento. Esse monitoramento é a primeira etapa em qualquer processo de avaliação da segurança. Este exame, feito em conjunto com o acompanhamento dos registros dos instrumentos e outras medições, deve trazer ao conhecimento de um inspetor experiente qualquer anomalia ou comportamento incomum da barragem e suas estruturas adjacentes (ADAMO et al., 2021).

Adamo et al. (2021) sugere que as áreas gerais relacionadas na Tabela 8 como de preocupação com relação a segurança de barragens.

TABELA 8 – Áreas gerais de preocupação com a segurança de barragens

Área de interesse	Tipo de barragem	Fontes de risco
Projeto	Todos	Dados ou critérios de projeto incompletos ou incorretos. Investigações de fundações incompletas. Falha em definir todas as condições de carregamento prováveis e modos de falha. Investigação e teste de materiais incompletos
Construção	Concreto	Tratamento de fundação inadequado ou incompleto, seja por meio de cutoffs ou poços de drenagem. Escolha incorreta de agregados, levando à reatividade alcalina e ataques de sulfato. Métodos errados de locação e tratamento de juntas.
	Aterro	Tratamento de fundação inadequado ou incompleto, seja com cutoffs ou manta drenante. Falha em obter o grau de compactação necessário. Falha em controlar a poropressão, o que pode causar elevado recalque ou recalque diferencial, piping e falhas de cisalhamento em barragens de aterro.
Reservatório	Todos	Possibilidade de deslizamentos devido a falhas de operação. Ondas sísmicas ou induzidas por deslizamentos de terra. Erosão das margens do reservatório. Tensão da borda do reservatório. Falha do reservatório devido à piping.

Fonte: Adamo et al. (2021)

Adamo et al. (2021) sugere pontos de observação para inspeções do corpo da barragem e da fundação e nas estruturas auxiliares, como apresentados nas Tabelas 9 e 10.

TABELA 9 – Lista de verificação do modelo para inspeções do corpo da barragem e da fundação

Local	Tipo de barragem	Ponto de observação
		O vazamento de água é excessivo?
Corpo e fundação	Terra Enrocamento Concreto RCC Alvenaria	Está aumentando ou diminuindo? Está claro ou turvo? Existem grandes variações nas descargas de drenos individuais? Há infiltração potencialmente perigosa aparente nas proximidades do reservatório?
Corpo	Terra Enrocamento	O piping é evidente, especialmente em aterros próximos a estruturas auxiliares?
Fundação	Terra Enrocamento Concreto RCC Alvenaria	As subpressões estão dentro das premissas do projeto ou é necessário fazer mais poços de alívio na fundação?
Faces de concreto	Terra Enrocamento RCC	Há deformação visível ou outro problema?
Corpo e fundação	Terra Enrocamento	Existem sinais de erosão do aterro ou de sua fundação?
Corpo	Terra Enrocamento Concreto RCC Alvenaria	A fissura se desenvolveu em estruturas, aterros ou fundações?
Fundação	Terra Enrocamento Concreto RCC Alvenaria	Existem evidências de alteração química dos materiais de base? Há evidência de dissolução da rocha de fundação por infiltração?

Fonte: Adamo et al. (2021)

A segurança das barragens pode ser ameaçada por muitos fatores, e o inspetor deve ter uma boa ideia das possíveis falhas e suas consequências. Isso é importante para que qualquer anomalia observada possa ser ligada à sua causa raiz e que possa ser submetida a uma observação cuidadosa e intensiva e acompanhamento conforme necessário (ADAMO et al., 2021).

É sempre uma boa prática que o inspetor se familiarize com o projeto das barragens e com as premissas e dados usados pelo projetista antes de iniciar qualquer

TABELA 10 – Lista de verificação do modelo para inspeções de estruturas auxiliares

Local	Ponto de observação
Tomada d'água	O canal de entrada está livre de obstruções e não provoca o aumento do nível de água do reservatório? A capacidade do vertedouro é adequada para baixar o reservatório rapidamente durante uma emergência?
Vertedor	A captação do vertedouro é capaz de ultrapassar as vazões de enchentes projetadas com base em registros hidrológicos atualizados?
Rampa do vertedouro	A calha do vertedouro está em boas condições de trabalho e livre de manchas que podem causar cavitação em condições de escoamento rápido?
Bacia e piscina de dissipação	Há perigo de descarga do vertedouro prejudicar a estrutura da bacia de dissipação ou piscina de dissipação?
Tomada d'água e vertedor	As instalações de captação para saídas e vertedouros estão livres de sedimentos e detritos?
Canal de descarga	O canal de saída a jusante é construído e mantido de forma que não haja erosão perigosa ou detritos depositados no canal do rio?

Fonte: Adamo et al. (2021)

rodada de inspeção (ADAMO et al., 2021).

Para manter o controle do programa de inspeção, um cronograma de inspeção deve ser mantido, listando cada característica a ser inspecionada, frequência das inspeções, data da última inspeção, registro de manutenção, descrição dos reparos feitos e data da próxima inspeção (ADAMO et al., 2021).

Após a conclusão de uma rodada de inspeção de uma barragem, a equipe do inspetor deve formular e relatar suas conclusões no Relatório de Inspeção (ADAMO et al., 2021).

Um bom relatório deve conter um acompanhamento dos desenvolvimentos, como variações nas quantidades de água de infiltração e medições piezométricas relacionadas às mudanças nos níveis de água do reservatório. Todas as observações dignas de nota devem ser documentadas por fotografias, vídeos e ilustrações com

detalhes suficientes de datas e comentários. Finalmente, o relatório deve avaliar a adequação, ou não, dos períodos entre as inspeções e se inspeções mais frequentes são necessárias em função do estado de segurança da barragem (ADAMO et al., 2021).

As inspeções informais são normalmente atribuídas ao pessoal operacional no local. Esses operadores não precisam ter educação formal nas áreas de engenharia ou geologia, mas devem ser bem treinados e conscientes da grande confiança depositada neles e dá grande importância e absoluta necessidade de sua inspeção cuidadosa e relatórios. Atenção especial deve ser dada à detecção de evidências de (ou mudanças em) vazamento, erosão, sumidouros, fervedouros, infiltração, instabilidade de taludes, recalque indevido, deslocamento, inclinação, rachaduras, deterioração e funcionamento inadequado de drenos e poços de alívio. As inspeções informais devem ser agendadas conforme necessário de acordo com o tamanho da barragem, importância e potencial de perda de vidas e danos às propriedades. Espera-se que o pessoal operacional execute uma inspeção informal imediatamente após qualquer evento incomum, como grandes inundações, terremotos, suspeita de sabotagem ou vandalismo (ADAMO et al., 2021).

As inspeções visuais devem ser realizadas anualmente, ou pelo menos a cada dois anos, especialmente em barragens que têm uma alta probabilidade de ruptura e que possam resultar em perda de vidas. Deve ser executada por engenheiros tecnicamente qualificados, experientes na operação e manutenção de barragens e treinados para reconhecer condições anormais. Os inspetores devem ter acesso e estarem familiarizados com toda a documentação permanente, especialmente os históricos de operação e manutenção da barragem, e devem ser responsáveis, e estar intimamente familiarizados, com as características operacionais da barragem. Os operadores da barragem devem ser participantes dessas inspeções (ADAMO et al., 2021).

As inspeções formais devem incluir uma revisão de segurança para determinar se as estruturas atendem aos critérios e práticas de projeto aceitos atualmente. Todas as inspeções formais devem ser conduzidas por uma equipe de engenheiros e geólogos altamente especializados e treinados. Listas de verificação devem ser preparadas para cobrir as condições das fundações, características estruturais, elétricas e mecânicas. As inspeções formais devem ser feitas periodicamente em intervalos não superiores a cinco anos (ADAMO et al., 2021).

Atenção especial deve ser dada às inspeções de segurança após um terremoto. Inspeções especiais devem ser realizadas imediatamente após a barragem ter passado por precipitações intensas anormais e após a ocorrência de terremotos significativos, sabotagem ou outros eventos incomuns relatados pelo pessoal operacional. Deve ser realizada sob a direção de engenheiros profissionais licenciados com experiência na

investigação, projeto, construção e operação de barragens, capazes de interpretar o desempenho estrutural e relacionar as condições encontradas aos critérios e aspectos de segurança atuais (ADAMO et al., 2021).

Os tipos, as frequências gerais de inspeções e as análises de segurança devem levar em consideração o tipo de barragem, sua idade e os riscos que apresenta para a população e as infra-estruturas à jusante, inseridas na área de inundação (ADAMO et al., 2021).

2.5 ENVELHECIMENTO DE BARRAGENS

As barragens existentes estão envelhecendo, e grandes barragens já foram construídas sobre os terrenos com melhores condições técnicas (ZUFFO; GENOVEZ, 2008). Estima-se que pelo menos 5.000 grandes barragens em todo o mundo têm mais de 50 anos (MCCULLY, 2001).

Embora as falhas de barragens sejam infrequentes, a idade, deficiências de construção, manutenção inadequada e eventos sísmicos ou meteorológicos contribuem para a probabilidade de um rompimento e seus consequentes danos (LANE, 2006).

No Brasil, as barragens mais antigas ainda em operação datam de meados do século XIX. Algumas destas barragens perderam suas funções ao longo do tempo, sem que tenham sido devidamente desativadas. Outras, mesmo cumprindo ainda seus objetivos, passaram por várias sucessões de responsáveis, perdendo-se no tempo o vínculo de responsabilidade sobre sua manutenção e operação, enquadrando-se hoje no grupo das "barragens abandonadas" ou "barragens órfãs" (ZUCULIN, 2012).

Lane (2006), discutindo sobre a segurança de barragens nos EUA diz que existem preocupações de que estados, governos locais, e outros proprietários de barragens não federais americanas possam não ter os recursos financeiros para manter e reabilitar suas barragens. E em nosso país, esta afirmação também é verdadeira (ANA, 2021b).

Sejam em barragens de concreto, terra ou enrocamento, os materiais têm seu processo de envelhecimento natural. Quando se trata de materiais naturais como terra e rochas, o processo de decomposição parece ser demasiadamente vagaroso. A decomposição, ou intemperização, de uma rocha pode demorar centenas de anos. Mas quando esses materiais são manipulados, processados, compactados, rearranjados, de acordo com as necessidades de construção, suas propriedades são alteradas. Apesar de a decomposição química ser lenta, o arranjo dessas novas estruturas irá se modificar ao decorrer do tempo, devido às solicitações impostas ou às intempéries sofridas (LAMBE; WHITMAN, 1991).

Se tratando de barragens, a mudança no arranjo estrutural dos materiais de

construção devido a intemperização pode significar grande perda de material, por galgamento por exemplo, e danos de grande dificuldade de reparação, com conseqüente diminuição do nível de segurança global da estrutura. Para evitar que danos permanentes e conseqüências catastróficas ocorram em obras como estas, é necessário mudar o horizonte de tempo a se considerar no planejamento e projeto básico. Ao invés de 100 ou 150 anos de vida útil para barragens, considerar a sua perpetuidade é a melhor maneira de desenvolver um projeto onde seus benefícios seriam constantes e renovados periodicamente.

Apesar do que já foi comentado, as barragens envelhecidas constituem uma fonte de ameaças devido à sua degradação e ao estado de deterioração dos seus materiais. A segurança dessas barragens deve ser revisada regularmente, e todos os reparos e ações corretivas necessários devem ser aplicados prontamente, ou se isso parecer pouco prático ou não econômico, então elas devem ser desativadas imediatamente. Essas decisões técnicas e gerenciais devem ser conduzidas por pessoal competente, sejam engenheiros de projeto, operadores ou proprietários de barragens (ADAMO et al., 2020).

Em barragens de concreto, o exame da resistência do concreto é um parâmetro importante a ser verificado, especialmente em barragens mais antigas. A realização de testes não destrutivos pode revelar redução da resistência do concreto, portanto, testes de extração de testemunhos para confirmar a integridade da barragem devem ser realizados (ADAMO et al., 2021).

Deterioração do concreto, reação álcali-agregados, rachaduras ou lascamento (mais característico em barragens mais antigas), abertura de juntas, infiltração de água, rachaduras devido ao congelamento e descongelamento da água, ação de detritos suspensos na água, erosão de elementos sujeitos à fluxo de alta velocidade e problemas gerados por cavitação são exemplos de manifestações patológicas que estão cada dia mais presentes nas nossas barragens de concreto (ADAMO et al., 2021).

Nas barragens de terra, as estruturas em aterro necessitam de trabalhos de manutenção essencialmente direcionados ao controle da percolação e erosão a fim de prevenir-se a deterioração do maciço e/ou fundação, e o desenvolvimento de caminhos preferenciais de percolação. Os programas de manutenção periódicos para estruturas em aterro devem incluir a manutenção regular da instrumentação, da crista e do enrocamento; o controle desde a vegetação até as tocas de animais; estabilização de taludes; manutenção dos sistemas de drenagem e a remoção de entulhos a montante, a fim de garantir-se a segurança da estrutura (BRASIL, 2002).

Ao longo do tempo, a estrutura de uma barragem de terra pode assumir características anisotrópicas. Pressões internas e caminhos de percolação podem se

desenvolver, mas normalmente as mudanças são lentas e não são prontamente identificadas por um exame visual. O monitoramento contínuo do desempenho assegurará a detecção de falha que possa conduzir a uma ruptura (PEREIRE, 2020). Essa atividade deve ser feita por equipe experiente, que conheça os sinais de perigo, de acordo com o documento "Avaliação de Segurança de Barragens Existentes"(ELETROBRAS, 1987), que é uma tradução do SEED, *Safety Evaluation os Existing Dams*, (US DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 1987).

Na reavaliação de segurança de uma barragem é importante a detecção de modificações, ou indicações de mudanças iminentes e do desenvolvimento de fragilidades estruturais e hidráulicas. As fragilidades ou deficiências podem ser identificadas pelas alterações no comportamento da estrutura das fundações, das interfaces entre diferentes materiais ou das percolações (BRASIL, 2002).

Pela complexidade abordada neste trabalho, é preciso ter em mente que as barragens têm um longo ciclo de vida e mais de uma geração de engenheiros terá que lidar com elas. Para os engenheiros de segurança de barragens, um dos requisitos é que eles precisam estar familiarizados com a instalação relevante por pelo menos três anos (ZENZ; OBERNHUBER; CZERNY, 2012), portanto é necessário treinamento contínuo dos responsáveis.

Pelo fato de haver um período de adaptação profissional, deve haver tempo suficiente para a transição do engenheiro de segurança da barragem para o seu sucessor, ou entidades responsáveis, o que exige um planejamento adequado de recursos humanos dentro da empresa (ZENZ; OBERNHUBER; CZERNY, 2012).

2.6 RUPTURAS DE BARRAGENS

Segundo ELETROBRAS (2003), as barragens podem romper por diversas causas, entre elas:

- Rompimento de um dos taludes da barragem, montante ou jusante;
- Ruptura da fundação, como por exemplo, fratura de rocha, deslizamento de camadas;
- Galgamento, normalmente por evento hidrológico extremo;
- Ruptura por entubamento ("*piping*"), em função de falhas no corpo da barragem;
- Ações de guerra ou terroristas.

Em barragens adequadamente projetadas e executadas, devido aos coeficientes de segurança utilizados em projeto, pode-se dizer que não há apenas uma falha

isolada que ocasione a ruptura de uma barragem, e sim um conjunto de sucessivas falhas que culminam no resultado indesejado. Assim sendo, Kochen (2016) aponta as principais causas da falta de segurança no projeto, construção e operação de barragens como sendo:

- O não reconhecimento da situação hidrogeológica e geotécnica, devido a insuficiência dos estudos geológicos, geotécnicos e hidrológicos;
- A falta de planejamento, controle e gerenciamento das obras;
- A ausência de inspeção e manutenção; e,
- A subestimação dos riscos, ou seja, não considerar a possibilidade de acidentes e/ou de rupturas.

O estudo de histórias de casos de rompimento de barragens ajuda a entender por que as barragens falharam e a enfatizar o cuidado ao lidar com barragens existentes, a fim de aumentar sua segurança e reduzir seus riscos para as áreas a jusante (ADAMO et al., 2020).

2.6.1 Histórico mundial

Estima-se que, em todo o mundo, existiam, em meados da década de 2000, mais de 40.000 barragens de grande porte (RIVERS, 2007). Atualmente, estima-se que ocorreram aproximadamente 4.000 rupturas de grandes barragens em 84 países, sem contar com a China (REGAN, 2010).

Cuiyun et al. (2010) descobriu que, na mesma época, houve perto de 4.000 rompimentos de barragens na China desde 1954. Outras 37.000 barragens eram classificadas como perigosas (a China alerta que barragens defeituosas planejam reparos para o ano de 2008). Além de ter tido o maior número ou registros de rompimentos de barragens, o evento de rompimento de barragens mais destrutivo da história também vem da China na barragem de Banqiao, em 1975. O colapso da barragem de Banqiao levou a um efeito cascata que resultou no colapso de 60 outras barragens a jusante. As inundações resultantes mataram mais de 80.000 pessoas, e outras 200.000 morreram durante as epidemias que se seguiram e a escassez devido às inundações (MCCULLY, Patrick, 2005). Estima-se que cerca de 11 milhões de pessoas foram deslocadas devido a este único evento.

Além disso, uma série de rupturas catastróficas ocorreram a partir de 1950, e diversos países começaram a pensar na segurança de barragens, mas este processo foi lento. Nos EUA, somente após a ruptura da barragem de Teton, em 1976, que o governo federal dos Estados Unidos, através do USBR, deflagrou o programa de

estudos para suportar o planejamento e a implantação do sistema de segurança de suas barragens (PEREIRE, 2020).

O rompimento da barragem Teton, em 1976 em Idaho, nos EUA, é outro famoso estudo de caso de rompimento de barragens. Embora as fatalidades neste caso tenham sido baixas (11 mortes), isso levou a cerca de \$ 2 bilhões de dólares em danos materiais (USBR, T. D. F. R. G., 1977).

O programa de estudo sobre segurança de barragens, realizado pelo USBR (JANSEN, 1983), publicado com o título "*Dams and Public Safety*", permitiu concluir que 59% dos acidentes foram atribuídos a causas geológico-geotécnicas, 23% ocorreram por causas hidrológicas-hidráulicas e 12% foram devido a falhas de construção diversas, seja no tratamento das fundações, seja na escolha dos materiais, seja na compactação dos aterros. Essas três causas corresponderam a 94% dos acidentes. Os outros 6% decorreram de atos de guerra (3%), operação inadequada (2%) e terremotos (1%). Os números do USBR corroboram e ressaltam a complexidade das questões geológico-geotécnicas e hidrológicas.

Na Figura 11 são apresentados dados de frequência de rupturas em função dos anos de vida útil das barragens na ocasião de sua ruptura, com base nos dados relatados em (SERAFIM, 1981). É possível observar que o maior número de rupturas aconteceu ainda na fase de construção das barragens.

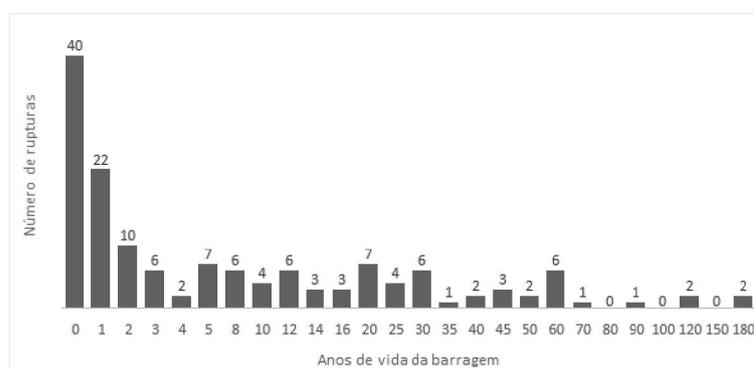


FIGURA 11 – Anos de vida *versus* Número de rupturas. Fonte: adaptado de Serafim (1981)

O Boletim 99 da *International Commission on Large Dams* (ICOLD), ICOLD (1995), relata, entre outras informações, que 70% das rupturas ocorreram em um período de cheias e a operação inadequada, nesses casos, foi responsável por 20% das rupturas. Relata, também, que para as barragens de terra, os três principais tipos de ruptura eram: galgamento (40%), erosão interna (39%) e ruptura estrutural (21%). Ainda para barragens de terra, 66% das causas de ruptura eram causadas, até a publicação, por deficiências geotécnicas e 28% são devidas a "vertedouros inadequados".

No que diz respeito às estatísticas, os dados da ICOLD (ICOLD, 1995) mostram

que 2,2% das barragens construídas antes de 1950 romperam. Esse percentual diminuiu para 0,5% após 1950. Segundo Serafim (1981), a taxa decenal (anos 1970) de ruptura de barragens era de 0,17%. Dados mais recentes indicam que esse percentual vem caindo ainda mais, o que indica que o nível de segurança dessas estruturas vem aumentando significativamente (PEREIRE, 2020).

As conclusões que podem ser tiradas dos estudos de rompimento de barragens podem ser resumidas como (ADAMO et al., 2020):

- O modo de falha, seja repentino ou demorado, contribui para o número de fatalidades;
- A População em Risco (PeR) é um dado muito importante, pois a alta população na planície de inundação exposta ao perigo de afogamento aumenta o número de fatalidades;
- Avisar a PeR em um tempo muito curto ou não fazê-lo aumenta o número de fatalidades e vice-versa.

Na América do Sul, 57% de todas as barragens têm mais que 30 metros de altura e, em 52% delas o reservatório é maior que 100 milhões de m^3 . A média mundial para a mesma capacidade de reservação é de 59%. Estima-se que cerca de 2.000 rupturas vem ocorrendo desde o século XII e 200 reservatórios importantes romperam entre 1900 e 1980 (MCCULLY, 2001). Quase 2/3 das grandes barragens do continente estavam no Brasil até o início do século XXI (WCD, 2001).

2.6.2 Histórico nacional

No Brasil, a década de 70 foi marcada por grandes obras de barragens e empolgação (anos dourados ou do milagre brasileiro), com as implementações focadas em hidrelétricas. Poucos dedicaram tempo ou tiveram oportunidade de enxergar as barragens do outro setor, também em franco crescimento e voltado para o atendimento do aumento da demanda por água para abastecimento e irrigação. Neste setor, as equipes também ousaram, construindo grandes barragens e também, pequenas barragens, mas com grandes problemas e carentes de recursos técnicos e financeiros (MEDEIROS, 2012).

O pior acidente, em termos de perdas de vida, ocorrido no país foi em 1960 na barragem de Oróz. Uma precipitação inesperada durante a construção causou o galgamento da barragem. Lugares a mais de 75 km de distância sofreram com o desastre e 1.000 pessoas perderam suas vidas, além de acontecerem incontáveis perdas econômicas e ambientais (JANSEN, 1983).

Os principais acidentes e incidentes registrados no período de formulação e tramitação da Lei No. 12.334/10 foram: Cataguases - MG (2003), Camará – PB (2004), Campos Novos - SC (2006), Miraí – MG (2007), UHE de Apertadinho – RO (2008), PCH Espora – GO (2008), Algodões I – PI (2009), PCH Bocaiuva (2010) e dezenas de barragens na região no nordeste (KANJI, 2004; SILVEIRA, J. d., 1999; SILVEIRA, J. F. A., 2001; USBR, 2003).

2.6.3 Análise de riscos

A classificação das barragens de acordo com seus riscos e danos potenciais não depende apenas da própria estrutura da barragem, mas também está ligada à natureza da planície de inundação a jusante; sua topografia e sua extensão (ADAMO et al., 2020).

As abordagens baseadas em risco para a análise de segurança de barragens foram apresentadas pelo ANCOLD em 1994, por meio da Diretriz de Gerenciamento de Segurança de Barragens, que foi posteriormente revisada em 2003. As abordagens baseadas em risco também foram introduzidas pela *United States Society on Dams* (USSD) em 2003, em um White Paper sobre Avaliação de Risco de Segurança de Barragens. Além disso, o ICOLD publicou seu Boletim 130 em 2005, incluindo conceitos como o critério *As-Low-AsReasonably-Practicable* (ALARP) e o indicador *Cost-Per-Statistical-Life-Saved* (CPSLS) .

Existem várias metodologias para análise de risco disponíveis na literatura, as principais estão relacionadas na Tabela 11, ordenadas da mais simples a mais complexa. Análises baseadas em índices de riscos e matrizes de classificação permitem uma classificação das estruturas sem necessidade de informações muito datalhadas, e por isso são comumente utilizadas pelos órgãos fiscalizadores de segurança de barragens. Já as baseadas na metodologia FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) permitem um incremento importante no conhecimento estruturado do sistema e desempenho da barragem em análise. E os métodos quantitativos são cientificamente mais consistentes, explicitando incertezas e baseando-se em valores numéricos da probabilidade e consequência (MELO; FUSARO, 2015).

TABELA 11 – Métodos de análise de risco

	Método	Descrição
	Índice Global de Risco Índice de Lafitte Metodologia SABESP Potencial de Risco Metodologia CEMIG Clacificação CNRH	Simplificado Análises preliminares Estabelecimento de prioridades Menos detalhadas
Qualitativas	Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)	Permite vizulização de probabilidade e consequência Permite classificar os modos de falha
	Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e sua Criticidade (FMECA)	Permite vizulização de probabilidade e consequência Permite identificar os modos de falha mais críticos
	Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI)	Variante do FMEA Indica consequência, probabilidade e grau de confiança
	Outros	
Quantitativas	Análise por Árvore de Eventos (ETA)	Relaciona eventos mensura efeitos e consequências Dificuldade na quantificação de probabilidades Abordagem mais utilizada atualmente
	Análise por Árvore de Falhas (FTA)	Análises pós-acidente Dificuldade na quantificação de probabilidades

Fonte: adaptado de Melo e Fusaro (2015)

Castillo-Rodriguez, Morales-Torres e Escuder-Bueno (2013) relaciona os benefícios de incorporar técnicas de análise de risco à gestão da segurança de barragens. Esses benefícios incluem, entre outros:

- Melhor compreensão do sistema de barragens (conhecimento mais profundo da barragem, identificação de lacunas de conhecimento, análise de incertezas, etc.).
- Melhores decisões (priorização de investimentos, incluindo eficiência e princípios de equidade).
- Melhor comunicação de risco (para educação e conscientização pública).
- Informações melhoradas para operação e manutenção de barragens.
- Melhores procedimentos de emergência e planos de gerenciamento de risco de inundação.

- Boa governança de barragens (as decisões são justificadas, defensáveis e transparentes).
- Os riscos do negócio são conhecidos, aumentando a sustentabilidade do negócio a médio e longo prazo.

A aplicação de técnicas de análise de risco fornece uma estrutura lógica para melhor compreensão do próprio sistema de barragens. As informações de inspeção e monitoramento, operação e manutenção, regras operacionais, planos de ação emergencial, etc. são revisadas, discutidas, atualizadas e, em uma etapa quantitativa, incorporadas ao modelo de risco representativo do sistema (CASTILLO-RODRIGUEZ; MORALES-TORRES; ESCUDER-BUENO, 2013).

A avaliação dos impactos e os padrões de um projeto para um barragem segura andam em conjunto. Os elementos de projeto (como por exemplo, altura e localização da barragem) determinam a escala e a natureza do impacto na geografia e demografia local (por exemplo, área total submersa e a resultante perda de habitat). Por sua vez, o projeto é determinado pelo custo de construção mais a magnitude dos impactos negativos ponderados contra os benefícios do projeto (NIPFP, 2021).

2.6.3.1 Quantificação do risco

O conhecimento das fontes de riscos para a segurança é necessário no desenvolvimento de estratégias de minimização de riscos nas várias fases da vida de uma barragem. É essencial que a gestão do projeto, construção e operação assegure que as incertezas sejam adequadamente balanceadas com julgamento técnico competente (FUSARO, 2012).

Risco é o valor obtido a partir da consideração quantitativa das possíveis consequências (para a saúde, para a propriedade ou para o meio ambiente) de um evento indesejável, e da probabilidade de ocorrência associada a este evento (PINTO, 2008). É estimado por expectativas matemáticas das consequências de um evento adverso.

O risco de um determinado evento E , geralmente associado à situações negativas, pode ser definido como o produto da probabilidade (ou frequência de ocorrência) do evento, pelas consequências do evento:

$$risco(E) \equiv P(E) \times C(E) \quad (2.2)$$

sendo $P(E)$ a probabilidade de ocorrência do evento e $C(E)$ uma medida das consequências geradas pela ocorrência deste evento.

O referido evento pode ser a falha de uma barragem, objeto de estudo deste trabalho. A ocorrência da falha em uma barragem é indesejada e pode ser estudada através do problema de confiabilidade fundamental.

A quantificação das consequências do evento negativo pode ser uma tarefa complexa, pois nem sempre está associada a um custo monetário, mas a perda de vidas, danos físicos ou impactos ambientais, por exemplo.

A classificação de probabilidade de falha de barragem é baseada na teoria da probabilidade que é amplamente usada nas áreas aeroespacial, militar e outros campos. (ZHOU et al., 2015) resume o processo de classificação de risco de barragens e ações de gestão através do fluxograma apresentado na Figura 12.

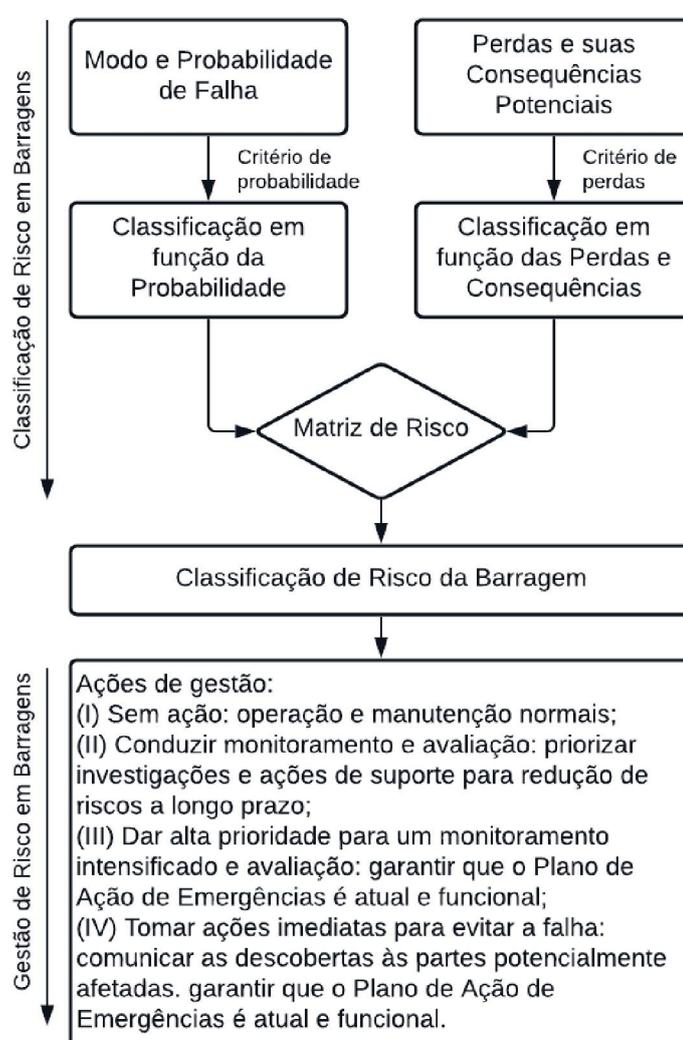


FIGURA 12 – Processo de classificação de risco de barragens e ações de gestão. Fonte: Zhou et al. (2015)

O critério de aceitabilidade de um risco pode ser expresso por:

$$risco = pn^{\alpha} = constante \quad (2.3)$$

sendo p a probabilidade ou frequência, geralmente anual, da ocorrência do evento, n é o número potencial de vítimas e α é o coeficiente de aversão ao risco.

Quando o coeficiente de aversão ao risco tem o valor -1 ocorre a equivalência entre eventos com altas probabilidades, mas baixas consequências e eventos com baixa probabilidade, mas altas consequências. Portanto, o risco tolerável pode estar associado a essas duas condições, e deve ser definido pela sociedade, variando entre países ou regiões.

A Figura 13 ilustra critérios de tolerabilidade ao risco social na Inglaterra e Holanda, bem como em alguns estados brasileiros (SP, RJ e RS). A Holanda utiliza apenas uma curva, que divide riscos intoleráveis (parte superior) dos riscos toleráveis (parte inferior). Na região tolerável, os riscos devem ser tão baixos como razoavelmente praticável (princípio ALARP, do inglês "*As Low As Reasonably Practicable*"). No Reino Unido (UK) e nos estados brasileiros de SP, RJ e RS são utilizadas duas curvas. A curva inferior limita a região dos riscos ditos "aceitáveis" ou "aceitáveis com reservas". A região entre as curvas é a região ALARP.

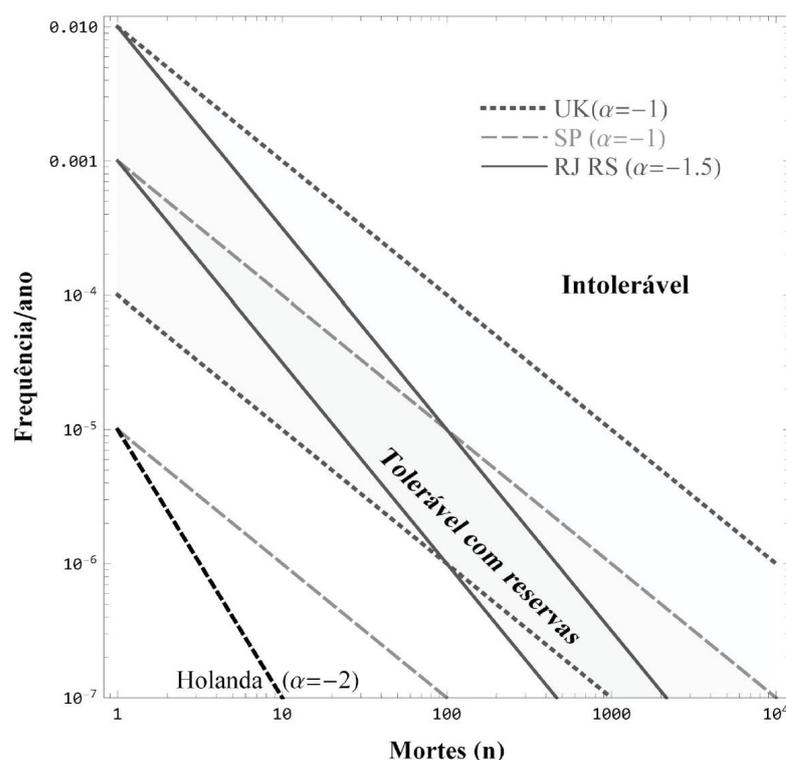


FIGURA 13 – Curvas de tolerabilidade ao risco social na Inglaterra e Holanda, e nos estados de SP, RJ e RS. Fonte: Beck (2019)

A Holanda é um dos países mais restritivos em relação aos riscos utilizando $\alpha = -2$ que significa uma forte aversão aos riscos com grande número de vítimas potenciais, e tem início em 10^{-5} , mostrando uma pequena tolerabilidade aos riscos individuais. No Brasil, ainda não existe uma curva de risco social aceita nacionalmente, mas curvas internacionais são observadas. Para o contexto de barragens, os critérios propostos pelo ANCOLD estabelecem uma boa premissa. A Figura 14 representa o risco coletivo tolerável segundo ANCOLD.

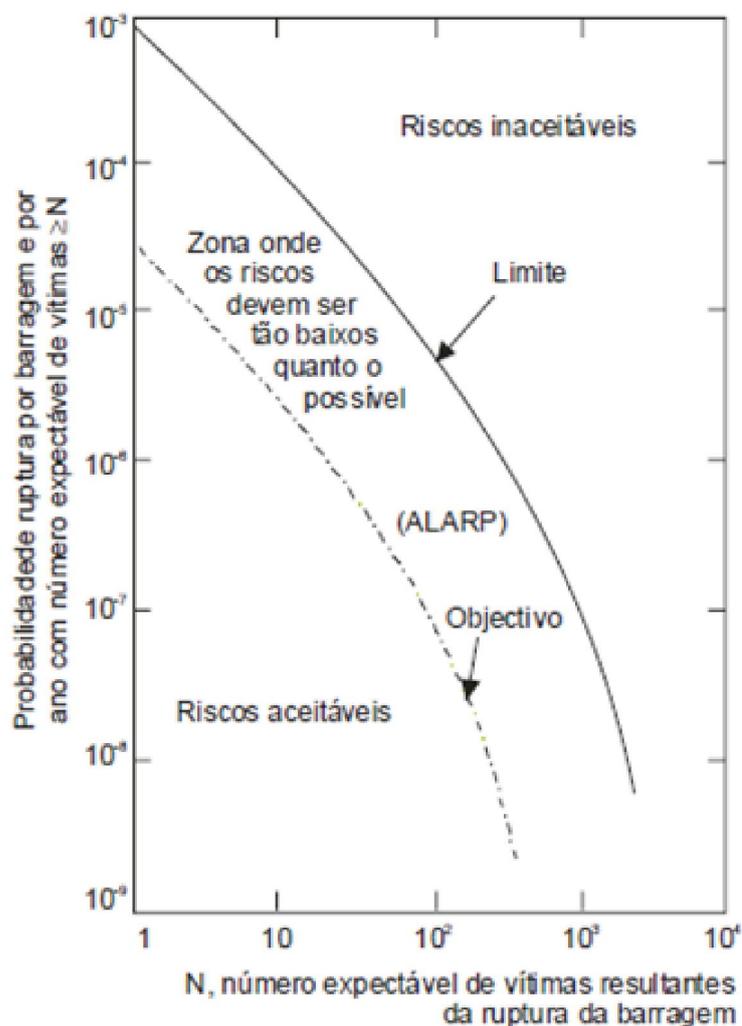


FIGURA 14 – Critério RSA de ANCOLD. Fonte: Comitê Australiano de Grandes Barragens ANCOLD (2003)

De acordo com a Figura 14 os valores aceitáveis de risco para uma barragem são de $1/10^{-6}$. Ou seja, em uma população de barragens de 1.000.000 de empreendimentos, há probabilidade de que uma delas venha a romper a cada ano.

A apreciação do risco deve compreender o processo de ponderação e de julgamento do significado do risco. É um campo em que se entra no domínio da aceitabilidade e tolerabilidade do risco e, portanto, é um dos aspectos mais controversos

da gestão dos riscos. A aceitabilidade do risco parece variar significativamente com a condição socioeconômica do local onde a barragem se insere (PINTO, 2008).

Beck (2019) ressalta que o princípio ALARP pressupõe que a aprovação de uma empreendimento seja baseada em uma análise quantitativa de riscos, na qual seja demonstrado que todas as medidas "razoavelmente praticáveis" para a redução de riscos foram adotadas. O "razoavelmente praticável" implica, por exemplo, em uma análise de custo-benefício, na qual se demonstre que medidas adicionais de redução de riscos seriam economicamente inviáveis. Tal análise está baseada no princípio que, à medida que o risco diminui, torna-se cada vez mais caro diminuí-lo.

De forma resumida, uma análise quantitativa de riscos para demonstração do princípio ALARP envolve:

- Análise de custo-benefício, que demonstre que o ponto de risco mínimo foi atingido;
- Demonstrar a aplicação das melhores práticas em cada atividade;
- Demonstrar a eficiência das medidas de redução e mitigação de riscos adotadas;
- Demonstrar a redução tanto das probabilidades de ocorrência dos eventos perigosos como das suas consequências.

Com a complexidade envolvendo a tolerabilidade de um evento, a construção de uma matriz de risco pode auxiliar a tomada de decisão, como é exemplificado pela Tabela 12.

TABELA 12 – Exemplo genérico de uma matriz de risco

RISCO MODERADO Evento grave Probabilidade baixa	ALTO RISCO Evento grave Probabilidade moderada	ALTO RISCO Evento grave Probabilidade alta
BAIXO RISCO Evento sério Probabilidade baixa	RISCO MODERADO Evento sério Probabilidade moderada	ALTO RISCO Evento sério Probabilidade alta
BAIXO RISCO Evento menor Probabilidade baixa	BAIXO RISCO Evento menor Probabilidade moderada	RISCO MODERADO Evento menor Probabilidade alta

Fonte: adaptado de Beck (2019)

Sendo a classificação de gravidade de evento:

- Evento minoritário: impacto inicialmente limitado à pequena área de atuação, mas com potencial para consequências maiores na falta de ação corretiva;
- Evento sério: evento que pode causar lesões sérias ou morte ou danos materiais maiores que US\$5 milhões;
- Evento grave: evento cinco ou dez vezes maior do que um evento sério.

E para as probabilidades de ocorrência do evento:

- Baixa ($P(E) < 10^{-4}/\text{ano}$): uma ou mais falhas com probabilidade muito pequena de ocorrência dentro da vida útil projetada;
- Moderada ($10^{-4} < P(E) < 10^{-2}/\text{ano}$): uma ou mais falhas com pequena probabilidade de ocorrência dentro da vida útil projetada e
- Alta ($P(E) > 10^{-2}/\text{ano}$): pode-se esperar que uma falha aconteça durante a vida útil projetada.

Desta maneira os riscos podem ser classificados em:

- Alto risco: riscos nesta faixa provavelmente são inaceitáveis e devem ser eliminados ou atenuados;
- Riscos moderados: riscos que devem ser controlados e, se possível, eliminados e
- Baixo risco: estes riscos provavelmente são aceitáveis e continuarão assim mesmo que o nível de riscos tolerável seja reduzido. A localização desta zona depende daquilo que o público, governo e empregados entendem como aceitável ou tolerável (risco social).

Essas quantificações, no entanto, não são alternativas completas. A avaliação de segurança de uma barragem requer uma avaliação de riscos e exposição, que por sua vez requer uma análise de rompimento de barragem para cada barragem existente (NIPFP, 2021).

Apesar dos avanços obtidos com segurança de barragens, ainda não dominamos o conhecimento sobre os mecanismos que conduzem aos incidentes e acidentes com ruptura em barragens (MEDEIROS, 2012).

O principal perigo apresentado pelo rompimento de uma barragem é a inundação nas áreas imediatamente a jusante. No entanto, uma vez que as barragens são

freqüentemente construídas em cascatas, o rompimento de uma barragem também pode causar o rompimento de uma barragem a jusante (NIPFP, 2021).

À metodologia para a definição das áreas de inundação, a ser utilizada de forma generalizada e sem prejuízo do método de simulação de rompimento também dá-se o nome de “dambreak”, e ainda deve ser objeto de resolução específica dos órgãos fiscalizadores de barragens (MEDEIROS, 2012).

O governo da Índia propôs, em 2021, um protocolo de análise de falha para barragens, que é composto por 4 passos (NIPFP, 2021):

- Definir as condições iniciais: a primeira etapa envolve a identificação das condições iniciais. Por exemplo: Tipo de barragem, nível de reservatório cheio, capacidade do vertedouro, armazenamento morto, inundação de fluxo de projeto e nível de sedimentação na barragem.
- Definir os parâmetros de violação: esta etapa envolve definir os parâmetros para descrever a violação. Por exemplo: nível de água e inundação de fluxo no momento da violação, e tamanho, forma e localização da violação.
- Modelo de rota de inundação: envolve a execução de simulações para modelar o volume, velocidade e altura da onda de inundação à medida que se move a jusante. A saída imediata é uma representação do momento da onda de inundação usando gráficos e tabelas (juntos, conhecidos como hidrograma). O tempo de retenção da água da inundação em cada zona de descida é outro resultado importante.
- Análise de consequências: os resultados do modelo de rota de inundação são sobrepostos em um mapa de habitações a jusante para gerar mapas de inundação. O mapa de inundação é usado para identificar áreas sujeitas a risco (correspondendo a diferentes tipos de eventos dados como entrada), e o impacto provável de diferentes tipos de eventos de rompimento de barragens.

Os modelos para simulação do escoamento em caso de ruptura da barragem podem ser divididos em cinco tipos, por ordem crescente de precisão (BALBI, 2012):

- Modelos simplificados;
- Modelos hidrológicos;
- Modelos hidrodinâmicos 1D;
- Modelos hidrodinâmicos 2D; e
- Modelos físicos 3D.

Segundo (ALMEIDA, 2001), a escolha do modelo deverá depender das características específicas de cada caso, incluindo a complexidade e ocupação do vale a jusante, a importância da barragem, a escala do levantamento topográfico de base e do mapeamento das áreas inundáveis, entre outras.

FERC (2007) recomenda a utilização de modelos que utilizam métodos de escoamento não-permanente e de propagação dinâmica, como o HEC-RAS, do USACE.

Os estudos para a avaliação dos danos potenciais associados gerados pelo rompimento das barragens através de simulação e análise da propagação de ondas de cheias tem por objetivo a determinação de áreas inundáveis, na ocorrência de um evento de rompimento e/ou liberação compulsória de grande volume de água; elaboração de mapas de inundação, a indicação das áreas de risco de inundação, com destaque para as aglomerações populacionais e infraestrutura, a indicação das áreas de risco para os meios de transporte: estradas, obras de arte, etc (MEDEIROS, 2012).

O resultado principal das simulações de ruptura de barragem é fornecer dados para o mapeamento das áreas potencialmente inundáveis no caso de uma ruptura. Para as próximas etapas de mapeamento é necessário que o modelo hidráulico adotado forneça os seguintes elementos por seção do curso d'água (BALBI, 2012):

- Cotas máximas atingidas e respectivo tempo de ocorrência;
- Tempos de chegada da frente de onda;
- Velocidade da propagação, pelo menos por trecho da seção, planícies de inundação e canal principal; e
- Duração da inundação.

No Guia de Segurança de Barragens (CBDB, 1999) é apresentada a Tabela 13 com a proposta de frequência das reavaliações de ruptura, em função do risco da obra.

TABELA 13 – Frequência de Reavaliação da Ruptura de uma Barragem.

Consequência da Ruptura	Período entre Reavaliações
Muito alta	5 anos
Alta	7 anos
Baixa	10 anos
Muito baixa	10 anos

Fonte: CBDB (1999)

Outros fatores importantes a esse respeito são o nível de ocupação da planície de inundação pelas pessoas e quantas delas estão diretamente expostas ao perigo de afogamento (ADAMO et al., 2020).

O Ministério da Integração Nacional (MI) publicou o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, em 2002, contendo normas de construção, operação e manutenção das barragens, assim como, os procedimentos necessários em casos de emergências. Um ponto de destaque do manual é sua preocupação com as consequências ao meio ambiente, com a destruição da fauna e flora, em caso de acidente e, principalmente, a necessidade de capacitação das equipes envolvidas com a operação e manutenção. No manual MI/PROÁGUA são utilizados os seguintes parâmetros, para a obtenção do potencial de risco da barragem (MI, 2002; FONTENELLE et al., 2005; FONTENELLE, 2007):

- Importância (I) - que inclui o valor estratégico associável à barragem no caso de ruptura;
- Grau de Periculosidade (P) - um conjunto de parâmetros ou características técnicas do projeto que, pela sua magnitude, permitem retratar o potencial de risco inerente ao empreendimento;
- Grau de Vulnerabilidade (V) - envolvendo aspectos relacionados com o estado atual da barragem, com a sua história e com a operacionalidade e/ou facilidade de manutenção de suas estruturas hidráulicas;
- Potencial de Risco (PR) - que enquadra a barragem segundo o nível de risco à sua segurança.

Pode-se dizer que a perda de vidas é influenciada pelos seguintes fatores (ADAMO et al., 2020):

- O número de pessoas ocupando a planície de inundação do rompimento da barragem;
- A gravidade da inundação;
- O tempo disponível para alertar as pessoas sobre as enchentes que chegam; e
- O grau de preparação para lidar com tal emergência.

Não é possível eliminar a probabilidade de falha e trazê-la para o valor zero, porém, é mais importante proteger a população a jusante até o limite máximo possível, estimando os riscos da barragem e implementar os seguintes procedimentos para reduzir a perda de vidas (ADAMO et al., 2020):

- Zoneamento de inundação da área de inundação potencial;

- Instalação de sistemas de alerta, treinamento dos operadores para estarem vigilantes e atentos para agirem no tempo adequado;
- Elaboração de planos de evacuação de emergência prontos para atender tais eventos.

O procedimento para estimar a perda de vidas devido ao rompimento de barragens foi desenvolvido, em grande medida, nos Estados Unidos e é baseado em dados de rompimentos de barragens dos EUA. Este procedimento, complementado pelas recomendações da FEMA (2004) e FERC (2007) é composto por sete etapas que são (GRAHAM, 1999):

- Etapa 1: Determinação de cenários de rompimento de barragens para avaliar;
- Etapa 2: Decidir as categorias de tempo para as quais são necessárias estimativas de perdas de vida;
- Etapa 3: Determinação de quando os avisos de rompimento de barragens seriam iniciados;
- Etapa 4: Descobrir a área inundada para cada cenário de rompimento da barragem;
- Etapa 5: Estimar o número de pessoas em risco para cada cenário de rompimento de barragem e categoria de tempo;
- Etapa 6: Estimar o número de fatalidades aplicando equações ou métodos com base empírica;
- Etapa 7: Avaliando a incerteza.

O número de pessoas em risco na área de jusante muda de acordo com a estação do ano, a semana e o dia. O grau de ocupação pode variar consideravelmente entre dia e noite.

O mapa de inundação ou outra descrição da área inundada é necessária para cada cenário. E o PeR é definido como o número de pessoas ocupando a planície de inundação do rompimento da barragem antes da emissão de qualquer aviso. Para a avaliação da incerteza, é necessário realizar as seguintes ações:

- Desenvolver estimativas separadas de perda de vidas úteis para cada cenário de rompimento da barragem;
- Presumir que o rompimento da barragem ocorra em vários momentos do dia ou da semana; e

- Definir quando um aviso de rompimento de barragem seria iniciado.

A Tabela 14, elaborada pela (ELETROBRAS, 2003) sugere uma classificação quanto às consequências em caso de ruptura de uma barragem.

TABELA 14 – Classificação segundo a ELETROBRAS (2003) de Barragens quanto às consequências de uma ruptura.

Consequência da Ruptura	Perda de vidas	Econômico, social e danos ambientais^(a)
Muito alta	Significativa	Dano excessivo
Alta	Alguma	Dano substancial
Baixa	Nenhuma	Dano moderado
Muito baixa	Nenhuma	Dano mínimo

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

Fonte: ELETROBRAS (2003)

Apesar dos inegáveis benefícios da construção de uma barragem, esse processo tem como efeito adverso uma série de impactos. Ambientalmente, a construção e, especialmente, a formação do reservatório traz significativos impactos para a região da construção. Define-se que impacto ambiental é qualquer alteração no ambiente de caráter positivo ou negativo causada pela atividade antrópica. Essas alterações podem afetar o ambiente total ou partes do ambiente (meio físico, meio biológico e meio socioeconômico). (SILVA CARVALHO, 2012).

Silva Carvalho (2012) ainda relaciona vários fatores ambientais a serem analisados em projetos de barragens aos quais estão associados impactos potenciais:

- Clima: precipitação, evaporação, umidade, ventos e balanço hídrico a montante da barragem;
- Geologia e geotecnia: aspectos estruturais, potencial sísmico (risco de sismicidade induzida), aquíferos, risco de deslizamento e desmoronamento de rochas;
- Pedologia: tipo de solo, erodibilidade, potencial agrícola e produtivo;
- Geomorfologia: tipo de relevo, morfogênese, potencial de erosão e assoreamento;
- Recursos hídricos: caracterização hidrológica da bacia hidrográfica, disponibilidade hídrica e fontes de sedimentos, quantidade de sedimentos na calha fluvial. Águas superficiais e subterrâneas. Hidrogeologia;
- Fauna: aquática, terrestre, espécies endêmicas, vulneráveis, raras e ameaçadas de extinção. Áreas de abrigo, nidificação, reprodução e migração;

- Flora: aquática, terrestre, fitoplâncton, fitobenton. Espécies endêmicas, vulneráveis, raras e ameaçadas de extinção. Fenologia e fitossociologia;
- Unidades de conservação, reservas legais, áreas de proteção permanente.
- Uso e ocupação do solo;
- Planos diretores e zoneamentos municipais;
- Planos e programas de desenvolvimento regionais;
- Endemias, epidemias, zoonoses, saúde pública;
- Saúde, educação, organização social e política, demografia, geração de renda, setores econômicos, etc. (perfil social e econômico das populações rurais e urbanas);
- Patrimônio cultural, arquitetônico, paisagístico e arqueológico;
- Populações quilombolas, indígenas.

De maneira similar aos aspectos ambientais, as barragens também provocam impactos sociais, quer estes sejam positivos ou negativos. Esses impactos têm relação, principalmente, com o fluxo de pessoas atraídas e removidas em decorrência da construção, ou também remanescentes nas áreas de influência. A criação da barragem, seu reservatório e negócio relacionado, muda a relação das pessoas com o espaço, influenciando a economia local, os empreendimentos, os hábitos, o transporte, entre muitos aspectos (SILVA CARVALHO, 2012).

2.6.3.2 Gestão de riscos

Uma vez que nenhum projeto de engenharia está livre de riscos, os mesmos podem ser gerenciados, minimizados, compartilhados, transferidos ou aceitos (adaptado de Latham et al. (1994) apud Seidenfub (2006)). O conjunto dessas atividades é denominado gestão de riscos, que gerencia probabilidades de ocorrência de acidentes e vulnerabilidade de áreas com dano potencial associado definidas de acordo com a extensão dos danos que podem decorrer em um rompimento, vazamento, infiltração ou mau funcionamento de uma barragem (PINTO, 2008).

Gestão de risco é um conjunto de atividades integradas que engloba a decisão, a mitigação, a prevenção, a detecção, o planejamento de emergência, a revisão e a comunicação dos riscos. É um conjunto de medidas com o objetivo de manter ou reduzir o risco, além de reavaliações periódicas da sua eficácia (PINTO, 2008).

Para Medeiros e Pinto (2014), a gestão de risco engloba etapas como a definição e utilização de critérios de projeto, construção e operação; no cumprimento

de normas técnicas, regulamentos e termos de referência no desenvolvimento dos estudos e projetos nas fases de inventário, pré-viabilidade, viabilidade, anteprojeto, projeto básico e projeto executivo e na definição do PAE. O principal objetivo consiste em mitigar os riscos para as populações e bens a jusante, com base no domínio do conhecimento sobre os fatores de “risco organizacional” e “erro humano”, presentes na concepção de empreendimentos.

Como podemos observar, os itens necessários para uma gestão adequada de riscos está contemplada no dispositivo legal, em especial na fase de operação, com o conjunto de elementos necessários expressos na Figura 15.

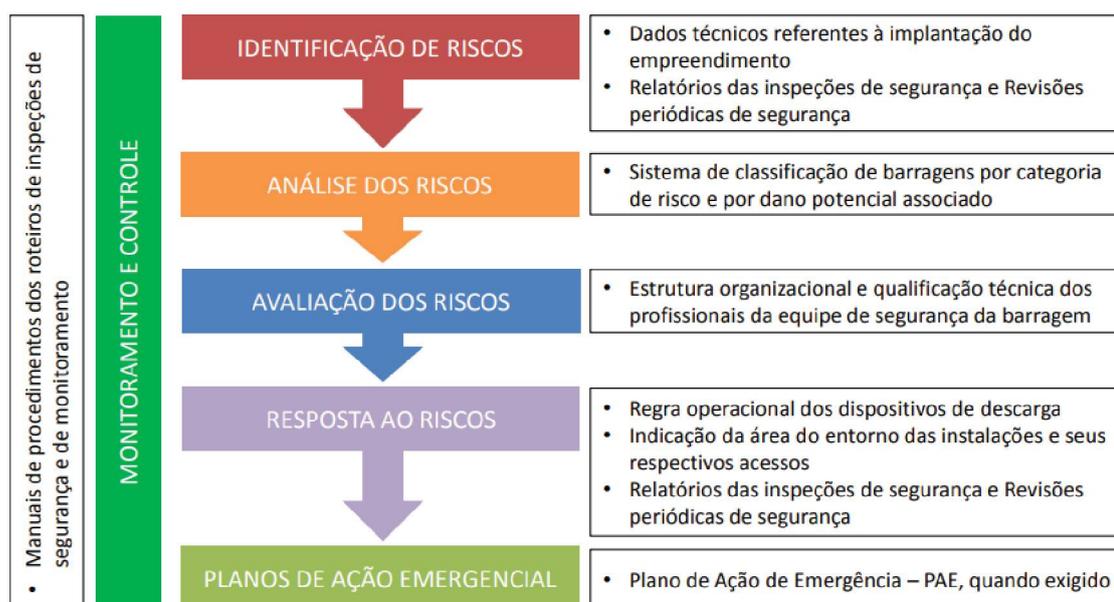


FIGURA 15 – Elementos para gestão de riscos em barragens segundo a PNSB. Fonte: Fusaro (2012)

A Figura 16 ilustra como os investimentos em medidas de segurança têm impacto direto nos custos iniciais (de projeto e construção) e nos custos de inspeção e manutenção. No entanto, esse tipo de investimentos também resultam em uma diminuição acentuada dos custos indiretos associados com as falhas. O nível ótimo de investimentos em medidas de segurança é obtido a partir da solução de um problema de otimização matemática, onde se busca o ponto de mínimo custo esperado total (BECK, 2019).

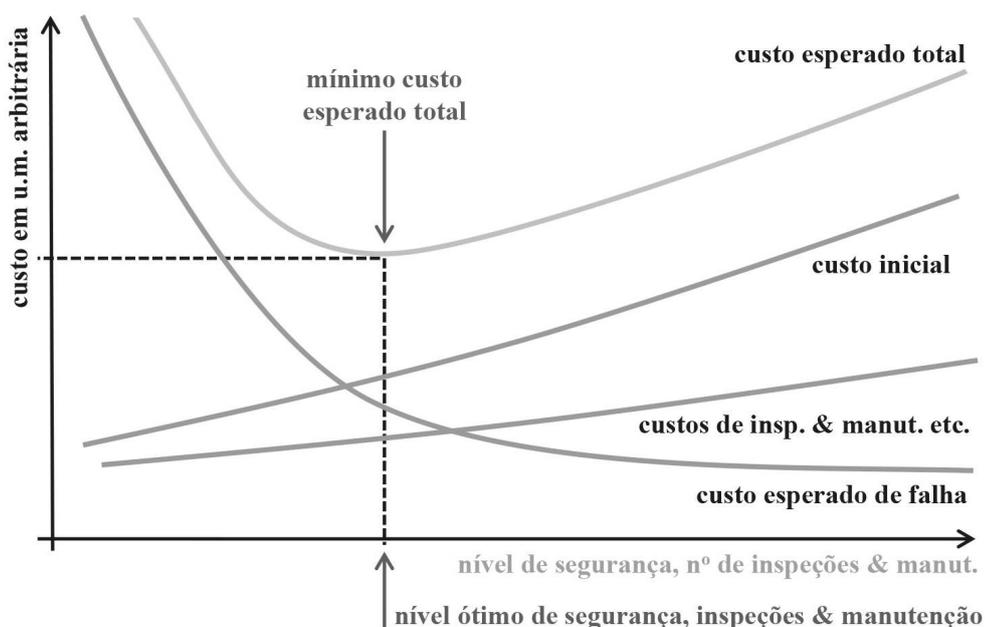


FIGURA 16 – Problema de otimização de custos sobre o ciclo de vida e nível de confiabilidade ótimo. Fonte: Beck (2019)

As Leis 12334/10 e 14066/20, que abordam a PNSB, indicam claramente que a abordagem de risco deve ser utilizada na garantia de segurança das barragens, indicando, inclusive, que o processo deve ser formal e auditável.

A Resolução Nº 144, do CNRH, de 10 de Julho de 2012, estabeleceu que o Plano de Segurança de Barragens (PSB) deve compreender, no mínimo, as seguintes informações (CNRH, 2012):

- Identificação do empreendedor;
- Dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, inclusive, no caso de empreendimentos construídos após a promulgação da PNSB, do projeto como construído, bem como aqueles necessários para a operação e manutenção da barragem;
- Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem;
- Os manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem;
- A regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;

- Indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da barragem e
- O Plano de Ação de Emergências (PAE), quando exigido.

O PSB e o PAE devem estabelecer os procedimentos a serem seguidos pelos proprietários de barragens, em caso de eventos excepcionais ou incidentes que possam evoluir para uma situação de risco a: vidas humanas, propriedades e de danos à jusante (MEDEIROS, 2012).

O PAE estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência, devendo contemplar, pelo menos: identificação e análise das possíveis situações de emergência; procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem; procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação; estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência (CNRH, 2012). De acordo com (BALBI; BARBOSA; SILVA, 2012) a estrutura dos planos deve ser sintética, direta e conter todas as informações necessárias ao gerenciamento da emergência. A segurança do sistema vale-barragem só pode ser garantida por meio da adoção de medidas integradas de gerenciamento de risco e emergências por parte dos responsáveis por ambos os conjuntos do sistema. A Defesa Civil deve identificar mudanças no vale, mantendo o planejamento de emergências para os diversos riscos que ameaçam a população, entre eles, inundações. Dessa forma poderá contar com uma estrutura de resposta integrada permitindo agir com maior eficiência. Na opinião de Cardia e Anderáos (2012), a elaboração de um PAE “adequado” e “completo”, envolve custos elevados, principalmente devido a necessidade de levantamentos topográficos e estudos especiais com simulações de rompimento e de propagação de onda de cheia e geração de mapas de inundação. O PAE deve estar disponível no empreendimento e nas prefeituras envolvidas, bem como ser encaminhado às autoridades competentes e aos organismos de defesa civil.

A respeito das diferenças dos documentos exigidos pela PNSB e suas consequentes regulações, ainda não bem interpretadas, Medeiros (2012) evidencia que o PSB não deve definir o elenco de procedimentos a serem adotados pelo empreendedor, quando da detecção de situação de alerta e de emergência, isso é objeto do PAE, que, por sua vez, é parte integrante do PSB, mas é apresentado em documentação separada e com interpretação independente dos outros itens. O sinal de condição de emergência eventualmente apontado no PSB deve sinalizar a necessidade de melho-

rias nas ações de operação, manutenção e de segurança da barragem; incluído o apoio para a alocação de recursos materiais e/ou humanos (no que tange a qualificação técnica).

A rotina de monitoramento e manutenção possui procedimentos operacionais específicos que devem apontar para o PAE sempre que for detectado um evento não usual ligado à segurança da barragem. O PAE deve estar implementado antes do primeiro enchimento da barragem, quando ela sofre sua primeira grande solicitação, sendo efetivamente testada. O PAE deve ser testado e atualizado periodicamente, garantindo sua eficiência nas diferentes fases da vida da barragem e quando for necessária sua colocação em prática. Trata-se de uma medida não-estrutural de gestão de emergências (BALBI, 2012).

No Brasil, a PNSB não traz definições sobre a estrutura do PAE, mas apenas sobre seu conteúdo, que deve prever pelo menos:

- Identificação e análise das possíveis situações de emergência;
- Procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou condições potenciais de ruptura da barragem;
- Procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados, com indicação do responsável por cada ação, para as situações de emergência; e
- Estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas, em situação de emergência.

Portanto, um PAE deve conter: a identificação dos potenciais eventos ou deteriorações que podem oferecer perigo para a barragem e as formas de os mitigar ou de responder a eles caso ocorram; os mapas de inundação para diferentes cenários de acidentes, que possibilita avaliar os efeitos que o acidente pode trazer caso se concretize, permitindo o adequado planejamento por parte das autoridades de defesa civil; e a definição das responsabilidades para cada ação ou tomada de decisão associada ao fluxo de notificações (BALBI, 2012).

2.6.3.3 Confiabilidade estrutural em barragens

Observando a variabilidade envolvidas no projeto e manutenção de barragens, pode-se estimar a magnitude que os parâmetros de um projeto de engenharia podem estar suscetíveis. Portanto, todos os parâmetros de um projeto de barragem estão sujeitos a incertezas, aleatoriedade e estocasticidade. Desta maneira, é de suma importância que todos os parâmetros contidos em um projeto de engenharia sejam definidos como variáveis aleatórias.

A Figura 17 apresenta esquematicamente a contribuição gerada pelo estudo de problemas complexos cujas variáveis contém incertezas. Evidencia, também, que a análise probabilística de um problema pode ser a maneira mais eficaz de coletar respostas a fim de balizar a tomada de decisão.

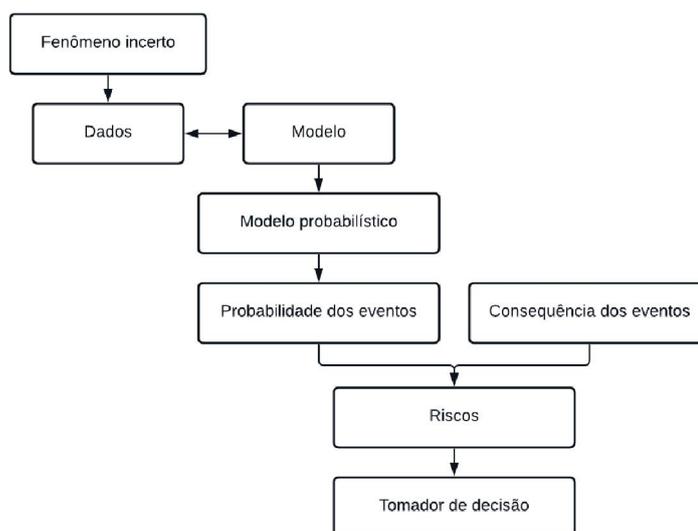


FIGURA 17 – Esquema fundamental da modelagem de incertezas. Fonte: Faber (2003)

A consideração da variabilidade das variáveis envolvidas nas análises de segurança estrutural deu origem aos métodos probabilísticos, chamados de métodos de confiabilidade estrutural. A confiabilidade estrutural preocupa-se com o cálculo da probabilidade de violação do estado limite das estruturas de engenharia em qualquer fase da sua vida (MELCHERS; BECK, 2018).

A ideia da análise de confiabilidade estrutural foi inicialmente introduzida por Freudenthal, Garrelts e Shinozuka (1947). Nos últimos 80 anos, houve muitas contribuições para o desenvolvimento do campo da segurança estrutural, em geral utilizando a teoria da probabilidade, estatística, análise de decisões, lógica difusa e outros métodos relacionados, como detectado já em 2001 (RACKWITZ, 2001).

O problema a ser resolvido pode ser resumido a determinar a probabilidade de que os esforços solicitantes (S) sobre uma estrutura seja maior do que a capacidade de resistí-los (R), ou probabilidade de falha (p_f).

A função de densidade conjunta de probabilidades de R e S , denotada por $f_{RS}(r, s)$, descreve a distribuição de probabilidades destas variáveis no espaço bidimensional RS .

A probabilidade de falha é dada pela probabilidade de que a solicitação (S)

seja maior do que a resistência (R):

$$p_f = P[\{S \geq R\}] = \int_{\Omega_f} f_{RS}(r, s) dr ds \quad (2.4)$$

sendo Ω_f o domínio de falha $\Omega_f = \{(r, s) | r \geq s\}$, limitado pela equação $r = s$.

Por isso:

$$p_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^s f_{RS}(r, s) dr ds \quad (2.5)$$

Se as variáveis R e S forem estatisticamente independentes,

$$f_{RS}(r, s) = f_R(r) f_S(s) \quad (2.6)$$

E, portanto:

$$p_f = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(s) \left[\int_{-\infty}^s f_R(r) dr \right] ds = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(s) F_R(s) ds \quad (2.7)$$

sendo $f_S(s)$ a função marginal de densidade de probabilidade da solitação e $F_R(s)$ a função marginal de distribuição cumulativa de probabilidades da resistência.

A probabilidade de falha é a área sob a curva $f_S(s)F_R(s)$, proporcional à área de interferência entre as distribuições de R e S , conforme a Figura 18. Por este motivo, este problema é também conhecido como problema de interferência entre populações.

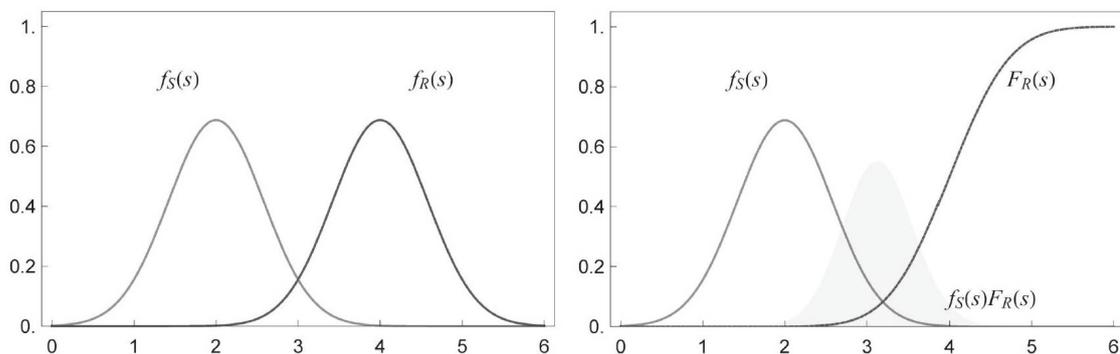


FIGURA 18 – Problema fundamental de confiabilidade (interferência entre populações). Fonte: adaptado de Beck (2019)

Qualquer medida de segurança, ou aumento da confiabilidade estrutural, é uma função das posições relativas das funções densidade de probabilidade de R e S e do grau de dispersão de ambas (ANG; TANG, 1984).

Na Figura 18 pode-se observar duas maneiras de diminuir a probabilidade de falha: afastar as médias ou diminuir o desvio-padrão das variáveis. Na prática, isto significa aumentar os coeficientes de segurança ou aumentar o controle de qualidade na execução a fim de garantir materiais mais homogêneos, respectivamente.

Integrando a Equação 2.7 em relação a S , temos:

$$p_f = \int_{-\infty}^{+\infty} f_R(r) \left[\int_r^{+\infty} f_S(s) ds \right] dr = \int_{-\infty}^{+\infty} f_R(r) [1 - F_S(r)] dr \quad (2.8)$$

sendo $f_R(r)$ a função marginal de densidade de probabilidade da resistência e $F_S(s)$ a função marginal de distribuição cumulativa de probabilidades da solicitação.

Porém, pode-se considerar uma margem de segurança (M) ao problema elementar de confiabilidade, assim tem-se que:

$$M = R - S \quad (2.9)$$

sendo que $M \leq 0$ corresponde a iminência ou efetividade da ocorrência da falha. Uma representação da Equação 2.9 pode ser observada na Figura 19.

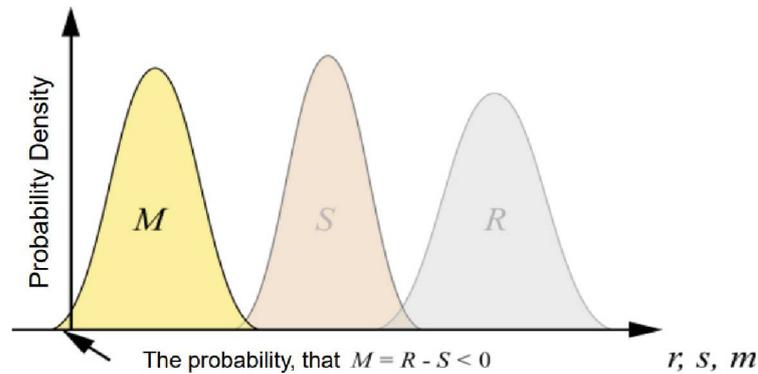


FIGURA 19 – Representação de $M = R - S$. Fonte: Kohler (2011)

Se a probabilidade de falha for expressa em função de M :

$$p_f = P[\{M \leq 0\}] = \int_{-\infty}^0 f_M(m) dm = F_M(0) \quad (2.10)$$

sendo $f_M(m)$ uma função normal que pode ser caracterizada por sua média (μ_M) e desvio-padrão (σ_M).

$$\mu_M = \mu_R - \mu_S \quad (2.11)$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (2.12)$$

Hasofer e Lind (1974) propôs uma metodologia de resolução deste problema. Para isto, deve-se transformar M em uma variável normal padrão Y :

$$Y = \frac{M - \mu_M}{\sigma_M} \quad (2.13)$$

Na Figura 20 está representada a distribuição da variável Y .

Isto torna possível que as probabilidades de M sejam avaliadas através da distribuição cumulativa normal padrão $\Phi(\cdot)$:

$$p_f = P\{M \leq 0\} = P\left\{Y \leq -\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right\} = \Phi\left(-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) \quad (2.14)$$

A distância entre $m = 0$ e a origem da distribuição de Y , mostrada na Figura 20, é chamada de índice de confiabilidade (β) e pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\beta \equiv \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2.15)$$

O índice de confiabilidade como representado na Equação 2.15 é conhecido como o índice de confiabilidade de Cornell (1969) e é válido apenas para problemas onde as variáveis R e S sejam aleatórias, normais e independentes, e M uma função linear. A Figura 20 representa o índice de confiabilidade.

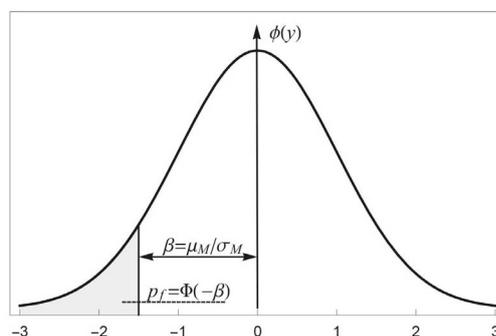


FIGURA 20 – Probabilidade de falha em termos da variável normal padrão Y . Fonte: Beck (2019)

Para o problema descrito aqui, pode-se expressar a probabilidade de falha como:

$$p_f = \Phi\left(-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi(-\beta) \quad (2.16)$$

Com isto, pode-se observar que o índice de confiabilidade (β) está diretamente relacionado com a probabilidade de falha.

As diversas falhas que podem ocorrer nas estruturas podem ser descritas através de equações do estado limite. Para cada modo de falha temos uma equação limite $g(\mathbf{X})$:

$$g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (2.17)$$

onde valores negativos de $g(\mathbf{X})$ representam a falha.

Reescrevendo a Equação 2.11 em termos de $g(\mathbf{X})$, temos:

$$g(\mathbf{X}) = R - S = 0 \quad (2.18)$$

E a probabilidade de falha pode ser chamada de probabilidade da violação do estado limite (representada na Figura 21):

$$p_f = P\{g(\mathbf{X}) \leq 0\} \quad (2.19)$$

E a confiabilidade (\mathfrak{R}) será:

$$\mathfrak{R} = 1 - p_f = \int_{\Omega_{Sob}} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2.20)$$

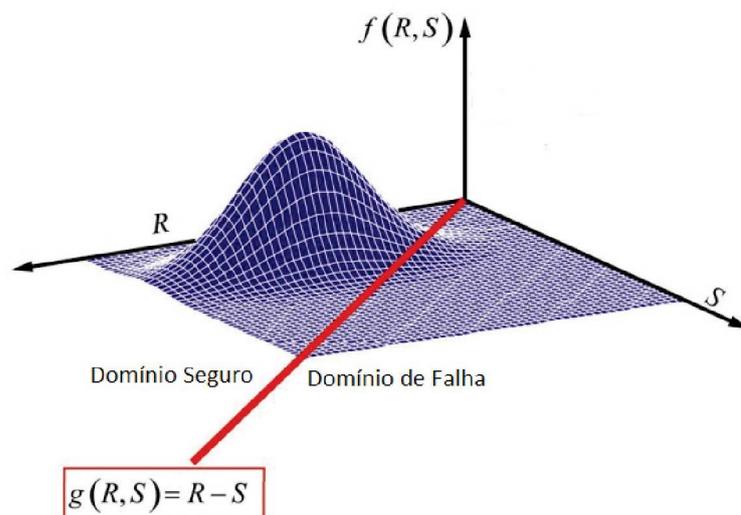


FIGURA 21 – Representação da função $g(x)$. Fonte: Kohler (2011)

Hurtado e Alvarez (2003) apresentam uma classificação de métodos disponíveis para análises de confiabilidade. Os métodos podem ser classificados como aqueles baseados na teoria das probabilidades e aqueles baseados na geração de amostras sintéticas. Os primeiros podem ser aqueles métodos que procuram estimar a

confiabilidade através de momentos de baixa ordem (normalmente médias e covariâncias) das respostas estruturais. E os baseados na geração de amostras sintéticas são métodos baseados em Simulações de Monte Carlo (SMC), os quais podem ser considerados métodos diretos, pois geralmente usam programas computacionais de Elementos Finitos para calcular as variáveis de resposta estrutural.

A Simulação de Monte Carlo (SMC), apesar de não ser um método de análise de confiabilidade estrutural ainda consagrado, tem sido bastante utilizada para a obtenção da probabilidade de falha das estruturas e do índice de confiabilidade.

Segundo Robert (2016), o método de Monte Carlo é um meio de resolução aproximada de um problema determinístico como integração ou otimização, usando números aleatórios. O termo se tornou popular entre os primeiros utilizadores do método como, por exemplo, os laboratórios Los Alamos, nos anos 1940 e 1950, particularmente John Neumann, Edward Teller e Stanislaw Ulam, entre outros.

Por envolver soluções repetitivas, a simulação de Monte Carlo é própria para solução em computador. A solução da parte mecânica do problema pode ser através de algoritmos numéricos (elementos finitos, de contorno, diferenças finitas, etc.), ou de equações analíticas (BECK, 2019).

A simulação Monte Carlo é uma técnica que pode ser utilizada para gerar resultados numericamente sem a necessidade de realizar a simulação física do fenômeno. Podem ser utilizados resultados de testes prévios, ou outras informações, para estabelecer as distribuições de probabilidade dos parâmetros do problema. Esta informação é utilizada para gerar amostras de dados numéricos (KRÜGER, 2008).

Métodos aproximados de análise de estabilidade permitem uma estimativa de média e desvio padrão do fator de segurança, mas não fornecem qualquer informação sobre a forma da função densidade de probabilidade, assim a probabilidade de falha somente pode ser obtida quando se assume uma distribuição de probabilidade paramétrica do fator de segurança, tipicamente normal ou log-normal (EL-RAMLY, 2002b).

A simulação de Monte Carlo pode ser usada para obter informações de uma resposta gerada dentro de um sistema computacional em termos de experimentos numéricos, retornando estatísticas de variáveis de entrada. Mais especificamente, em cada experimento, os valores de entrada de variáveis aleatórias são amostrados de acordo com suas distribuições, e então as variáveis de saída são calculadas utilizando um modelo computacional. Alguns experimentos são conduzidos, e as estatísticas das variáveis de saída podem então serem consideradas como um resultado (ZHANG et al., 2017).

Segundo Kohno, Ang e Tang (1990), uma amostra obtida de uma simulação

Monte Carlo é similar a uma amostra de observação experimental e, portanto, os resultados das simulações podem ser tratados estatisticamente. Por isso, o método Monte Carlo também é uma técnica de amostragem, incluindo os mesmos problemas da teoria da amostragem, ou seja, os resultados são também sujeitos a erros amostrais, que é diminuído quanto maior a amostra.

Na simulação Monte Carlo, os valores das variáveis aleatórias são gerados de uma maneira consciente e compatível com a distribuição de probabilidade, e a função de desempenho é calculada para cada conjunto gerado. O processo é repetido numerosas vezes, normalmente de milhares a milhões de vezes, e o valor esperado, desvio padrão e distribuição de probabilidade da função de desempenho são correspondentes aos valores calculados (USACE, 1999).

O Método Monte Carlo é freqüentemente aplicado em três situações (NOWAK; COLLINS, 2012):

1. Para resolver problemas complexos para os quais uma solução analítica é muito difícil ou mesmo impossível de se obter;
2. Para resolver problemas complexos que podem ser resolvidos (pelo menos aproximadamente) de forma analítica, mas de forma simplificada. Utilizando simulação Monte Carlo, o problema “original” pode ser estudado sem as simplificações e assim resultados mais realistas podem ser obtidos; e,
3. Para verificar os resultados de outras técnicas.

Nas últimas décadas, uma série de estudos na aplicações de estudos probabilísticos na estabilidade de encostas usando abordagens numéricas, como Simulação de Monte Carlo (SMC), foram relatadas na literatura (DAI; FREDLUND; STOLTE, 1993; CHOWDHURY R N; XU, 1993; MELCHERS R E; AHAMMED, 2004; CHO, 2007; CARDOSO et al., 2003; CHO, 2010; JI; LIAO; LOW, 2012).

A rotina do método de simulação de Monte Carlo para análises de estabilidade de taludes é descrita por Eli Antônio da Costa (2005):

1. Seleção do modelo determinístico de base para a função de desempenho;
2. Escolha dos parâmetros que irão ser modelados probabilisticamente, bem como as funções de distribuição das variáveis de entrada;
3. Uso de um falso gerador de números aleatórios que seleciona um valor aleatório para cada variável de entrada baseado na sua distribuição de probabilidades. Em seguida, esses valores são usados para resolver a função desempenho. Esses

cálculos são normalmente efetuados considerando-se somente a superfície crítica obtida a partir da análise determinística realizada previamente; e,

4. processo é repetido inúmeras vezes para se construir a distribuição de frequências da variável de desempenho (fator de segurança), de onde se obtém o tipo de distribuição de probabilidade da função FS , permitindo-se a obtenção de suas principais características de variação, FS_{medio} , a probabilidade de falha do talude (probabilidade de $FS < 1$), e a determinação do índice de confiabilidade.

Nas décadas de 1970 e 1980 foram feitos muitos avanços em teoria de confiabilidade estrutural. Na época, devido à incipiente e limitada capacidade dos computadores, a ênfase esteve em desenvolver métodos analíticos como o FORM, SORM e limites para a probabilidade de falha de sistemas. Na época, a simulação de Monte Carlo era tida como uma forma de verificar a solução dos métodos analíticos, ou como um último recurso, quando os métodos analíticos falhavam. Com o aumento recente e explosivo na capacidade dos computadores, e com a possibilidade de processamento em paralelo, as técnicas de simulação de Monte Carlo têm conquistado cada vez mais espaço. Contam a favor do método a facilidade de implementação, a generalidade em atacar diferentes problemas, e a robustez das soluções. Técnicas de amostragem inteligente têm sido desenvolvidas para reduzir o número necessário de amostras, viabilizando a solução de problemas numéricos com grande número de graus de liberdade e pequenas probabilidades de falha (BECK, 2019).

Cardoso et al. (2003) consideram o uso das Simulações de Monte Carlo (SMC) vantajoso, quando comparado com os métodos FORM/SORM pois permite obter de forma exata a probabilidade de falha, levando em consideração a descrição probabilística conjunta das variáveis aleatórias que afetam o comportamento da estrutura.

El-Ramly (2002b) aponta as seguintes vantagens no uso da simulação de Monte Carlo: não requer um conhecimento estatístico e matemático tão profundo quanto outros métodos; fornece diretamente a forma de curva de distribuição de probabilidades do fator de segurança, e, portanto, da probabilidade de falha; e o número de variáveis não altera a complexidade do problema.

Se m representar todas as respostas para a simulação de um evento, e n for o número destas respostas que representem a falha, como representado na Figura 22, então a probabilidade de falha será dada por:

$$P_f = \frac{n}{m} \quad (2.21)$$

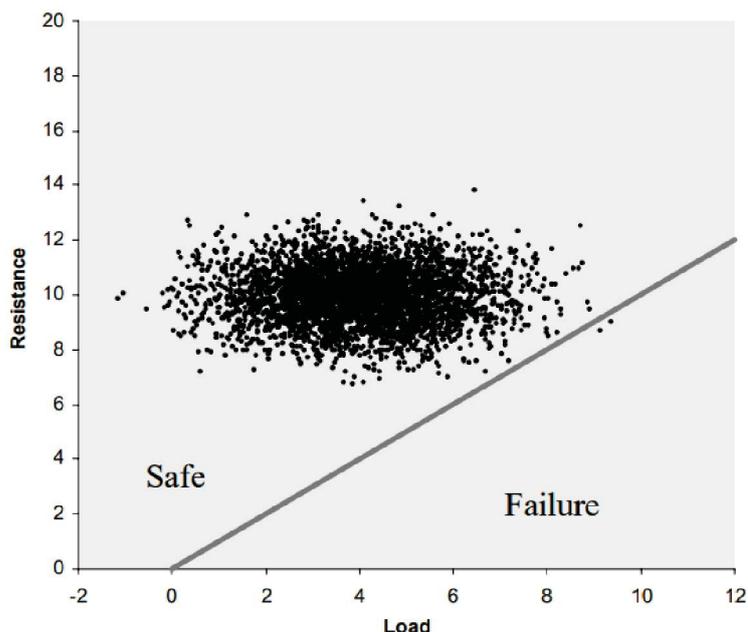


FIGURA 22 – Representação de uma simulação de eventos. Fonte: Faber (2003)

Ehlers (2004) aplica o método de Monte Carlo para estimar o valor de uma integral definida através do seu valor esperado, isto é, para estimar o resultado numérico de uma integral definida de uma função $g(x)$, no intervalo (a, b) . Assim, tem-se:

$$I = \int_a^b g(x)dx = \int_a^b (b-a)g(x) \frac{1}{(b-a)} dx = (b-a)E[g(\underline{X})] \quad (2.22)$$

sendo \underline{X} uma variável aleatória com distribuição uniforme $f(a, b)$.

Desta forma, transformou-se o problema de avaliar a integral no problema estatístico de estimar uma média, $E[g(\underline{X})]$.

Quando se dispõe de uma amostra aleatória de tamanho n , x_1, \dots, x_n da distribuição, no intervalo (a, b) pode-se obter, também, uma amostra de valores $g(x_1), \dots, g(x_n)$ da função $g(x)$ e a integral acima pode ser estimada pela média amostral, isto é,

$$\hat{I} = (b-a) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i) \quad (2.23)$$

A generalização é simples para o caso de outra distribuição de probabilidade $g(x)$, cuja função densidade de probabilidade seja $p(x)$, ou seja,

$$I = \int_a^b g(x)p(x)dx = E[g(x)] \quad (2.24)$$

A variância pode ser estimada como,

$$\sigma^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n (g(x_i) - \bar{g})^2 \quad (2.25)$$

isto é, a aproximação pode ser tão acurada quanto se deseja bastando aumentar o valor de n .

Para n grande segue que

$$\frac{\bar{g} - E[g(X)]}{\sqrt{\sigma^2}} \quad (2.26)$$

tem distribuição aproximadamente $N(0, 1)$.

Assim, pode-se usar este resultado para testar a convergência e construir intervalos de confiança.

No caso multivariado a extensão também é direta. Para contabilizar o resultado da simulação de diversas variáveis aleatórias basta fazer o seu somatório, ou seja, a cada iteração tem-se o somatório destas variáveis. O somatório das variáveis aleatórias só é possível devido ao Teorema do Limite Central que, sob condições gerais, estabelece que a função de distribuição acumulada de uma soma de variáveis aleatórias independentes aproxima-se da distribuição acumulada de uma variável aleatória Gaussiana. Ou seja, pouco importa a distribuição de probabilidade de cada variável aleatória independente correspondente a cada risco analisado, o somatório das mesmas resulta sempre em uma distribuição Normal, isto na prática significa que o resultado da simulação de Monte Carlo responde à uma curva normal de distribuição de probabilidade.

Neste caso os valores gerados serão também vetores x_1, \dots, x_n e o estimador de Monte Carlo fica,

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i) \quad (2.27)$$

Para obter a estimativa da probabilidade de falha associada a um estado limite definido por uma função, $g(\underline{X})$, a simulação pelo método de Monte Carlo consiste na aplicação do seguinte algoritmo, segundo (SQUARCIO, 2009):

- Geração de valores para as variáveis básicas de entrada de acordo com as respectivas funções de distribuição;

- Estimacão da funo de estado limite $g(\underline{X})$ com os valores amostrais, obtendo-se $g(\underline{X}_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, onde N é um número muito grande. A ordem de N deve ser de 10.000 ou mais;
- Verificaco da ocorrência da violaco do estado de seguranca ou seja, $g(\underline{X}_i) > 0$, para $i = 1, 2, \dots, N \rightarrow \infty$;
- Contagem do número de vezes em que é ultrapassado o estado limite, $N\#[g(\underline{X}) \leq 0]$;
- Estimativa da probabilidade de falha média, através de:

$$\bar{p}_f = p[g(x) > 0] = \frac{N\#[g(\underline{X}) \leq 0]}{N} \quad (2.28)$$

O número de simulaes a realizar, N , depende, sobretudo, da ordem de grandeza da probabilidade de falha, \bar{p}_f , e da funo que descreve a funo de falha, $g(\underline{X})$.

Valores muito pequenos de p_f conduzem a valores elevados de N sendo este o principal inconveniente apontado ao Método de Monte Carlo. Também a irregularidade de $g(\underline{X})$ pode provocar um aumento do número de simulaes necessárias.

Admitindo que o gerador de números pseudo-aleatórios utilizado garanta as propriedades de independência e de uniformidade, tem-se-ia resultados exatos quando o número de simulaes tende para infinito.

Outro ponto importante para obter resultados satisfatórios com a aplicao da Simulao de Monte Carlo (SMC)  a escolha da melhor distribuo de probabilidade para cada parâmetro de entrada a ser analisado. A partir dos dados e informaes sobre o problema  possível usar métodos estatísticos como testes de aderência ou softwares de ajuste de curvas para encontrar a distribuo de probabilidade que melhor representa um determinado histórico ou banco de dados. A Figura 23 demonstra como a determinao correta da distribuo de probabilidade é importante no processamento através do modelo.

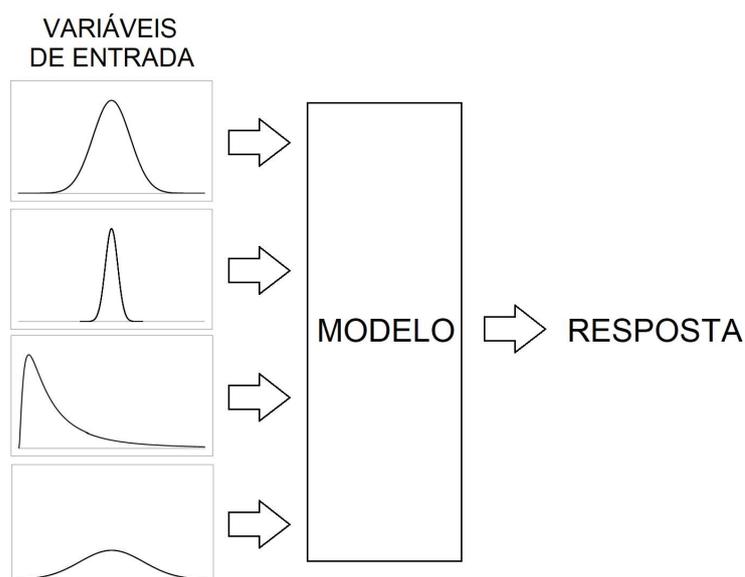


FIGURA 23 – Exemplo genérico de modelagem. Fonte: elaborado pela autora.

2.7 NECESSIDADES DO SETOR

Na última década o Brasil teve um grande avanço legal ao instituir a Política Nacional de Segurança de Barragens através da Lei 12.334/2010, quando foram criadas regras aplicáveis a todas as barragens, independente de suas características ou utilização. No entanto, foi definido que apenas as grandes barragens estariam sob a égide da lei, deixando isentas das obrigações legais aquelas que possuem altura inferior a 15 m e volume inferior a 3.000.000 m³. Considerando que, em países em desenvolvimento como o Brasil, a maior parte das barragens são pequenas e destinadas a irrigação, com alto potencial lesivo às comunidades adjacentes e ao meio ambiente, a lei vigente deixa uma lacuna no que diz respeito à proteção efetiva dessas populações e biomas (COSTA E SILVA et al., 2021).

Depois dos desastres significativos das barragens de rejeito em Mariana e Brumadinho, em Minas Gerais, com impactos relevantes, houve uma grande sensibilização da sociedade brasileira, que gerou alterações efetuadas pela Lei 14066/20, que aprofundou obrigações e punições em segurança de barragens.

Eli Antônio da Costa (2005) ainda ressalta que, no caso das pequenas barragens, a mera inclusão das mesmas na atual lei de Segurança de Barragens não traria a efetividade desejada, uma vez que as mesmas devem ter regulamentação específica, considerando a proporcionalidade das obrigações impostas a grandes empreendedores e a viabilidade econômica e de cumprimento das exigências legais por parte de pequenas barragens, que é um tema ainda controverso já que a lei ainda não define claramente obrigações em possíveis rupturas em cascata..

A PNSB, tem contribuído para a integração e troca de conhecimentos entre os diversos setores, todos esses preocupados com os critérios que definem as responsabilidades que na lei, são claras e objetivas, contribuindo para a padronização de procedimentos de inspeção e de monitoramento (MEDEIROS, 2012).

2.7.1 Normatização

A norma técnica é (AL ASSAL, 2021):

- Um conjunto de padrões que descrevem a melhor forma de produzir, executar serviços e processos;
- A síntese do conhecimento de especialistas em temas específicos, reunindo a experiência acumulada de produtores, reguladores, consumidores e usuários, pesquisadores entre outros;
- Um processo aberto e *MultiStakeholder* - usuário de norma / normalizador;
- Um instrumento para a sociedade de auto regular, gerando seus próprios padrões de modo transparente e dinâmico;
- Parte da diversidade e busca pela convergência através de um processo de formação de consenso;
- A consolidação da inovação tecnológica.

A normativa técnica não tem poder mandatório, mas estabelece um padrão de qualidade para os procedimentos que envolvem a segurança de barragens. Isto possibilita que o poder público tenha uma medida para avaliar a qualidade dos procedimentos e o comprometimento do empreendedor com a segurança da sociedade além de seus interesses econômicos.

Normas técnicas servem de apoio, fornecendo complementação para os regulamentos técnicos dos órgãos fiscalizadores (AL ASSAL, 2021). Uma norma técnica permite uma atualização em um curto intervalo de tempo a fim de utilizar ao máximo as pesquisas acadêmicas e tecnologias desenvolvidas que são aplicáveis ao seu interesse.

A atualização PNSB, de 2019, tem muito mais artigos que visam gerenciar um acidente com barragens do que para não deixar o acidente acontecer. Portanto, a normativa técnica é a possibilidade de balancear estas ações.

Como visto neste levantamento bibliográfico, há poucas normas internacionais que tratam em detalhes os processos relativos à segurança de uma barragem, por inúmeras dificuldades. Mas, com base na fala de Al Assal (2021), o atual cenário

do Brasil nos permite uma oportunidade de sermos inovadores, pioneiros, líderes na criação da norma técnica para barragens.

Para isto, temos como base documentos já publicados por nossas entidades, como os manuais e diretrizes da Eletrobras, que estabelecem critérios para diferentes tipos e tamanhos de barragens:

- Microcentrais, de 1985;
- Minicentrais, de 1985;
- PCHs, de 1982 e revisada em 2000;
- UHEs, Projetos básicos, de 1999;
- UHEs, Critérios de projeto, de 1999.

2.7.2 Guias de boas práticas

A norma técnica não tem caráter de ensino, mas serve para mostrar o instante técnico a que se relaciona. Porém, um guia de boas práticas tem o objetivo de esmiuçar o que a norma indica, ensinando, passo a passo, o que deve ser feito.

A dificuldade relatada em vários RSB pode ser contornada com uma melhor comunicação, tanto entre o corpo técnico, como com a população em geral. O último RSB publicado (ANA, 2021b) já estabelece uma linguagem acessível para que toda a população possa se beneficiar das informações lá contidas.

Por isso, além da normativa técnica, também se faz necessária a elaboração de guias de boas práticas, a fim de comunicar como devem ser redigidos os documentos exigidos, para que atinjam efetivamente os seus objetivos, entre eles, a comunicação eficaz com a sociedade.

2.7.3 Aplicação dos conceitos de análise de risco

Há uma clara tendência de aplicação de métodos probabilísticos e análises de risco nas recomendações internacionais, e consenso das dificuldades conceituais e de formação dos responsáveis por segurança de barragens no Brasil. Assim sendo, o aumento e obrigatoriedade de educação continuada e exigência de capacitação técnica adequada, conforme preconizada na Lei 14066/20, se torna um foco importante na pesquisa no país (MARQUES FILHO, 2021).

A recente comissão de Estudos para Normalização de Barragens possui em seus objetivos a inclusão dos conceitos de análise de risco nas normas que serão desenvolvidas (MARQUES FILHO, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de segurança de barragens deve ser preventivo preferencialmente, mantendo as condições de segurança através de manutenções guiadas pelos processos já mencionados, com um monitoramento adequado, preciso, envolvido tecnicamente durante todo o processo de operação, com procedimentos formais realizados por profissionais qualificados.

Este trabalho propõe uma metodologia de avaliação de nível de segurança de barragens, que complementa e auxilia as recomendações da PNSB gerada pela legislação existente. Ela não substitui, mas sim complementa, o PSB. A metodologia busca criar procedimentos dentro de um fluxograma de trabalho, que auxiliem na verificação da estabilidade, que direcionam pontos relevantes de observação e inspeção, que indiquem a colocação de novos instrumentos ou ainda, que ajudem na tomada de decisão para manutenções.

3.1 METODOLOGIA PROPOSTA

Tendo como base a revisão de literatura exposta, este trabalho apresenta uma metodologia de avaliação do nível de segurança de uma barragem existente. O método é aplicável a todos os tipos de barragens. Também, concentra seu raciocínio nas barragens existentes, uma vez que, esta é a maior necessidade atual, mas o método também pode ser utilizado como guia para novos projetos de barramentos.

A metodologia proposta pode ser aplicada por dois agentes: um analista de segurança de barragens e um engenheiro de barragens. O analista deve ser um especialista na área de barragens, com experiência mínima de 3 anos no empreendimento a ser estudado, e pode realizar as atividades das primeiras etapas (1 a 4). Já as etapas posteriores, exigem um conhecimento técnico-teórico mais aprofundado e devem ser realizadas por um engenheiro de barragens.

Não há a necessidade de formação técnica especializada para o analista de segurança de barragens, pois o objetivo das etapas iniciais é constatar o nível de informações disponíveis e a possibilidade de mensurar o nível de segurança do empreendimento. Posteriormente, quando houver a necessidade de simulações computacionais e de interpretação de dados, a execução por um profissional com nível técnico mais avançado, como um engenheiro de barragens, se torna essencial. Ressalta-se, porém, que todos os dados coletados pelo analista de segurança de barragens devem ser avaliados pelo engenheiro de segurança de barragens, a fim de evitar falhas de leitura, por exemplo.

Deve ser considerado que qualquer simulação necessita de dados confiáveis e precisos, portanto, a etapa de obtenção de dados deve ser cuidadosa e criteriosa, devendo passar por processo de consistência técnica.

É importante observar que, para a formação de um engenheiro de barragens, deve existir critérios mínimos a serem atestados, como aqueles impostos pela legislação do Reino Unido e da Áustria (ADAMO et al., 2021; JANSEN, 1983; ZENZ; OBERNHUBER; CZERNY, 2012). Na Áustria a exigência abrange ainda, um geólogo experiente, o que seria um cenário ideal para uma completa avaliação de segurança de uma barragem.

Vale ressaltar, também, que apenas o mensurar do volume de informações já é um passo importante na segurança de barragens brasileiras, pois o déficit de informações existentes ainda é muito grande, necessitando urgência em sua completude, segundo apontado por ANA (2021b). Nada além de uma série complexa de análises computacionais pode atestar a segurança de uma barragem, mas o simples fato de poder comunicar os fiscalizadores, e a sociedade, que há, ou não, volume suficiente de informações para estas análises, já caracteriza uma vitória ao setor.

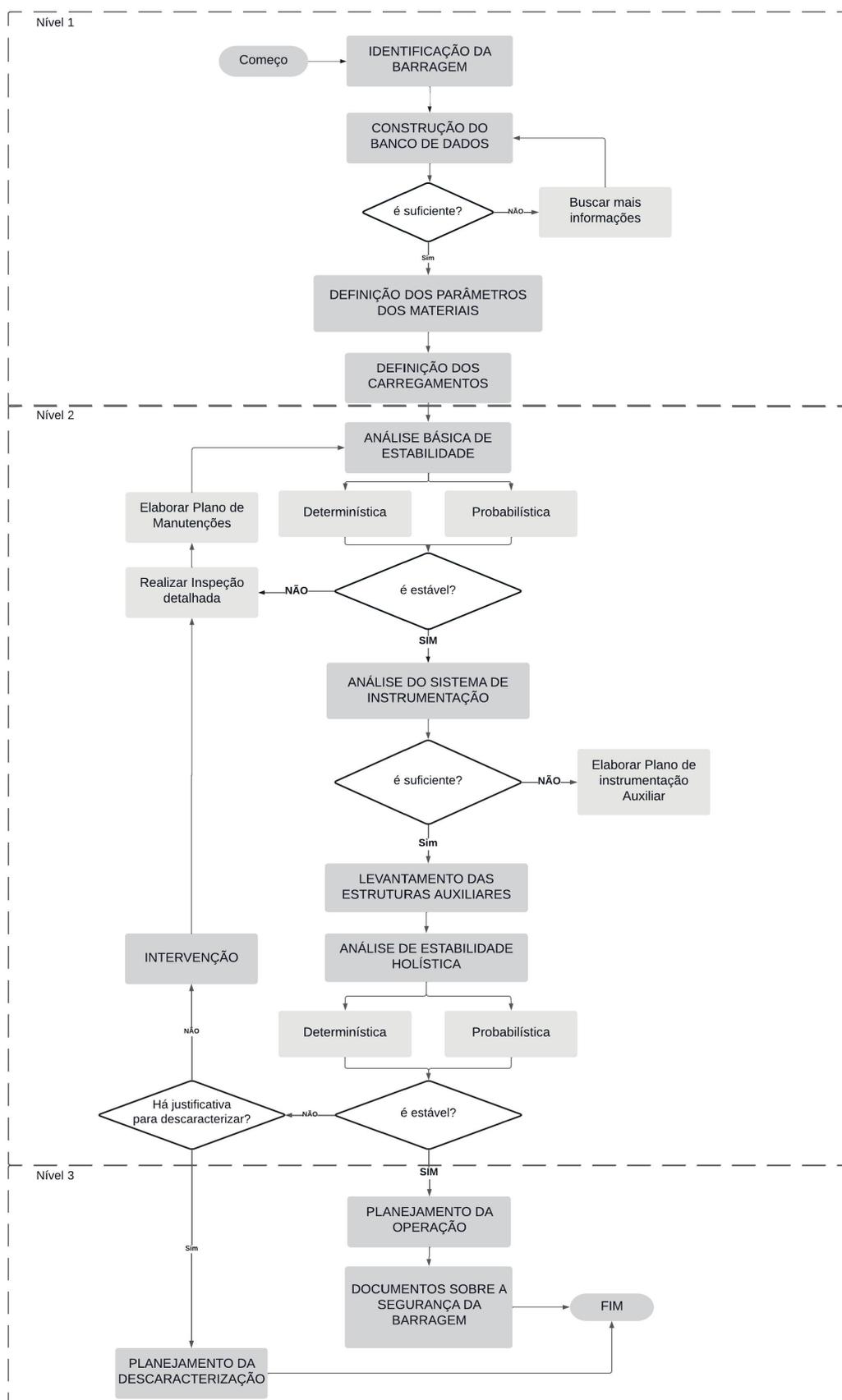


FIGURA 24 – Fluxograma da metodologia proposta. Fonte: elaborado pela autora.

A visão geral da metodologia proposta é demonstrada através do fluxograma apresentado na Figura 24, e é composto por 10 etapas, a saber:

1. Identificação;
2. Banco de dados;
3. Materiais;
4. Carregamentos;
5. Estabilidade;
6. Instrumentação;
7. Estruturas auxiliares;
8. Segurança de barragens;
9. Operação;
10. Intervenção ou Descaracterização.

Cada etapa deve ser concluída com todas as informações requeridas para que o avanço para a próxima etapa se dê. Cada etapa será melhor explicada nos itens que se seguem.

Também são definidos três níveis de completude de informações. São estes níveis que irão descrever quão segura está uma barragem. A Tabela 15 descreve as definições a respeito da segurança de uma barragem de acordo com os níveis da metodologia proposta.

TABELA 15 – Nível de segurança de uma barragem de acordo com a metodologia proposta.

Condição de segurança	
Nível 1	INCERTA ¹
Nível 2	SEGURA ²
Nível 3	INFORMADA ³

¹Não há informações suficientes para determinar se a barragem é segura.

²A barragem é segura mas não há o desenvolvimento da documentação exigida pelos órgãos fiscalizadores.

³A barragem é segura e toda a documentação exigida pelos fiscalizadores está devidamente realizada.

Fonte: elaborado pela autora.

3.1.1 Etapa 1: Identificação

A identificação é o primeiro passo para se obter mais informações sobre uma barragem. O último RSB (ANA, 2021b) relatou, entre outras coisas, a dificuldade de identificar o empreendedor dos barramentos existentes no país. A maior parte das barragens existentes ainda não foram identificadas, nem seu empreendedor, nem seus dados básicos.

Atenção especial deve ser dada para barragens que se enquadram na PNSB, ou seja, que têm altura maior que 15 m, volume de reservação maior que 3.000.000 m³, reserve resíduos perigosos ou tenha um DPA médio ou alto. Neste grupo, estima-se que a grande maioria já tenha sido registrada no SNISB, mas enquanto não houver o cadastramento completo das barragens existentes, é impossível estimar a quantidade de barragens "perigosas" que não têm um responsável legalizado. Por isso, os dados básicos da barragem são o ponto inicial para uma avaliação de seu nível de segurança.

Um analista de segurança de barragens pode utilizar a Tabela 16 para auxílio no preenchimento das informações necessárias para esta etapa. Sendo que é de extrema importância que todos os campos desta etapa sejam preenchidos.

Na falta de informações, um levantamento, através de uma inspeção visual no local, realizada por equipe técnica capacitada, deve ser providenciada para que os campos possam ser preenchidos, bem como o preenchimento das fichas de inspeção que podem auxiliar o desenvolvimento do estudo.

TABELA 16 – Etapa 1: Identificação

1. IDENTIFICAÇÃO					
do Empreendedor			do Fiscalizador		
Dados Básicos:			Qual é o tipo de barragem?		Qual é o tipo de Fundação?
Altura:			Concreto		Solo mole
Volume de reservação:			Aterro		Solo firme
Uso(s):			Rejeito		Rocha sã
Idade:			Mista		Rocha fraturada
Houve alguma manutenção estrutural de grande porte?			Outro		Há tratamento nas fundações?

Fonte: elaborado pela autora.

Não é incomum que a falta de informações aconteça, principalmente em barragens menores. Extravio de documentação, troca de propriedade e outros podem ser os

motivos da lacuna de dados básicos. Mas não há como continuar o ateste de nível de segurança da barragem em estudo sem que essa etapa seja concluída com êxito.

3.1.2 Etapa 2: Banco de dados

A partir dos dados básicos, inicia-se a procura por informações técnicas adequadas. É neste momento que todo o arquivo técnico que possa existir deve ser consultado.

Realizar um levantamento de tudo o que há disponível sobre a barragem é o principal objetivo desta etapa. Todos os estudos, ensaios, relatórios, simulações, definições e projetos precisam estar disponíveis para que o analista de segurança de barragens possa avaliar o volume e a qualidade das informações existentes.

A Tabela 17 auxilia o analista na procura pelos documentos necessários. Aqui, ainda é feito um questionamento sobre a suficiência do volume de informações levantado. O que depende da criticidade do analista e, por isso, o mesmo deve ter um nível técnico condizente com este julgamento.

TABELA 17 – Etapa 2: Banco de dados

2. BANCO DE DADOS				
Assinale os documentos que estão disponíveis:				
	Pré-projeto		Projeto básico	
	Diário de obra		As built	
				Projeto executivo
				Relatório(s) de manutenções
Volume de informações é suficiente?				
Sim			Não	
seguir para a próxima etapa			coletar mais informações	

Fonte: elaborado pela autora.

Caso não haja informações técnicas adequadas, deve-se proceder levantamentos de campo e ensaios que permitam uma análise tecnicamente confiável. É comum levantamentos como projeto *as is*, ou seja, como é ou foi levantado.

3.1.3 Etapa 3: Materiais

Com todos os projetos, memoriais e relatórios em mãos, pode-se fazer um levantamento pontual sobre os materiais que compõem a barragem e a fundação. Aqui, o objetivo é verificar a existência destas informações, sem necessidade de coletá-las, ainda.

A Tabela 18 auxilia o analista na busca pontual por informações dos materiais envolvidos na construção da barragem.

TABELA 18 – Etapa 3: Materiais

3. MATERIAIS									
Quais os parâmetros, dos materiais presentes na barragem, que têm suas definições completas?									
Solo(s)		Concreto(s)		Aterro(s)		Rocha(s)		Outro(s)	
Peso específico:		Peso específico:		Peso específico:		Peso específico:		Peso específico:	
Coesão:		Coesão:		Coesão:		Coesão:		Coesão:	
Ângulo de atrito:		Coef. de atrito:		Ângulo de atrito:		Coef. de atrito:		Ângulo de atrito:	
Coef. de permeabilidade:		Coef. de permeabilidade:		Coef. de permeabilidade:		Coef. de permeabilidade:		Coef. de permeabilidade:	

Fonte: elaborado pela autora.

Aqui se levanta, também, se há alguma deterioração ou mudança de comportamento que deva ser simulada nos estudos. Assim sendo, é necessário acesso à inspeção e estudos de segurança existentes ou, então, complementá-los.

3.1.4 Etapa 4: Carregamentos

Se há informações a respeito dos materiais, passa-se a etapa de definição dos carregamentos. Novamente, esta etapa é bastante influenciada pela capacidade crítica do analista de segurança de barragens, pois depende dele o entendimento de informações pontuais, como os níveis de água do reservatório, na composição dos carregamentos, dos estudos hidrometeorológicos baseados nas séries de dados existentes. Porém, não é necessário que ele calcule os carregamentos, mas que tenha entendimento dos fatores que os influenciam.

A Tabela 19 auxilia a identificar quais carregamentos podem ser considerados.

TABELA 19 – Etapa 4: Carregamentos

4. CARREGAMENTOS									
Os casos de carregamentos abaixo têm suas definições completas?									
Construção		1º enchimento		Rebaixamento Rápido		Sismos			
						Aceleração vertical:		Aceleração horizontal:	
Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Percolação permanente								Efeito cascata	
N.A. mínimo:		N.A. normal:		N.A. máximo::		N.A. maximorum:			
Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não

Fonte: elaborado pela autora.

3.1.5 Etapa 5: Estabilidade

A partir desta etapa, o volume de informações coletadas deve ser analisado para a obtenção dos valores dos parâmetros dos materiais e dos carregamentos envolvidos na barragem em estudo. E, portanto, deve ser realizada por um engenheiro de barragens com qualificação adequada, com compreensão dos fenômenos existentes e de sua magnitude.

A Tabela 20 provê checagens para verificar a possibilidade de análises de estabilidade de uma barragem e engloba vários tipos de barragens. Por isso, algumas das verificações podem não ser aplicáveis a determinados tipos de barramentos.

TABELA 20 – Etapa 5: Estabilidade

5. ESTABILIDADE									
Há informações suficientes para analisar a condição de estabilidade da barragem?									
Deslizamento		Tombamento		Capacidade de suporte das fundações		Tensões internas		Filtros e Drenos	
Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Qual a natureza da análise de estabilidade, com base nos dados disponíveis, possível de ser realizada?									
Determinística				Probabilística (mínimo de 3 informações para cada parâmetro envolvido na análise)					

Fonte: elaborado pela autora.

Porém, o maior propósito dessa etapa é demonstrar ao engenheiro de barragens que não é necessário um volume exagerado de informações para que análises probabilísticas possam ser feitas. Qualquer análise determinística pode ser transformada em uma análise probabilística, através dos métodos de confiabilidade estrutural, bastando que cada parâmetro (variável aleatória) tenha um mínimo de três informações, desde que essas tenham sido obtidas em ensaios confiáveis e que todas as regiões com variabilidade significativa possuam dados.

Por exemplo, se um solo é descrito através do SPT, dos ensaios de caracterização básica em laboratório e um ensaio específico, como o triaxial, ele já tem um volume de informações suficiente para ser definido de acordo com uma média e um desvio-padrão para a região do maciço com mesmas características. E, portanto, pode ser considerado uma variável aleatória, com certa confiabilidade.

É claro que, quanto maior o número de pontos em uma amostra, neste caso, valores que definem um mesmo parâmetro, mais precisa vão ser as informações de média e desvio-padrão.

3.1.6 Etapa 6: Instrumentação

Uma vez atestada a estabilidade da barragem baseada nos critérios usuais de projeto, ainda são necessárias, no mínimo, 4 etapas para atestar a sua segurança.

A Etapa 6 corresponde ao volume de instrumentos que o sistema de monitoramento contém. Lembrando que, é necessário que os instrumentos contabilizados estejam calibrados e em pleno funcionamento, com leituras confiáveis.

A Tabela 21 fornece um guia para o preenchimento da contabilização dos instrumentos existentes na barragem.

TABELA 21 – Etapa 6: Instrumentação

6. INSTRUMENTAÇÃO									
Qual a quantidade dos instrumentos abaixo que estão presentes na barragem?									
Inclinômetro		Piezômetro		Medidor de vazão		Células de carga		Marcos superficiais	
Prumo invertido		Células de poropressão		Placas de recalque		Sismógrafo		Acelerógrafo	
Medidor de junta		Deformímetro		Tensômetro		Termômetro		Outros	
O sistema de instrumentação existente na barragem é suficiente?				O sistema de instrumentação existente na barragem é:					
Sim		Não		Manual		Semi automatizado		Automatizado	

Fonte: elaborado pela autora.

Novamente, há uma pergunta que necessita de criticidade para ser respondida: "O sistema de instrumentação existente na barragem é suficiente?". O objetivo deste questionamento é que o engenheiro de barragens reflita sobre a eficiência e eficácia do sistema de instrumentação como um todo. Analisando se os instrumentos estão corretamente posicionados, com leituras corretamente realizadas, que possam efetivamente mostrar o comportamento em tempo real da barragem.

Caso as leituras ultrapassem os valores preconizados no projeto, devem ser avaliadas se estão corretas, e no caso positivo realizadas análises com estes valores.

3.1.7 Etapa 7: Estruturas auxiliares

A Etapa 7 compreende a análise holística da barragem, agora considerando todo o seu corpo e estruturas auxiliares. Na Etapa 5, a análise de estabilidade é feita com base nas seções transversais principais da barragem. Mas aqui, o objetivo é que uma análise global seja realizada.

A Tabela 22 fornece um *check-list* das estruturas auxiliares que podem estar presentes na barragem em estudo. Além de uma pergunta crítica sobre a influência

destas na estabilidade da barragem. Se houver influência na estabilidade, uma análise mais aprimorada, como por exemplo uma modelagem tridimensional, deve ser realizada.

Softwares de simulação computacional tridimensional, baseados em métodos de elementos finitos, podem ser grandes aliados do engenheiro de barragens nesta etapa.

TABELA 22 – Etapa 7: Estruturas auxiliares

7. ESTRUTURAS AUXILIARES											
Quais estruturas auxiliares estão presentes na barragem?											
Vertedor		Casa de força		Tomada d'água		Descarregador de fundo		Túnel de desvio		Comporta(s)	
As estruturas auxiliares podem comprometer a estabilidade e/ou segurança da barragem?											
Sim	Não		Se não, nova modelagem computacional deve ser realizada.								

Fonte: elaborado pela autora.

3.1.8 Etapa 8: Segurança de Barragens

Um dos maiores problemas relatados pelos órgãos do setor de barragens é a falta de comunicação entre o corpo técnico e com a sociedade. Por isso, a Etapa 8, detalhada na Tabela 23, visa auxiliar o engenheiro de barragens a listar os documentos que são necessários desenvolver.

TABELA 23 – Etapa 8: Segurança de barragens

8. SEGURANÇA DE BARRAGENS	
O empreendedor da barragem possui os relatórios e documentos a seguir?	
Relatórios de inspeções periódicas	
Análise de riscos	
Plano de Segurança de Barragem (PSB)	
Plano de Ação em Emergências (PAE)	
Planos de Comunicação	
Outros	

Fonte: elaborado pela autora.

Um detalhamento maior a respeito do conteúdo destes documentos deve ser consultado de acordo com seu respectivo órgão fiscalizador, haja visto que, atualmente, cada fiscalizador tem seus próprios regulamentos para instituir esta documentação básica, demandada pela PNSB.

O mais importante desta Etapa é que todos os documentos relacionados devem ser elaborados, com exceção do PAE, que não é obrigatório para todos os tipos de barragens.

É claro que os procedimentos para enfrentamento de emergência deveriam ser parte relevante de qualquer PSB. Obviamente, caso a barragem não se mostre estável, devem ser estudadas intervenções ou sua descaracterização.

3.1.9 Etapa 9: Operação

Pensando em novas barragens, este seria o momento de operacionalizar a barragem, pois seria a partir deste que a sua segurança estaria atestada e comunicada às autoridades competentes.

O mais importante da operação é a rotina de leitura dos instrumentos, inspeções visuais e manutenções preventivas e corretivas. Por isso, estas ações devem ser planejadas e estarem bem registradas e acessíveis à equipe de operação da barragem, em um Manual de Operação e Manutenção.

As principais ações que devem ser contempladas no Manual de Operação e Manutenção estão relacionadas na Tabela 24. A checagem desses itens deve ser feita pelo engenheiro de barragens.

TABELA 24 – Etapa 9: Operação

9. OPERAÇÃO	
O empreendedor da barragem possui uma rotina de operações que contemple as seguintes ações?	
Identificação manifestações patológicas	
Planejamento de manutenções	
Leitura periódica da instrumentação	
Análise periódica do comportamento da barragem	
Outros	

Fonte: elaborado pela autora.

3.1.10 Etapa 10: Intervenção ou Descaracterização

Caso não seja possível intervir na barragem para garantir a sua segurança, passa-se à análise de sua descaracterização.

A descaracterização de barragens é um assunto pouco discutido no meio acadêmico e praticamente inexistente no meio técnico. Sabe-se que empreendimentos, de qualquer porte, têm uma vida útil determinada em projeto e, com as barragens, não é diferente. Porém, o custo envolvido na construção, operação e manutenção de

barragens é muito maior do que aqueles envolvidos em edificações convencionais. E, portanto, descaracterizar uma barragem não é uma tarefa comum, haja visto que esta ação precisa ser economicamente justificável.

Porém, a realidade brasileira é que as nossas barragens estão cada vez mais velhas, cada vez mais pobremente mantidas, sem as devidas manutenções e reparos. Isto, conseqüentemente, acarreta em danos, em casos raros, que podem ser irreparáveis, justificando a descaracterização.

Para tanto, a Etapa 10 foi inserida nesta metodologia a fim de conscientizar empreendedores e fiscalizadores a respeito do planejamento da descaracterização de barragens. Esta autora acredita que a consciência a respeito da responsabilidade perpétua de um empreendedor é necessária nos dias atuais. Vê-se uma realidade de descaso, principalmente nas pequenas barragens, onde nem mesmo o empreendedor pode ser identificado, quanto mais o seu nível de responsabilidade com o vale em que a barragem está inserida ou a população que vive a jusante.

A Tabela 25 trás a reflexão sobre o desenvolvimento de documentação mínima para um possível processo de descaracterização. Ressalta-se, inclusive, a existência destes documentos em novos empreendimentos.

TABELA 25 – Etapa 10: Descaracterização

10. DESCARACTERIZAÇÃO	
O empreendedor da barragem possui um planejamento de descaracterização da barragem que contenha as seguintes informações?	
Plano de Gestão Ambiental	
Limite de aceitabilidade de riscos	
Plano de monitoramento perpétuo	
Definição de vida útil do empreendimento	
Outros	

Fonte: elaborado pela autora.

3.2 GEO STUDIO

As análises estáticas e dinâmicas da Barragem do Iraí foram realizadas no pacote de softwares da GeoStudio™. Foram utilizados:

- O software SEEP/W (GEOSTUDIO, 2021) para as análises de percolação;
- O software SLOPE/W (GEOSTUDIO, 2021) para as análises de estabilidade;

- O software SIGMA/W (GEOSTUDIO, 2021) para as análises de tensões e deformações; e,
- O software QUAKE/W (GEOSTUDIO, 2021) para as análises sísmicas.

O software SLOPE/W permite a inserção de distribuições de probabilidade para cada variável de entrada do problema modelado, bem como do número de iterações desejado para as Simulações de Monte Carlo (SMC).

Os software SEEP/W, SIGMA/W e QUAKE/W utilizam o Método de Elementos Finitos para o desenvolvimento de seus respectivos cálculos.

Todas as informações descritas a seguir foram resultado da consulta aos manuais fornecidos pela GeoStudio™(GEOSLOPE, 2021c) (GEOSLOPE, 2021b) (GEOSLOPE, 2021a).

3.2.1 SEEP/W

O software SEEP/W analisa o fluxo de águas subterrâneas em material poroso através do método de elementos finitos para a modelagem do movimento da água no maciço e fundação.

A formulação rigorosa das relações saturado/não saturado feita pelo software permite que até os mais complicados problemas de fluxo, como infiltração em solos secos ou via complexos de barragens de rejeitos podem ser analisados com facilidade.

A integração do SEEP/W com SLOPE/W torna possível a análise da estabilidade de qualquer declive, tanto natural como artificial, sujeito a mudanças transitórias na poropressão.

3.2.2 SLOPE/W

Para análise de estabilidade a partir do software SLOPE/W, três estágios diferentes estão envolvidos na computação dos vários fatores de segurança. Para a primeira iteração, as forças normal e de cisalhamento entre lamelas são definidas como zero. O fator de segurança de equilíbrio de momento resultante é o fator de segurança Ordinário ou Fellenius. O fator de segurança de equilíbrio de força tem recebido pouca menção na literatura e é de pouca significância. Os fatores de segurança da primeira iteração são usados como aproximações para iniciar o segundo estágio. O estágio 2 inicia a solução do fator não linear das equações de segurança. As forças de cisalhamento entre lamelas são definidas como zero. Normalmente, são necessárias 4 a 6 iterações para garantir a convergência do momento e do fator de equilíbrio da força das equações de segurança. A resposta da equação do momento corresponde ao método simplificado de Bishop. A resposta da equação de equilíbrio de forças

corresponde ao método simplificado de Janbu sem nenhuma correção empírica. O estágio 3 é necessário para todos os métodos que consideram forças entre lamelas. Nesta etapa, uma série de valores de entrada são selecionados e os fatores de segurança de equilíbrio de momento e/ou força são resolvidos e plotados. O fator de segurança que satisfaz tanto o equilíbrio de momento quanto de força é selecionado do gráfico (GEOSLOPE, 2021c).

O SLOPE/W pode executar análises probabilísticas da estabilidade do talude usando o método de Simulações de Monte Carlo (SMC). No software, uma ou mais superfícies críticas de ruptura são determinadas com base no valor médio dos parâmetros de entrada, usando qualquer um dos métodos de equilíbrio limite. A análise probabilística é então realizada nessas superfícies críticas de ruptura, levando em consideração a variabilidade dos parâmetros de entrada. O número de Simulações de Monte Carlo de uma análise depende do número de parâmetros de entrada das variáveis e da probabilidade esperada de falha. Em geral, o número de simulações de Monte Carlo aumenta à medida que o número de entradas das variáveis aumenta ou a probabilidade esperada de falha se torna menor. É comum a realização de milhares de amostragens, a fim de alcançar um nível aceitável de confiança em uma análise de estabilidade de taludes por meio deste método. Em geral, no SLOPE/W, a variabilidade dos seguintes parâmetros de entrada pode ser considerada:

- Parâmetros do material para os vários modelos de resistência, incluindo peso específico, coesão e ângulo de atrito;
- Condições de poropressão da água;
- A magnitude das cargas pontuais aplicadas;
- Coeficientes sísmicos horizontais e verticais.

3.2.3 SIGMA/W

Existem quatro tipos de análise que podem ser realizadas no SIGMA/W:

- *In situ*: conduzida usando os procedimentos de ativação por gravidade ou K_0 para estabelecer as tensões iniciais;
- Carga-deformação: usadas para analisar a resposta tensão-deformação de uma estrutura geotécnica na qual as pressões de água dos poros não são dependentes do tempo;
- Consolidação: resolve as equações de tensão-deformação e transferência de água acopladas e, portanto, simula mudanças dependentes do tempo na pressão da água dos poros e no estresse efetivo; e,

- Redistribuição de tensões: se preocupa em garantir que as tensões simuladas adiram a um critério de falha e podem ser usadas para:
 - corrigir tensões em espaço de tensão ilegal (por exemplo, devido à ativação da gravidade);
 - realizar uma análise de estabilidade de redução de força; e,
 - avaliar o fator de segurança de acordo com o projeto do estado limite.

3.2.4 PROGRAMAÇÃO EM PHYTON

Uma verificação da funcionalidade do método de Monte Carlo, disponível no ambiente do software GeoSlope™, foi realizada através da linguagem de programação Python.

O algoritmo desenvolvido procedeu as seguintes etapas:

1. Desenvolvimento da distribuição de probabilidade dos parâmetros de entrada através de sua média e desvio-padrão, podendo ser de natureza normal ou log-normal;
2. Gerador de pseudo números aleatórios;
3. Amostragem dos valores de entrada através dos pseudo números aleatórios;
4. Acoplamento direto com o software GeoSlope™;
5. Inserção dos valores de entrada no software;
6. Leitura dos resultados obtidos;
7. Armazenamento dos resultados em planilha eletrônica.

Com o resultado de 1 milhão de amostragens, pode-se realizar o teste de convergência, que permite a identificação do número necessário de Simulações de Monte Carlo (SMC) para obtenção de resultados satisfatórios. O teste de convergência é uma forma prática de verificar se o número de amostras empregado é suficiente para resolver determinado problema com precisão, é realizado através da observação de gráficos de convergência do número de amostras, ou seja, do número de simulações de Monte Carlo, *versus* a probabilidade de ruptura. Conforme o número de amostras aumenta, a oscilação da média (e da variância), que ocorre por influência dos números aleatórios, diminui e o intervalo de confiança se torna mais estreito. O número de amostras deve ser suficiente para se observar convergência na média, com intervalo de confiança aceitável (BECK, 2019).

3.3 EXCEL

A partir das informações da barragem da Derivação do Rio Jordão, foram definidos os problemas estruturais de uma seção típica, sendo empregado o dimensionamento e verificação da estabilidade de acordo com os critérios descritos pela Eletrobrás. Esses cálculos serão feitos com auxílio de planilhas eletrônicas por meio do Software Microsoft Excel (RAMOS, 2021).

3.3.1 Análise determinística

A barragem da Derivação do Rio Jordão foi analisada estaticamente e as condições de carregamento adotadas para o presente estudo foram analisadas em conformidade com os critérios fornecido pela ELETROBRAS (2003), e optou-se por analisar cinco condições de carregamento e as ações atuantes consideradas em cada situação:

1. Condição de carregamento Normal (CCN): N.A. máximo normal;
2. Condição de carregamento Excepcional (CCE)- 1: N.A. máximo normal e drenos inoperantes;
3. Condição de carregamento Excepcional (CCE)- 2: N.A. máximo normal;
4. Condição de carregamento Excepcional (CCE)- 3: N.A. normal;
5. Condição de carregamento Excepcional (CCE)- 4: N.A. máximo maximumum.

Ainda, optou-se por analisar somente os fatores de segurança quanto a flutuação, ao tombamento e ao deslizamento.

3.3.2 Abordagem probabilística

Para determinação da estabilidade em termos probabilísticos da barragem da Derivação do Rio Jordão utilizou-se o método de Monte Carlo, que será empregado na rotina de cálculo das planilhas eletrônicas. Os passos dessa rotina, segundo NASSER (2012), consistem em:

- Representar por meio da definição de uma função de densidade de distribuição de probabilidade o comportamento de cada variável considerada.
- Gerar variáveis aleatórias dentro do intervalo pré-determinado;
- A partir dos cálculos determinísticos substituir as variáveis consideradas, repetir os passos até encontrar uma amostra satisfatória;

- Agregar e manipular os resultados de forma a obter uma função de densidade de distribuição de probabilidade para o problema.

As variáveis aleatórias foram geradas a partir da ferramenta de geração de números aleatório no Excel. Para todas as análises foram adotados como referência 50 mil simulações de Monte Carlo, devido às limitações de ferramentas e tempo desta tese, porém fornecem um valor para verificar a metodologia proposta.

As variáveis estocásticas do problema consideradas na análise estrutural são: o peso específico do concreto CCR, o ângulo de atrito no contato concreto-rocha, o peso específico do sedimento e ângulo de atrito interno do sedimento.

Para o CCR foram adotados o peso específico e o desvio padrão encontrado na fase de construção da barragem a partir do controle de qualidade realizado no local, com base nas 346 amostras analisadas em campo por Andriolo, Mussi e Oliveira (1998), e os dados obtidos estão apresentados na Tabela 26.

TABELA 26 – Peso específico da Barragem de Derivação do Rio Jordão

Peso específico do concreto (média)		COV	Desvio padrão		Nº de ensaios
24,99	kN/m ³	2,59 %	0,65	kN/m ³	346

Fonte: Andriolo, Mussi e Oliveira (1998)

Com base no trabalho publicado por Krüger (2008), estudando a barragem de Salto Caxias, foi adotado o ângulo de atrito concreto-rocha médio de 45° e o desvio padrão adotado para essa simulação de 2°. Para o peso específico médio do sedimento foi adotado o valor de 18 KN/m³, com um desvio padrão de 2 KN/m³. E para o ângulo de atrito médio interno do sedimento, foi optado por utilizar uma média de 30° e desvio padrão de 6°.

Todas as variáveis aleatórias foram consideradas de distribuição normal. Porém, caso os valores de ângulo de atrito estivessem muito próximos a valores negativos, uma distribuição de probabilidade logarítmica seria mais indicado.

Na Tabela 27 é apresentada resumidamente as variáveis adotadas, mostrando a escolha da distribuição de probabilidade, o valor médio, o desvio padrão, e o limite inferior e superior de cada parâmetro.

TABELA 27 – Parâmetros das variáveis adotadas no estudo da barragem da derivação do Rio Jordão

Variável	Valor médio	Desvio padrão	Limite superior	Limite inferior	Distribuição de Probabilidade
γ_c	24,99 kN/m ³	0,65 kN/m ³	26,28 kN/m ³	23,70 kN/m ³	normal
ϕ_{cr}	45°	2°	50°	40°	lognormal
γ_s	18,00 kN/m ³	2 kN/m ³	23 kN/m ³	13,00 kN/m ³	normal
ϕ_s	30°	6°	40°	20°	lognormal

Fonte: Andriolo, Mussi e Oliveira (1998) e Krüger (2008)

γ_c é o peso específico do concreto

ϕ_{cr} é o ângulo de atrito concreto-rocha

γ_s é o peso específico do sedimento

ϕ_s é o ângulo de atrito interno do sedimento

3.4 A BARRAGEM DE IRAÍ

A Barragem do Iraí foi construída com o objetivo de compor a rede de abastecimento de água de Curitiba e região metropolitana, além de colaborar na proteção contra cheias a jusante (COBA, 1996).

A barragem está inserida na bacia hidrográfica do Rio Iguaçu, no rio Iraí, e localiza-se entre os limites municipais de Pinhais e Piraquara, a 20 km do município de Curitiba, no estado do Paraná. Foi construída no período de junho de 1997 a outubro de 1999, tendo ocorrido o primeiro extravasamento em fevereiro de 2001 (SANEPAR, 2015). A localização da barragem é apresentada na Figura 25.

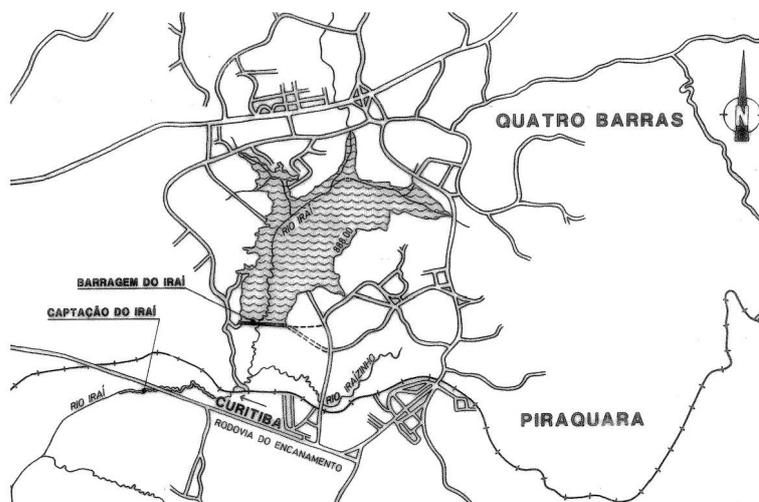


FIGURA 25 – Localização da Barragem de Iraí. Fonte: COBA (1996)

A Tabela 28 retirada de SNISB (2020) resume as informações pertinentes à segurança da Barragem do Iraí.

TABELA 28 – Resumo de informações registradas no SNISB

Código SNISB	19067
Município	Piraquara
UF	PR
Uso principal	Abastecimento humano
Empreendedor	SANEPAR
Altura	19 m
Capacidade total	58 hm ³
Categoria de risco	Baixo
Dano potencial associado	Alto
Regulada	Sim
Fiscalizador	Instituto das Águas do Paraná (atual IAT - Instituto Água e Terra)
Possui PAE	Não
Possui PSB	Sim
Possui Revisão periódica	Não
Última inspeção	30/12/2018

Fonte: (SNISB, 2020)

O maciço rochoso encontrado nas investigações iniciais ocorria em cotas bastante variáveis, mais próximo à superfície na zona central da várzea e afundando lateralmente nas ombreiras. Na zona de várzea era encontrada uma camada de aluvião argiloso muito compressível, com matéria orgânica, seguido de uma camada de areia e outra de solo residual migmatítico sobre o substrato rochoso. Nas ombreiras havia uma camada de coluvião de material argilo-siltoso, bastante mole, sobre a formação Guabirota-Tinguis, a profundidades não compatíveis a remoção, ocasionando o dimensionamento de bermas estabilizadoras de 10 m de largura. O corte longitudinal da estratigrafia encontrada é representada na Figura 26.

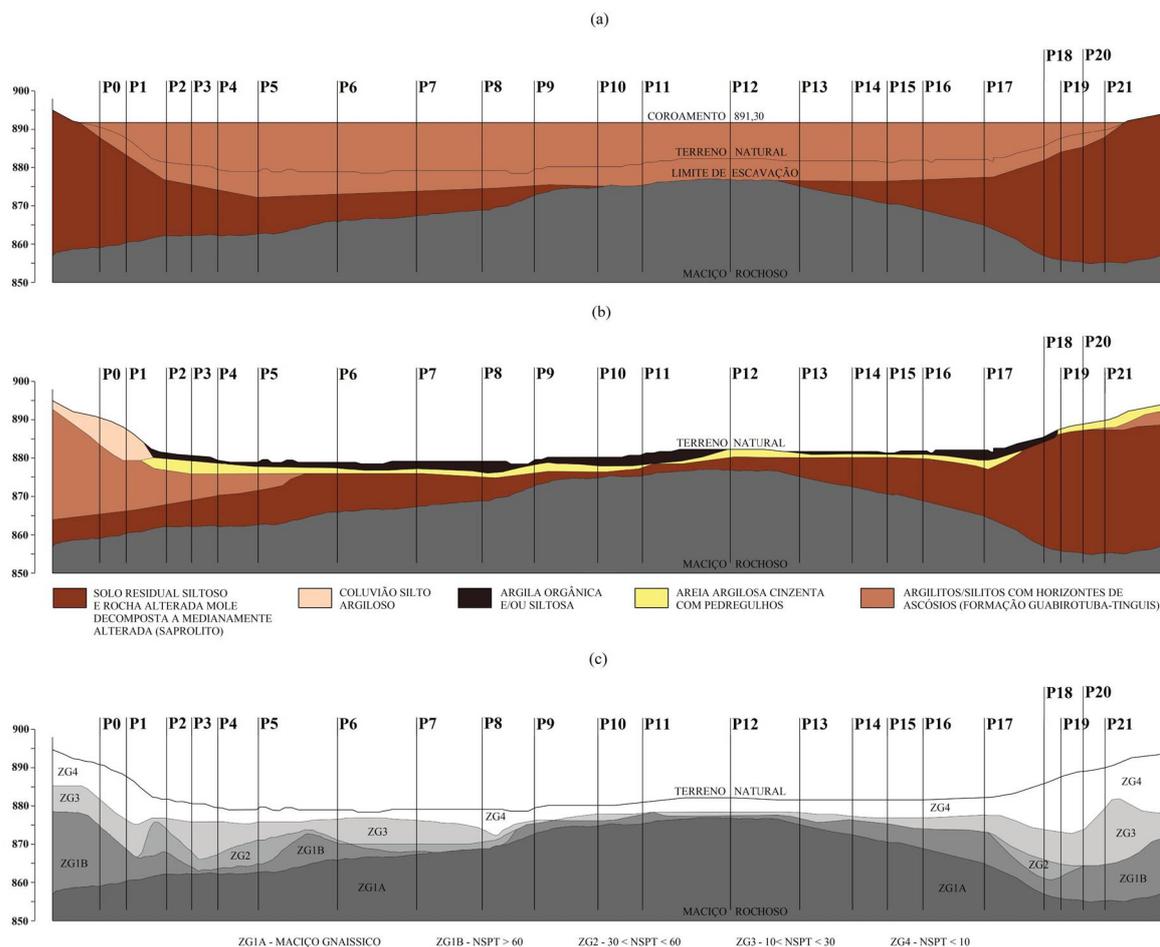


FIGURA 26 – Perfil estratigráfico longitudinal da Barragem de Iraí. Fonte: COBA (1996)

A barragem tem uma altura máxima de 19 m, taludes de montante com inclinações de 1:2,3, taludes de jusante com inclinações de 1:2 e crista com largura de 7 metros. A seção tipo corresponde a uma barragem de terra zoneada, constituída predominantemente por materiais coluvionares e sedimentos da Formação Guabirotuba e de depósitos aluvionares recentes, provenientes de jazidas de empréstimo localizadas no entorno da barragem e fora da área do reservatório. A Figura 27 representa a seção transversal típica da barragem (SANEPAR, 2015).

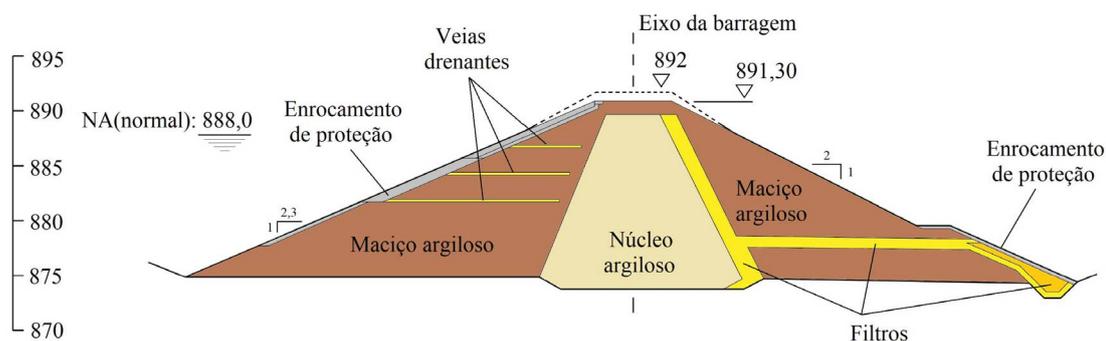


FIGURA 27 – Seção Transversal Típica da Barragem de Iraí. Fonte: adaptado de COBA (1996)

A função estanque do maciço terroso é conferida pela presença de um núcleo central constituído por materiais finos, como argilas, com baixa permeabilidade, provenientes de sedimentos coluvionares que também compõem o material de transição e os maciços estabilizadores. A zona externa da barragem é composta, a montante por materiais areno-siltosos e blocos de rochas graníticas que compõem o Rip-Rap na região superior próximo a crista (SANEPAR, 2015).

Fora da zona exterior do maciço de montante em materiais arenosos, o perfil tipo foi ainda dotado de veias drenantes com espessura de 0,25 m e espaçamento de 2,25 m que contribuíram na fase de construção, para a redução da pressão neutra e o parâmetro ru (relação entre a pressão neutra e a tensão total) e, na fase de rebaixamento rápido, para assegurar a descida mais rápida da linha de saturação (SANEPAR, 2015). A Tabela 29 resume as características gerais da Barragem de Iraí.

TABELA 29 – Principais características da Barragem do Iraí.

Rio represado	Rio Iraí
Localização	Entre Pinhais e Piraquara
Período de construção	1997-2000
Tipo da barragem	Terra zoneada
Comprimento da crista	1.220,0 m
Largura da crista	7,0 m
Altura máxima da crista sobre a fundação	19,0 m
Volume do Reservatório	58.10 ⁶ m ³
Área do reservatório	14,6 km ²
Tipo do vertedouro	Tulipa
Cota de extravasamento	888,0 m
Nível de pleno armazenamento (NPA)	888,0 m
Nível de água para a cheia decamilenar (NMC)	889,6 m
Cota de coroamento	891,3 m
Largura do coroamento	7 m

Fonte: SANEPAR (2015)

Para a construção foi necessário a escavação de 425,8.10³ m³ de terra e compactação de 786.10³ m³, além da utilização de um total de 2670 m³ de concreto estrutural para a construção das estruturas auxiliares. No tratamento das fundações foram realizados 2400 m de furação e 140 toneladas de cimento para as injeções (COBA, 1996).

3.4.1 Complexidade geológica local

As investigações geológico-geotécnicas na fase de projeto da barragem compreenderam ensaios *in situ* e laboratoriais. A Tabela 30 apresenta a síntese dos trabalhos investigativos realizados por (COBA, 1996).

TABELA 30 – Campanha de investigações geológico-geotécnicas da Barragem do Iraí.

Ensaio geológico-geotécnicos realizados	
Geofísica	3880 m de caminhamentos para identificação do contato solo/rocha
Sondagens à Percussão (SPT + Permeabilidade)	47 sondagens em 772 m perfurados
Poços de inspeção	29 poços
Permeabilidade <i>in situ</i> de solos	15 sob carga constante 4 sob carga variável em 6 furos de sondagem
Permeabilidade <i>in situ</i> de rochas	10 ensaios em 5 furos de sondagem
Granulometria	16 amostras
Limites de Atterberg	16 amostras
Massa específica dos grãos	7 amostras
Adensamento	18 amostras
Triaxial	32 amostras
Cisalhamento Direto	15 amostras
Permeabilidade	5 amostras
Expansão	6 amostras

Fonte: (COBA, 1996)

Em resumo, os resultados encontrados na referida campanha de investigações foram a presença de duas formações, Guabirotuba e Tinguis (nas ombreiras), uma argila mole orgânica (aluvião), um solo residual migmatítico e um solo coluvionar (nas ombreiras).

A Formação Guabirotuba é constituída por uma série sedimentar em que ocorrem intercalações de ascósios e argilitos - com alguma areia e pedregulho com uma tonalidade típica, cinzenta a cinzenta-esverdeada, por vezes vermelha quando alterada (COBA, 1996).

A Formação Tinguis foi, por muito tempo, considerada um produto de intemperismo da Guabirotuba. Mas posteriormente constatou-se que na realidade a Formação Tinguis constitui uma série sedimentar independente composta por arcósios com finas intercalações de argilitos, apresentando estratificação pouco marcada, ondulada e muito irregular (COBA, 1996).

Subjacente às formações Guabirota e Tinguís, nas ombreiras da barragem e bordeando o reservatório, ocorre uma camada de colúvio vermelho acastanhado, argilo-arenoso, com alguma areia e seixo fino, com espessura variável, em média da ordem de 5 metros (COBA, 1996).

Nas investigações preliminares realizadas por COBA (1996) encontrou-se, ainda, um solo residual migmatítico resultante do intemperismo dos gnaisses migmatíticos, silto-argilosa com areia e algum cascalho. Este solo apresenta tonalidade amarelada a acastanhada clara, com laivos alaranjados, eventualmente avermelhados.

Os aluviões presentes na região são essencialmente argilas orgânicas cinzentas com algum silte, argilas orgânicas negras, com porcentagem de turfa e areias médias a grosseiras cinzentas e brancas, essencialmente quartzosas (COBA, 1996). A remoção completa desse solo foi realizada na etapa anterior ao tratamento das fundações.

Em função da qualidade, no que se refere a resistência e permeabilidade dos solos, um zoneamento geotécnico dos terrenos da fundação da barragem foi estabelecido, obedecendo a nomenclatura a seguir:

- **ZG1:** formações de rocha alterada (ZG1A) e solo residual migmatítico (ZG1B), com valores de N_SPT maiores que 60, coeficientes de permeabilidade entre 1.10^{-4} cm/s a 5.10^{-5} cm/s ;
- **ZG2:** solo residual migmatítico e formação Guabirota-Tinguís, com valores de N_SPT entre 30 e 60, coeficientes de permeabilidade entre 1.10^{-3} cm/s a 5.10^{-4} cm/s ;
- **ZG3:** solo com valores de N_SPT entre 10 e 30, coeficientes de permeabilidade entre 1.10^{-4} cm/s a 5.10^{-4} cm/s ;
- **ZG4:** argila orgânica e depósitos de arenosos fofos, com valores de N_SPT menores que 10, coeficientes de permeabilidade entre 5.10^{-5} cm/s a 1.10^{-3} cm/s ;

3.4.2 Materiais de construção

Para a caracterização dos solos utilizados como materiais de construção da barragem foram realizados ensaios *in situ* e laboratoriais. A Tabela 31 relaciona o quantitativo de ensaios realizados.

Em suma, os materiais especificados para a construção da barragem são das formações Guabirota e Tinguís, e um solo coluvionar.

TABELA 31 – Campanha de investigações geotécnicas dos materiais de construção da Barragem do Iraí.

Ensaio geotécnicos realizados	
Poços de inspeção	115 poços
Sondagem manual	35 furos
Granulometria	76 amostras
Limites de Atterberg	98 amostras
Massa específica dos grãos	7 amostras
Umidade natural	44 amostras
Compactação Proctor	15 amostras
Adensamento	9 amostras
Triaxial	18 amostras
Cisalhamento Direto	6 amostras
Permeabilidade	8 amostras
Expansão	10 amostras

Fonte: (COBA, 1996)

O zoneamento da seção transversal típica foi definido através das características encontradas nos solos de empréstimo, sendo estabelecidas as seguintes regiões:

- **1'**: núcleo central, constituído por materiais selecionados da formação Tinguis e dos materiais coluvionares, com mais finos e menos permeáveis;
- **1**: corpo da ensecadeira e maciços estabilizadores, constituídos por materiais da formação Tinguis e coluvionares;
- **2**: veias drenantes, filtro chaminé e tapete subhorizontal, constituídos por areias limpas com percentagem de finos inferior a 5%;
- **3**: zona exterior de montante, constituída por materiais areno-siltosos;
- **4**: transição para o material fino do corpo do aterro, constituído de materiais drenantes;
- **5**: paramento de montante, constituído por enrocamentos com D_{50} médio de 0,32 m;
- **6**: zona exterior do paramento de montante com blocos de maior dimensão, constituído de enrocamentos para proteção;
- **7**: zona inferior do paramento de jusante, constituído de enrocamentos de granulometria extensa.

A Tabela 32 apresenta os valores dos parâmetros da fundação e dos materiais de construção utilizados nas análises de estabilidade.

TABELA 32 – Parâmetros geotécnicos da fundação e dos materiais de construção da Barragem do Iraí.

Parâmetros geotécnicos da fundação e dos materiais de construção										
Material	Peso Específico kN/m^3	Coesão Efetiva kPa	Ângulo de Atrito	Permeabilidade Saturada m/s	Teor de Umidade volumétrica saturada	Compressibilidade $/kPa$	Anisotropia ky'/kx'	Módulo de Elasticidade MPa	Coesão Total	Coefficiente de Poisson
1 - Argilo-siltosos	20	10	30	5.10^{-8}	44,5	1.10^{-5}	5	5500	10	0,4
1' - Argilo-siltosos selecionados	20	10	30	5.10^{-8}	38,1	1.10^{-5}	5	5500	10	0,4
2 - Filtros	19	0	35	1.10^{-4}	31,9	1.10^{-5}	1	20000	0	0,3
3 - Arenosiltosos	16	0	20	2.10^{-5}	22,2	1.10^{-5}	1	5500	0	0,4
4 - Drenos	20	0	36	1.10^{-2}	37,4	1.10^{-5}	1	35000	0	0,35
5, 6 e 7 - Enrocamentos	19	0	36	1.10^{-2}	37,4	1.10^{-5}	1	15000	0	0,35
ZG1B - zona central	18	0	29	1.10^{-5}	82,5	1.10^{-5}	1	12000	10	0,35
ZG1B - P18	18	0	25	1.10^{-5}	82,5	1.10^{-5}	1	12000	10	0,35
ZG1B - P20	18	0	15	1.10^{-5}	82,5	1.10^{-5}	1	12000	10	0,35
ZG2 - areia	18	0	25	1.10^{-6}	33,9	1.10^{-5}	1	8000	0	0,4
ZG2 - P18	18	0	15	5.10^{-6}	82,5	1.10^{-5}	1	8000	0	0,4
ZG2 - P20	18	0	20	5.10^{-6}	82,5	1.10^{-5}	1	8000	0	0,4
ZG3	18	10	19	5.10^{-5}	23,4	1.10^{-5}	1	8000	0	0,4
ZG4 - colúvio	18	0	20	1.10^{-6}	30,7	1.10^{-5}	1	12000	10	0,35
ZG4 - argila org.	16	0	20	1.10^{-9}	1040,8	1.10^{-5}	1	4000	0	0,45
ZG4 - Guabirota	16	0	19	1.10^{-6}	26,2	1.10^{-5}	1	4000	0	0,45

Fonte: (COBA, 1996)

3.4.3 Incertezas na caracterização de solos

A memória técnica da Barragem do Iraí (COBA, 1996) e os relatórios produzidos pela SANEPAR nas ocasiões de revisões periódicas (SANEPAR, 2015) foram consultados a fim de obter um banco de dados que relacionasse o máximo possível de resultados de ensaios de caracterização geotécnica dos solos encontrados na fundação e dos materiais de construção utilizados no empreendimento.

Com isso, pode-se, inclusive, inserir na variabilidade dos parâmetros as incertezas de amostragem, de ensaios e, ainda, as mudanças geradas pela evolução da idade do empreendimento, geradas a partir do funcionamento da barragem, bem como dos processos naturais de intemperismo. Desta maneira, obteve-se os valores de média e desvio-padrão através dos dados apresentados na Tabela 32.

3.4.4 Incertezas de cálculo

A utilização de um software comercial possibilitou rapidez e eficiência à modelagem da barragem. Os programas utilizados amplamente utilizados por empresas envolvidas em projetos e em segurança de barragens no país, conforme contatos efetuados pela autora deste trabalho.

O objetivo deste trabalho é visitar conceitos da análise de riscos e propor metodologia para sua aplicação em barragens do país. Assim sendo, seria inadequado aos prazos do trabalho de doutorado o desenvolvimento de programas específicos. A opção por softwares comerciais amplamente utilizados é justificada pelo fornecimento de metodologia que pode ser imediatamente aplicada com a infraestrutura básica das empresas envolvidas em barragens.

Sendo o tempo de modelagem primordial para a viabilidade das metodologias utilizadas pelos diversos profissionais envolvidos nos projetos de barragens. Porém, para fins de pesquisa, investigou-se a legitimidade do método de Simulações de Monte Carlo (SMC) através da elaboração de um algoritmo paralelo, em linguagem de programação Phyton, melhor descrito no item 3.2.5 neste trabalho.

3.5 A BARRAGEM DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO

A barragem é do tipo concreto a gravidade e está localizada no estado do Paraná, no município de Reserva do Iguaçu. Tem dados e informações à disposição em trabalhos já publicados, promovendo os subsídios necessários à realização das análises probabilísticas.

A seção da barragem analisada é a seção vertente, conforme mostra a Figura 28. A barragem está em operação desde 1997 e foi construída utilizando o emprego de concreto compactado com rolo (CCR), possuindo 550 metros de comprimento e com

altura no ponto mais alto de 97 metros. A seção vertedoura incorporada à barragem é do tipo soleira livre, possuindo 300 metros de comprimento (COPEL, 2021). O principal objetivo da construção da barragem conforme Levis (2006) é derivar a água do Rio Jordão para o reservatório da Usina Hidrelétrica Governador Ney Braga, por meio de um túnel de adução de 4705 metros de extensão, fornecendo um acréscimo de 62,40 MW de capacidade. Além disso, a Usina de derivação do Rio Jordão possui capacidade instalada de 6,54 MW (COPEL, 2021). A Figura 28 apresenta uma vista de jusante da barragem da Derivação do Rio Jordão.



FIGURA 28 – Barragem de Derivação do Rio Jordão. Fonte: COPEL (2021)

A seção típica da parte vertente é apresentada na Figura 29, contendo as informações de geometria necessárias para calcular as ações atuantes na seção do barramento.

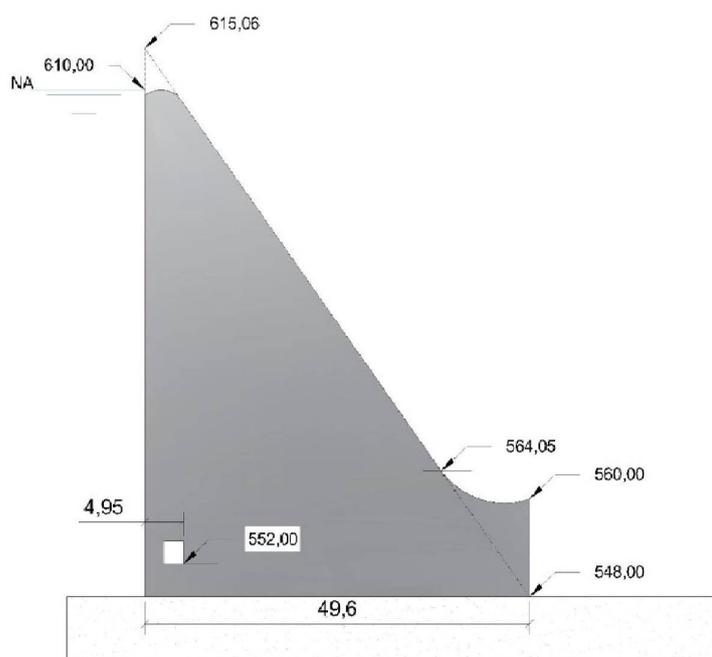


FIGURA 29 – Seção típica da soleira vertente- Barragem de Derivação do Rio Jordão. Fonte: adaptado de Levis (2006)

Na fase de construção da barragem de Derivação do Rio Jordão, foram utilizados ensaios de compactação, onde para cada camada de CCR foi realizado o ensaio para estimativa da densidade do concreto utilizando o densímetro nuclear, o que permitiu obter o peso específico médio do concreto de $24,99 \text{ kN/m}^3$ (ANDRIOLO; MUSSI; OLIVEIRA, 1998).

Quanto à escolha dos parâmetros geotécnicos levou-se em consideração regiões que possuíssem o mesmo embasamento geológico. Assim, buscou-se por barragens situadas no terceiro planalto do estado do Paraná. Conforme Levis (2006), a barragem em estudo está assentada sobre derrame de rochas basálticas, característica encontrada sobre essa região do estado. Em vista disso, os parâmetros geotécnicos adotados foram os mesmos correspondentes da Barragem de Salto Caxias, a qual possui características semelhantes. Desse modo o ângulo de atrito adotado para a simulação é 45° e a coesão interface concreto-rocha será de 290 kN/m^2 (KRÜGER, 2008).

O peso específico do sedimento conforme o Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios (CARVALHO, 2000) poderá ser calculado segundo o tipo de operação desse reservatório, do grau de compactação dos sedimentos e da granulometria. O peso específico do sedimento adotado para realização das simulações será o valor de 18 kN/m^3 .

Os níveis de água considerados para determinações das ações hidrostáticas serão adotados conforme consta na Tabela 33. Destaque deve ser dado para os níveis

de água a jusante que foram adotados por esta autora.

TABELA 33 – Níveis de água adotados no reservatório

Nível de água no reservatório	N.A. a montante (m)	N.A. a jusante (m)
N.A. Máximo Maximorum	66,80	1,00
N.A. Máximo normal	62,00	1,00
N.A. Mínimo normal	56,00	1,00

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 BARRAGEM DO IRAÍ

4.1.1 Levantamento de dados

As Etapas 1 a 4 da metodologia proposta correspondem ao levantamento de informações sobre a barragem. Através do memorial de COBA (1996) e de outros documentos fornecidos pela SANEPAR, pode-se preencher as Tabelas 34 a 37.

TABELA 34 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 1

1. IDENTIFICAÇÃO					
do Empreendedor			do Fiscalizador		
SANEPAR			ANA		
Dados Básicos:		Qual é o tipo de barragem?		Qual é o tipo de Fundação?	
Altura:	19 m		Concreto		Solo mole
Volume de reservação:	58 hm ³	X	Aterro	X	Solo firme
Uso(s):	Abastecimento		Rejeito	X	Rocha sã
Idade:	22 anos		Mista		Rocha fraturada
Houve alguma manutenção estrutural de grande porte?	Não		Outro	Sim	Há tratamento nas fundações?

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 35 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 2

2. BANCO DE DADOS					
Assinale os documentos que estão disponíveis:					
X	Pré-projeto	X	Projeto básico		Projeto executivo
	Diário de obra	X	As built	X	Relatório(s) de manutenções
Volume de informações é suficiente?					
Sim			Não		
seguir para a próxima etapa			coletar mais informações		

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 36 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 3

3. MATERIAIS									
Quais os parâmetros, dos materiais presentes na barragem, que têm suas definições completas?									
Solo(s)		Concreto(s)		Aterro(s)		Rocha(s)		Outro(s)	
Peso específico:	X	Peso específico:		Peso específico:	X	Peso específico:	X	Peso específico:	
Coesão:	X	Coesão:		Coesão:	X	Coesão:	X	Coesão:	
Ângulo de atrito:	X	Coef. de atrito:		Ângulo de atrito:	X	Coef. de atrito:	X	Ângulo de atrito:	
Coef. de permeabilidade:	X	Coef. de permeabilidade:		Coef. de permeabilidade:	X	Coef. de permeabilidade:	X	Coef. de permeabilidade:	

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 37 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 4

4. CARREGAMENTOS									
Os casos de carregamentos abaixo têm suas definições completas?									
Construção		1º enchimento		Rebaixamento Rápido		Sismos			
						Aceleração vertical:		Aceleração horizontal:	
Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Percolação permanente								Efeito cascata	
N.A. mínimo:		N.A. normal:		N.A. máximo:		N.A. maximorum:			
Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não

Fonte: elaborado pela autora.

A partir das informações levantadas, as análises de estabilidade puderam ser realizadas.

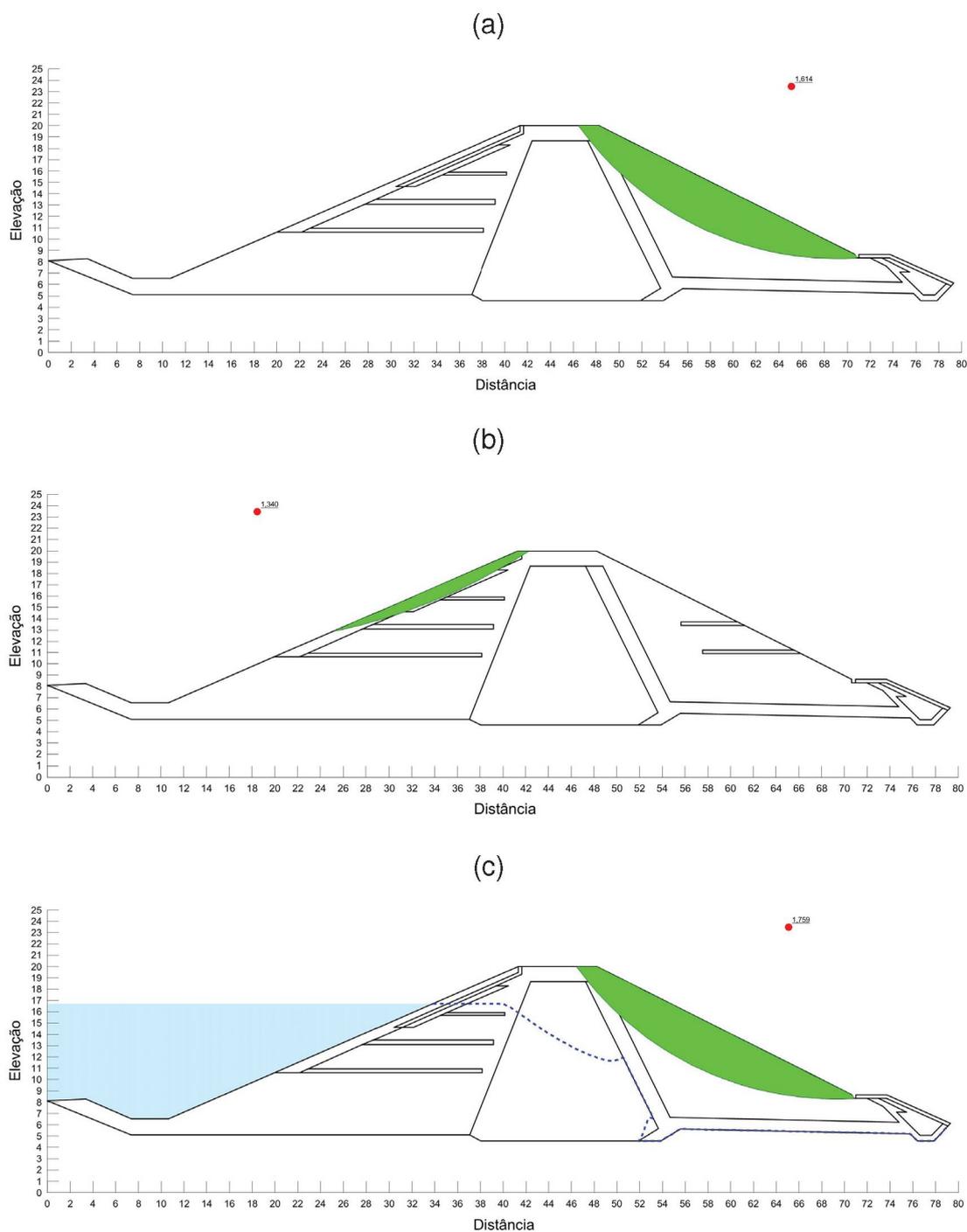
4.1.2 Análises determinísticas

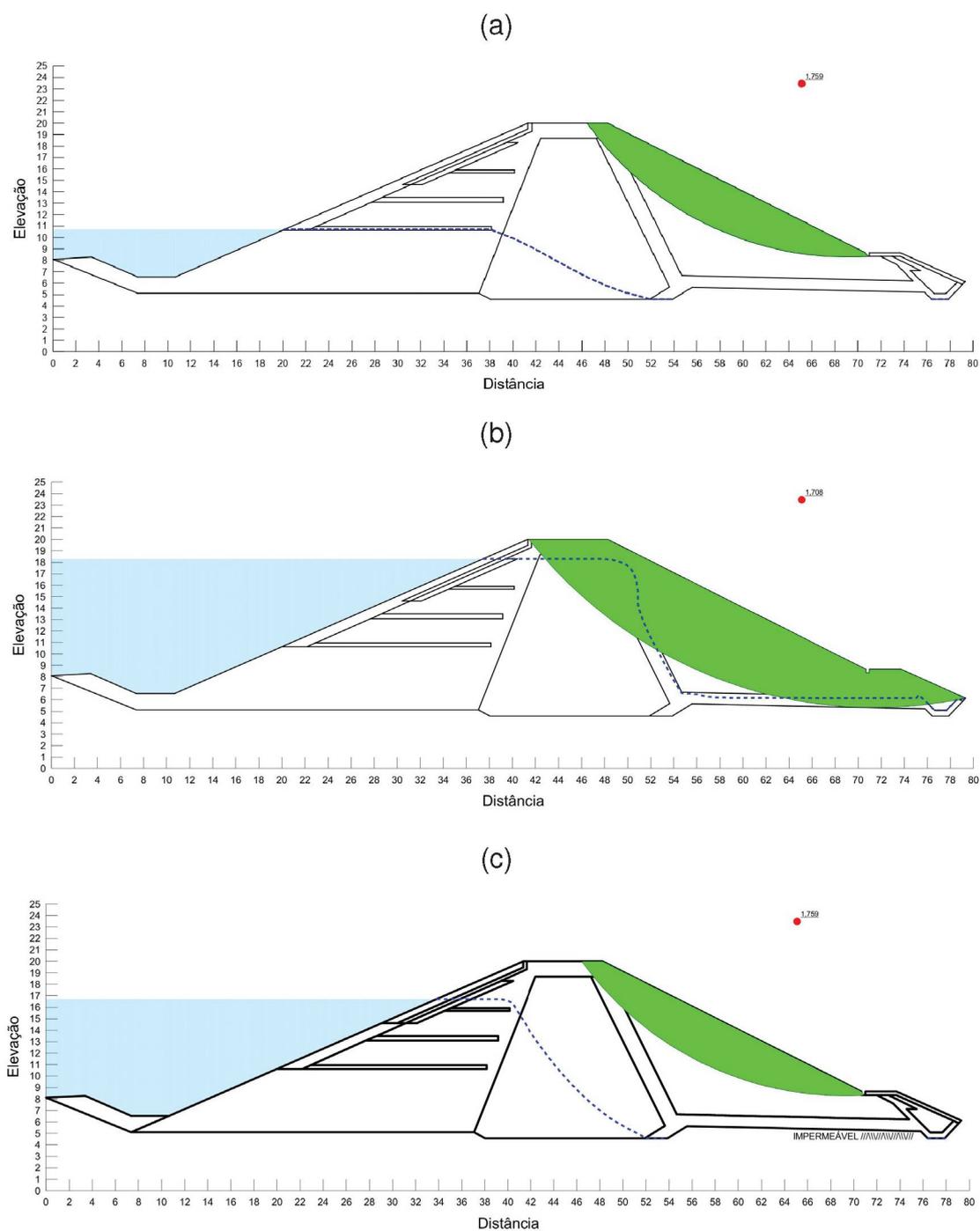
De acordo com os desenhos de projeto da Barragem de Iraí, desenvolvidos por (COBA, 1996), foram estudadas 22 seções transversais (P0 a P21) localizadas por toda a extensão da barragem (como mostra a Figura 26).

As análises de estabilidade de taludes das seções transversais da Barragem de Iraí foram realizadas no software SLOPE/W, através do método de Bishop Simplificado. A superfície potencial de ruptura foi determinada através da localização provável das entradas e saídas da circunferência que a definem.

As Figuras 30 a 32 apresentam os resultados das análises efetuadas na seção P11, levando em consideração todos os carregamentos estudados. Pode-se notar que a superfície potencial de ruptura não é a mesma para todos os carregamentos.

Isto evidencia a característica iterativa dos métodos de equilíbrio limite comumente utilizados na análise de estabilidade de taludes.





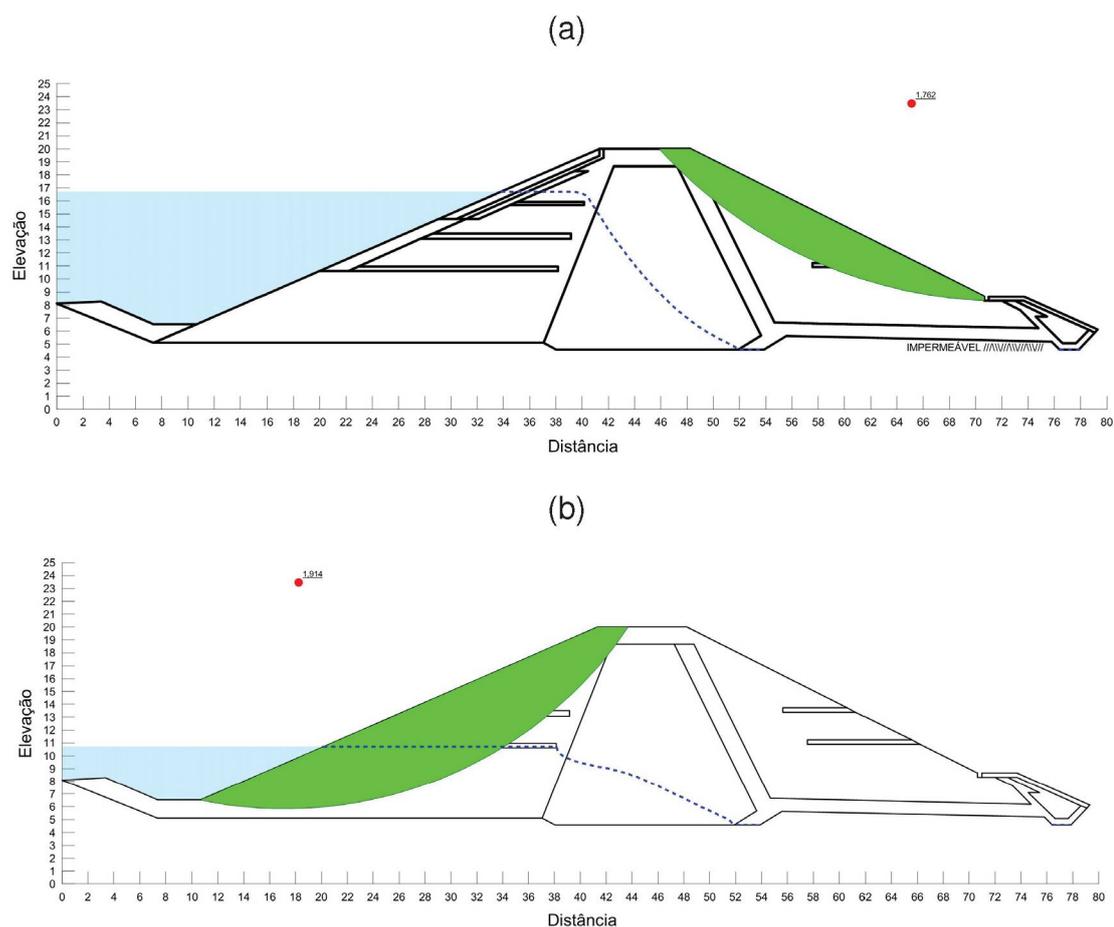


FIGURA 32 – Resultados determinísticos da seção P11: (a) Após deformações na fundação e corpo do aterro; e (b) No rebaixamento rápido do reservatório. Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 38 apresenta os resultados de fatores de segurança encontrados para todos os casos de carregamento considerados e em todas as seções transversais da barragem.

TABELA 38 – Resumo dos resultados das análises de estabilidade realizadas para a Barragem do Iraí

	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
(1)	3,877	2,373	2,149	2,006	2,006	1,614	1,580	1,576	1,579	1,653	1,642
(2)	5,012	2,724	1,888	1,952	1,969	1,690	1,584	1,602	1,592	1,706	1,761
(3)	4,051	2,326	2,168	1,997	2,029	1,693	1,672	1,613	1,642	1,800	1,791
(4)	4,051	2,197	2,130	1,994	2,020	1,693	1,659	1,607	1,639	1,800	1,791
(5)	4,051	2,229	2,138	1,996	2,023	1,693	1,665	1,610	1,641	1,800	1,791
(6)	4,051	2,259	2,145	1,997	2,029	1,693	1,671	1,613	1,642	1,800	1,791
(7)	4,051	2,456	2,174	2,002	2,042	1,693	1,692	1,624	1,624	1,800	1,791
(8)	5,613	1,893	1,409	1,275	1,291	1,110	1,124	1,115	1,115	1,145	1,126
(9)	3,953	1,761	1,234	1,383	1,654	0,610	1,132	1,140	1,140	1,159	1,715
(10)	3,515	1,139	1,837	1,695	1,719	1,469	1,490	1,459	1,460	1,594	1,600
(11)	4,097	1,379	2,121	1,996	2,041	1,652	1,684	1,653	1,660	1,796	1,799
	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21
(1)	1,614	1,629	1,629	1,627	1,582	1,600	1,779	2,036	2,246	2,472	2,407
(2)	1,785	1,865	1,814	1,767	1,678	1,680	1,971	2,044	2,280	1,901	2,804
(3)	1,759	1,775	1,774	1,772	1,653	1,655	1,923	2,141	1,998	2,559	2,380
(4)	1,759	1,775	1,774	1,772	1,650	1,650	1,923	2,054	1,854	2,439	2,236
(5)	1,759	1,775	1,774	1,772	1,652	1,652	1,923	2,083	1,887	2,502	2,295
(6)	1,759	1,775	1,774	1,772	1,653	1,655	1,923	2,109	1,914	2,545	2,349
(7)	1,759	1,775	1,774	1,772	1,659	1,664	1,923	2,182	2,111	2,603	2,505
(8)	1,100	1,125	1,146	1,136	1,120	1,245	1,288	1,259	1,297	1,304	2,176
(9)	1,708	1,775	1,119	1,029	1,185	1,213	1,546	1,502	1,492	2,129	2,020
(10)	1,571	1,581	1,571	1,572	1,477	1,467	1,672	1,748	1,558	2,093	1,961
(11)	1,762	1,779	1,769	1,792	1,677	1,662	1,925	2,098	1,916	2,547	2,349

- (1) Final de construção: Talude de jusante
(2) Final de construção: Talude de montante
(3) Enchimento do reservatório, em 3 meses
(4) Variações dos níveis operacionais: NA Máximorum (891 m)
(5) Variações dos níveis operacionais: NA Máximo (889,3 m)
(6) Variações dos níveis operacionais: NA Normal (888 m)
(7) Variações dos níveis operacionais: NA Mínimo (882 m)
(8) Rebaixamento rápido, de 888 a 882 em 12 horas
(9) Eficiência dos drenos, em 25% da capacidade
(10) Sismos
(11) Deformação lenta

Fonte: elaborado pela autora

É possível constatar, na Tabela 38, que os valores encontrados atestam a verificação de estabilidade da barragem a partir das condições analisadas, fornecendo valores acima dos estabelecidos pela ELETROBRAS (2003).

Porém, ao completar a Tabela 39 correspondente a Etapa 5 da metodologia proposta, pode-se perceber que o volume de informações a respeito dos parâmetros dos materiais propicia uma análise probabilística.

TABELA 39 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 5

5. ESTABILIDADE									
Há informações suficientes para analisar a condição de estabilidade da barragem?									
Deslizamento		Tombamento		Capacidade de suporte das fundações		Tensões internas		Filtros e Drenos	
Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Qual a natureza da análise de estabilidade, com base nos dados disponíveis, possível de ser realizada?									
Determinística				Probabilística (mínimo de 3 informações para cada parâmetro envolvido na análise)				X	

Fonte: elaborado pela autora.

4.1.3 Análises probabilísticas

Com o resultado das análises determinísticas pode-se realizar o teste de convergência, como sugerido por Beck (2019), a fim de determinar o número de simulações de Monte Carlo necessárias para a simulação de evento real. A Figura 33 apresenta o resultado do teste. Nele pode-se observar que a partir de 100.000 repetições já se obtém a estabilidade do coeficiente de segurança do problema. A probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade, apresentados na Figura 34 também demonstram o mesmo.

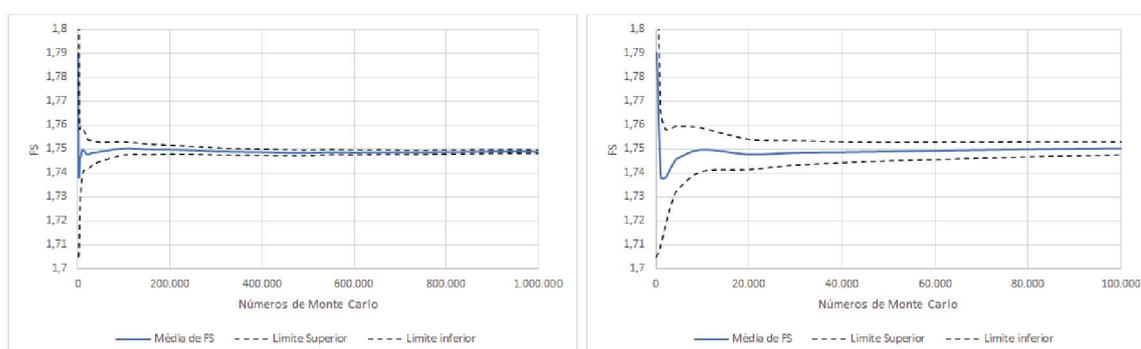


FIGURA 33 – Teste de convergência para o número de simulações de Monte Carlo. Fonte: elaborado pela autora.

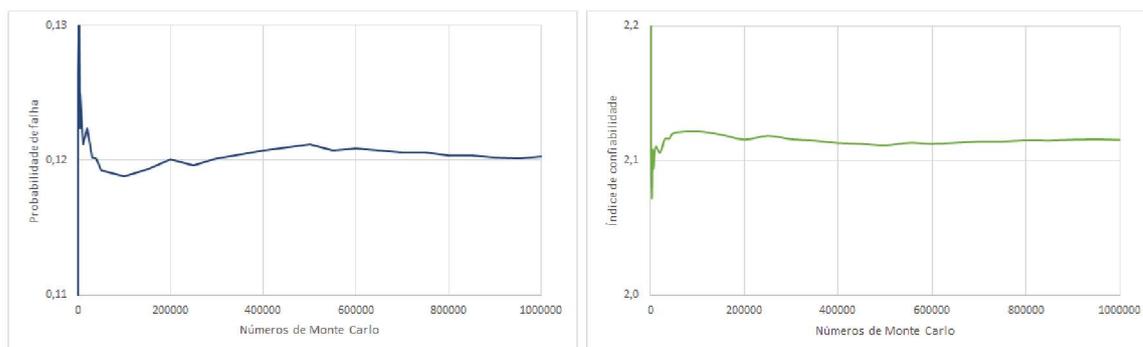


FIGURA 34 – Probabilidade de falha e índice de confiabilidade *versus* número de simulações de Monte Carlo. Fonte: elaborado pela autora.

Portanto, as análises de estabilidade, com abordagem probabilística, foram realizadas com base no método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado e utilizando a Simulação de Monte Carlo, no ambiente do SLOPE/W. A superfície potencial de ruptura também foi determinada através da localização provável das entradas e saídas da circunferência que a definem. As análises foram realizadas para 3 principais seções transversais (P5, P11 e P14) com 100.000 repetições. Estas seções foram selecionadas de acordo com a geometria da barragem, pois representam 3 perfis típicos da barragem.

Os parâmetros de entrada foram modificados para uma distribuição de probabilidade, determinada de acordo com o comportamento probabilístico da variável. Destaque deve ser dado aos parâmetros de ângulo de atrito e coesão efetiva, que foram determinadas com comportamento lognormal, pois não admitem valores numéricos negativos. Estas informações são mostradas na Tabela 40.

TABELA 40 – Variáveis aleatórias utilizadas na análise de estabilidade da Barragem de Iraí

	Peso específico (kN/m^3)		Coesão efetiva (kPa)		Ângulo de atrito ($^\circ$)		Correlação $c-\phi$
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	
Distribuição de probabilidade:	Normal		Log-normal		Log-normal		
1 - Argilo-siltosos	20	0,65	10	8,9	30	2,62	-1
1' - Argilo-siltosos selecionados	20	0,65	10	8,9	30	2,62	-1
2 - Filtros	19	1,79	0	0,74	35	4,61	-1
3 - Arenosiltosos	16	1,79	0	0,74	20	4,61	-1
4 - Drenos	20	1,79	0	0,57	36	6,17	-1
5,6 e 7 - Enrocamentos	19	1,79	0	0,57	36	6,17	-1

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 41 resume os resultados de fator de segurança mínimo (FS_{min}), fator de segurança médio (μ_{FS}), desvio-padrão da distribuição de probabilidade do fator de segurança (σ_{FS}), a probabilidade de falha da superfície potencial de ruptura (P_f) e o índice de confiabilidade (β) encontrados para os carregamentos considerados.

FS_{min} Fator de segurança mínimo μ_{FS} Fator de segurança médio σ_{FS} Desvio-padrão da distribuição de probabilidade do fator de segurança

TABELA 41 – Resumo dos resultados das análises probabilísticas de estabilidade realizadas para a Barragem do Iraí

P5					
Carregamento	FS_{min}	μ_{FS}	σ_{FS}	P_f	β
(1) Final de construção: Talude de jusante	0,419	6,067	0,721	2.10^{-2}	7,026
(2) Final de construção: Talude de montante	0,928	5,828	0,788	2.10^{-2}	6,126
(3) Enchimento do reservatório ¹	1,311	5,834	0,978	$\leq 10^{-7}$	4,941
(4) NA Máximorum ² (891 m)	0,950	7,996	8,112	5.10^{-2}	0,862
(5) NA Máximo ² (889,3 m)	1,656	9,467	10,887	$\leq 10^{-7}$	0,778
(6) NA Normal ² (888 m)	1,251	5,679	0,978	$\leq 10^{-7}$	4,786
(7) NA Mínimo ² (882 m)	0,950	7,996	8,112	5.10^{-2}	0,862
(8) Rebaixamento rápido ³	2,300	6,779	4,462	$\leq 10^{-7}$	1,295
(9) Ineficiência dos drenos e NA Máximo	0,950	7,996	8,112	5.10^{-2}	0,862
(10) Sismos	0,769	6,462	5,508	5.10^{-2}	0,992
(11) Deformação lenta	0,816	7,959	8,988	5.10^{-2}	0,774
P11					
Carregamento	FS_{min}	μ_{FS}	σ_{FS}	P_f	β
(1) Final de construção: Talude de jusante	0,654	6,762	6,230	1.10^{-2}	0,925
(2) Final de construção: Talude de montante	1,286	7,912	6,059	$\leq 10^{-7}$	1,141
(3) Enchimento do reservatório ¹	1,147	8,763	12,695	$\leq 10^{-7}$	0,611
(4) NA Máximorum ² (891 m)	0,769	7,461	4,316	5.10^{-2}	1,497
(5) NA Máximo ² (889,3 m)	0,769	7,461	4,316	5.10^{-2}	1,497
(6) NA Normal ² (888 m)	0,769	7,461	4,316	5.10^{-2}	1,497
(7) NA Mínimo ² (882 m)	0,769	7,461	4,316	5.10^{-2}	1,497
(8) Rebaixamento rápido ³	1,779	6,813	2,371	$\leq 10^{-7}$	2,452
(9) Ineficiência dos drenos e NA Máximo	0,875	7,784	3,902	5.10^{-2}	1,739
(10) Sismos	0,934	7,291	7,972	5.10^{-2}	0,789
(11) Deformação lenta	0,924	7,702	6,601	5.10^{-2}	1,015
P14					
Carregamento	FS_{min}	μ_{FS}	σ_{FS}	P_f	β
(1) Final de construção: Talude de jusante	0,565	5,049	0,732	2.10^{-2}	5,529
(2) Final de construção: Talude de montante	0,469	6,173	1,880	1.10^{-2}	2,752
(3) Enchimento do reservatório ¹	0,910	8,423	10,865	1.10^{-1}	0,683
(4) NA Máximorum ² (891 m)	1,082	5,562	0,819	$\leq 10^{-7}$	5,573
(5) NA Máximo ² (889,3 m)	1,082	5,562	0,819	$\leq 10^{-7}$	5,573
(6) NA Normal ² (888 m)	1,082	5,562	0,819	$\leq 10^{-7}$	5,573
(7) NA Mínimo ² (882 m)	1,164	8,725	9,933	$\leq 10^{-7}$	0,778
(8) Rebaixamento rápido ³	1,140	6,376	0,733	$\leq 10^{-7}$	7,335
(9) Ineficiência dos drenos e NA Máximo	1,068	7,427	3,358	$\leq 10^{-7}$	1,914
(10) Sismos	0,553	4,755	0,374	5.10^{-2}	10,030
(11) Deformação lenta	1,527	7,807	4,473	$\leq 10^{-7}$	1,522

¹ Níveis operacional Normal, em 10 dias

² Variações dos níveis operacionais

³ Variação do nível operacional de 889,3 para 882 m, em 12 horas

Fonte: elaborado pela autora

O SLOPE/W considera crítica a superfície potencial que tem como resultado o menor FS determinado pelo método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado. Mas,

após a abordagem probabilística ser inserida na modelagem, a superfície potencial de ruptura que pode resultar em um FS mínimo, geralmente, não é a mesma determinada pelo método determinístico. Por isso, se fez necessário a escolha manual da SPR que apresentava o $FS_{\text{mínimo}}$ de menor magnitude, para então anotar seus resultados probabilísticos. A Figura 35 exemplifica a diferença obtida na superfície crítica de ruptura determinística (em vermelho) e a superfície crítica de ruptura probabilística (em azul) para a seção transversal P11 da barragem em estudo.

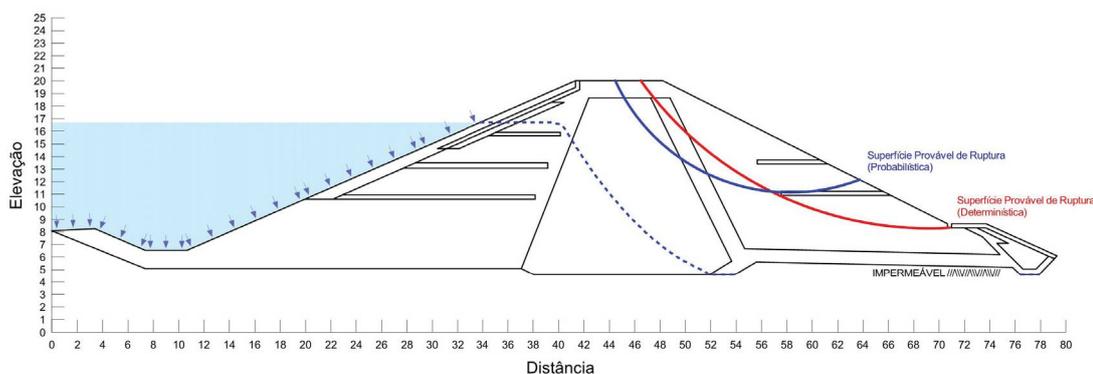


FIGURA 35 – Comparativo de Superfícies Potenciais de Ruptura para análises determinísticas e probabilísticas, na seção P11 para o regime permanente em nível de reservatório Normal. Fonte: elaborado pela autora.

Por isso, a análise probabilística se faz importante, uma vez que podem haver diferenças nas SPR obtidas através dos métodos determinísticos e probabilísticos. A Figura 35 evidencia esta diferença e auxilia a alertar o leitor de que os locais frágeis identificados na análise determinística pode não indicar corretamente o local de mais provável ruptura.

Ao determinar a estabilidade e segurança da barragem do Iraí, pode-se partir para a Etapa 6 da metodologia proposta.

Na Etapa 6 (Tabela 42) estão relacionados os instrumentos cuja existência esta autora teve conhecimento. Mas sabe-se que outros equipamentos de instrumentação estão instalados na barragem. Porém, não foi possível obter informações a respeito da quantidade desses instrumentos.

É importante observar que, na Etapa 6, através dos resultados das análises de estabilidade, pode-se identificar os pontos mais importantes a serem instrumentados. Porém, análises mais específicas podem ser necessárias para a definição completa do sistema de instrumentação. Por isso, houve a complementação das análises como explicado no item seguinte.

TABELA 42 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 6

6. INSTRUMENTAÇÃO									
Qual a quantidade dos instrumentos abaixo que estão presentes na barragem?									
Inclinômetro		Piezômetro	57	Medidor de vazão		Células de carga		Marcos superficiais	
Prumo invertido		Células de poropressão		Placas de recalque		Sismógrafo	1	Acelerógrafo	
Medidor de junta		Deformímetro		Tensômetro		Termômetro		Outros	
O sistema de instrumentação existente na barragem é suficiente?				O sistema de instrumentação existente na barragem é:					
Sim		Não		Manual		Semi automatizado		Automatizado	

Fonte: elaborado pela autora.

4.1.4 Outras análises

Além das análises de estabilidade, também foram executadas análises de sensibilidade (resultado dos métodos de confiabilidade estrutural), análise sob a influência da eficiência dos drenos e análise de tensão e deformação da barragem.

4.1.4.1 Sensibilidade

O objetivo da análise de sensibilidade é determinar o nível de influência que cada variável de entrada tem sobre o modelo. Desta forma, procedeu-se a análise de sensibilidade para a seção transversal P11, representativamente. A Figura 36 representa o resultado encontrado para a análise referida.

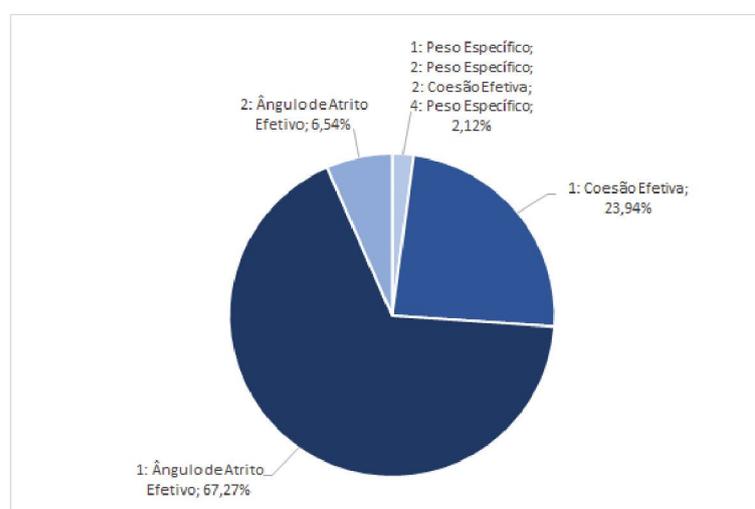


FIGURA 36 – Resultado da análise de sensibilidade. Fonte: elaborado pela autora.

Pode-se observar que a variável Ângulo de Atrito Efetivo do material 1 é a que mais tem influência no resultado final do FS. Com esta informação, o engenheiro

responsável pode tomar decisões caso a barragem não tivesse bons resultados de estabilidade. Ele, neste caso, poderia escolher um material com um ângulo de atrito maior ou modificar o material disponível a fim de proporcionar esta melhoria.

Essa análise crítica se torna um ponto importante nos projetos de barragens ou, até mesmo, nas manutenções e reparos, pois pequenas intervenções no local e/ou no material mais influente causa grandes impactos na estabilidade da estrutura. Isto pode evidenciar soluções técnicas mais econômicas para os problemas de instabilidade de barragens.

4.1.4.2 Eficiência dos drenos

A eficiência dos drenos é questionável, principalmente devido à colmatagem progressiva que acontece ao longo do tempo. Portanto se faz necessário a avaliação da segurança da barragem caso a colmatagem torne os drenos ineficientes.

Como o principal fator a interferir na Superfície Crítica de Ruptura e no valor do Fator de Segurança é o caminho de percolação da água, as Figuras 37 a 39 apresentam a carga de água estabelecida por consequência da colmatagem do filtro e do dreno para as seções transversais P5, P11 e P14.

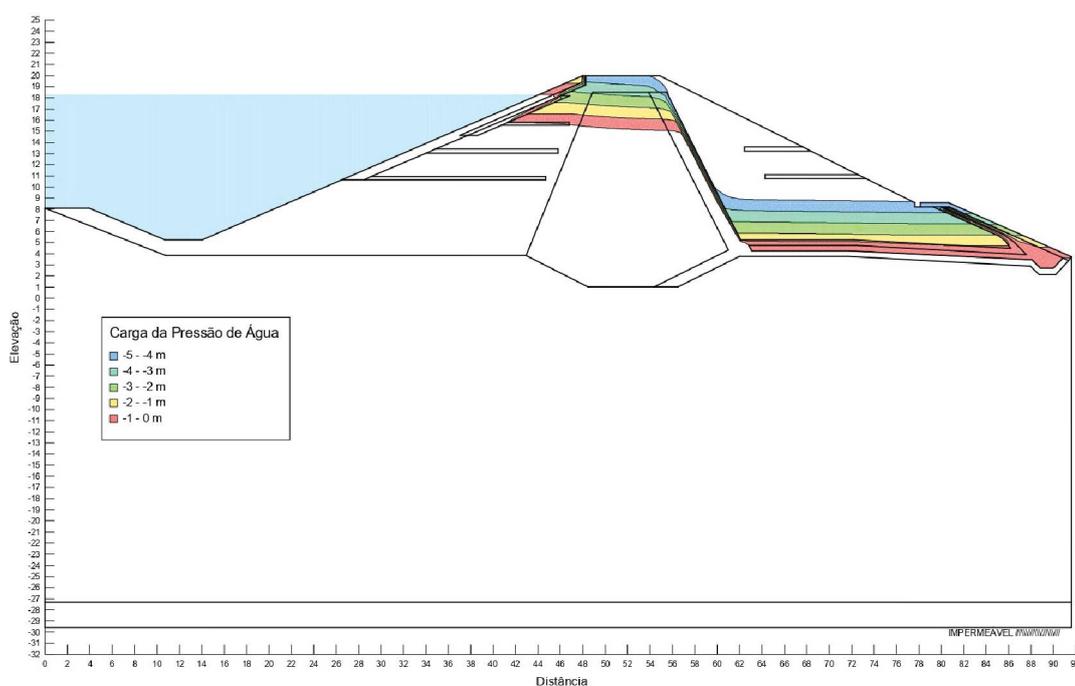


FIGURA 37 – Percolação da água, na seção transversal P5, na ineficiência dos drenos. Fonte: elaborado pela autora.

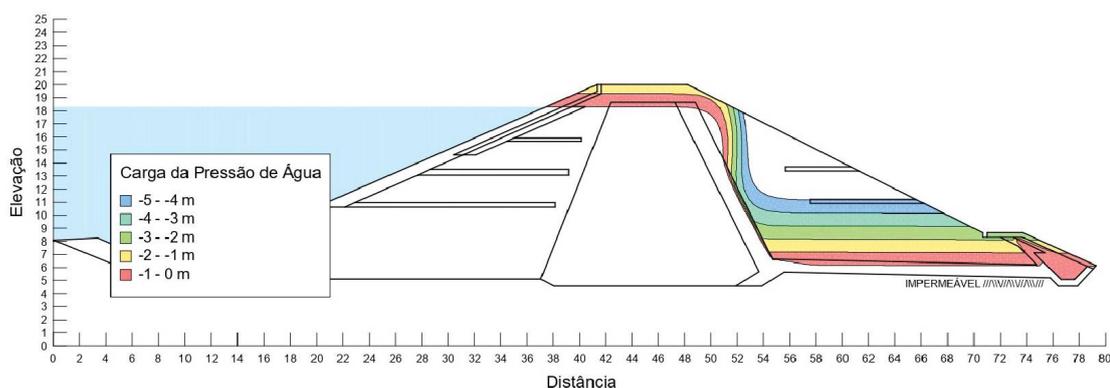


FIGURA 38 – Percolação da água, na seção transversal P11, na ineficiência dos drenos. Fonte: elaborado pela autora.

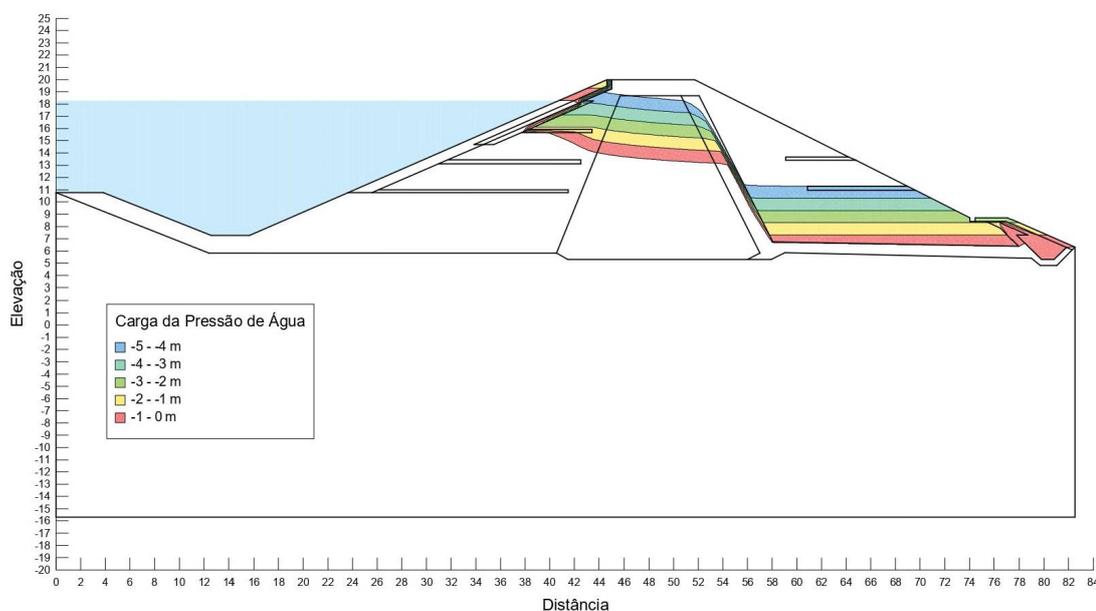


FIGURA 39 – Percolação da água, na seção transversal P14, na ineficiência dos drenos. Fonte: elaborado pela autora.

No caso da seção P11 (Figura 38) há a possibilidade de surgência de água no talude de jusante. Este resultado indica que esta é uma região a ser monitorada continuamente a fim de diagnosticar a condição de eficiência dos drenos. Além disso, uma instrumentação específica deve ser inserida no decorrer dos drenos para monitorar este nível de colmatção e determinar o momento mais propício para manutenções dos mesmos.

4.1.5 Análise Holística

Com base em todas as análises realizadas, através das seções transversais principais, torna-se importante a análise holística do empreendimento. Por isso a Tabela

43 foi preenchida.

TABELA 43 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 7

7. ESTRUTURAS AUXILIARES											
Quais estruturas auxiliares estão presentes na barragem?											
Vertedor		Casa de força		Tomada d'água	X	Descarregador de fundo	X	Túnel de desvio		Comporta(s)	X
As estruturas auxiliares podem comprometer a estabilidade e/ou segurança da barragem?											
Sim	Não			Se não, nova modelagem computacional deve ser realizada.							

Fonte: elaborado pela autora.

No caso da barragem do Iraí, as estruturas auxiliares não têm influência significativa sobre a estrutura da barragem. Então, não se fez necessária uma análise tridimensional da barragem.

4.1.6 Documentação

As etapas finais da metodologia proposta, aplicadas na barragem do Iraí, se referem a um questionamento sobre a existência de documentos importantes. Para isso, as Tabelas 44, 45 e 46 foram preenchidas com base nas informações repassadas pela SANEPAR.

TABELA 44 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 8

8. SEGURANÇA DE BARRAGENS	
O empreendedor da barragem possui os relatórios e documentos a seguir?	
Relatórios de inspeções periódicas	X
Análise de riscos	X
Plano de Segurança de Barragem (PSB)	X
Plano de Ação em Emergências (PAE)	X
Outros	

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 45 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 9

9. OPERAÇÃO	
O empreendedor da barragem possui uma rotina de operações que contemple as seguintes ações?	
Identificação manifestações patológicas	X
Planejamento de manutenções	X
Leitura periódica da instrumentação	X
Análise periódica do comportamento da barragem	X
Outros	

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 46 – Aplicação da metodologia proposta na barragem do Iraí - Etapa 10

10. DESCARACTERIZAÇÃO	
O empreendedor da barragem possui um planejamento de descaracterização da barragem que contenha as seguintes informações?	
Plano de Gestão Ambiental	X
Limite de aceitabilidade de riscos	X
Plano de monitoramento perpétuo	
Definição de vida útil do empreendimento	X
Outros	

Fonte: elaborado pela autora.

Uma vez que a barragem do Iraí se encontra em completude de informações no SNISB, todos os documentos exigidos pela PNSB estão desenvolvidos. A presença do Manual de Operação e Manutenção preenche os requisitos estabelecidos pela Etapa 9 da metodologia. E a conscientização sobre a necessidade de monitoramento contínuo e intervenção de manutenção quando as análises indicarem e, inclusive, uma possível descaracterização da barragem é evidente no corpo técnico da SANEPAR, que atua com responsabilidade na segurança de suas barragens.

4.2 BARRAGEM DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO

4.2.1 Levantamento de dados

As Etapas 1 a 4 da metodologia proposta correspondem ao levantamento de informações sobre a barragem. Através dos trabalhos de Levis (2006), Andriolo, Mussi e Oliveira (1998), COPEL (2021) e Krüger (2008), pode-se preencher as Tabelas 47 a 50.

TABELA 47 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 1

1. IDENTIFICAÇÃO					
do Empreendedor			do Fiscalizador		
COPEL			ANEEL		
Dados Básicos:		Qual é o tipo de barragem?		Qual é o tipo de Fundação?	
Altura:	73 m	X	Concreto		Solo mole
Volume de reservação:	109,9 hm³		Aterro		Solo firme
Uso(s):	Geração de energia elétrica		Rejeito	X	Rocha sã
Idade:	24 anos		Mista		Rocha fraturada
Houve alguma manutenção estrutural de grande porte?	Não		Outro	Sim	Há tratamento nas fundações?

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 48 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 2

2. BANCO DE DADOS					
Assinale os documentos que estão disponíveis:					
X	Pré-projeto	X	Projeto básico	X	Projeto executivo
	Diário de obra	X	As built	X	Relatório(s) de manutenções
Volume de informações é suficiente?					
Sim			Não		
seguir para a próxima etapa			coletar mais informações		

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 49 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 3

3. MATERIAIS									
Quais os parâmetros, dos materiais presentes na barragem, que têm suas definições completas?									
Solo(s)		Concreto(s)		Aterro(s)		Rocha(s)		Outro(s)	
Peso específico:	X	Peso específico:	X	Peso específico:		Peso específico:	X	Peso específico:	
Coesão:	X	Coesão:	X	Coesão:		Coesão:	X	Coesão:	
Ângulo de atrito:	X	Coef. de atrito:	X	Ângulo de atrito:		Coef. de atrito:	X	Ângulo de atrito:	
Coef. de permeabilidade:	X	Coef. de permeabilidade:	X	Coef. de permeabilidade:		Coef. de permeabilidade:	X	Coef. de permeabilidade:	

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 50 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 4

4. CARREGAMENTOS									
Os casos de carregamentos abaixo têm suas definições completas?									
Construção		1º enchimento		Rebaixamento Rápido		Sismos			
						Aceleração vertical:		Aceleração horizontal:	
Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Percolação permanente								Efeito cascata	
N.A. mínimo:		N.A. normal:		N.A. máximo::		N.A. maximorum:			
Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não

Fonte: elaborado pela autora.

A partir das informações levantadas, as análises de estabilidade puderam ser realizadas.

4.2.2 Análises determinísticas

Com base nas condições de carregamento adotadas serão expostas a verificação da estabilidade ao deslizamento, a flutuação e ao tombamento, no contato da barragem com a fundação.

Na Figura 40 é apresentado o perfil básico da seção estudada, a qual pode-se observar as dimensões geométricas, e o ponto A na base na fundação que serviu como referência para cálculos dos momentos necessários para verificação da estabilidade proposta. É importante ressaltar que para efeito de cálculos foi considerada a largura da seção unitária.

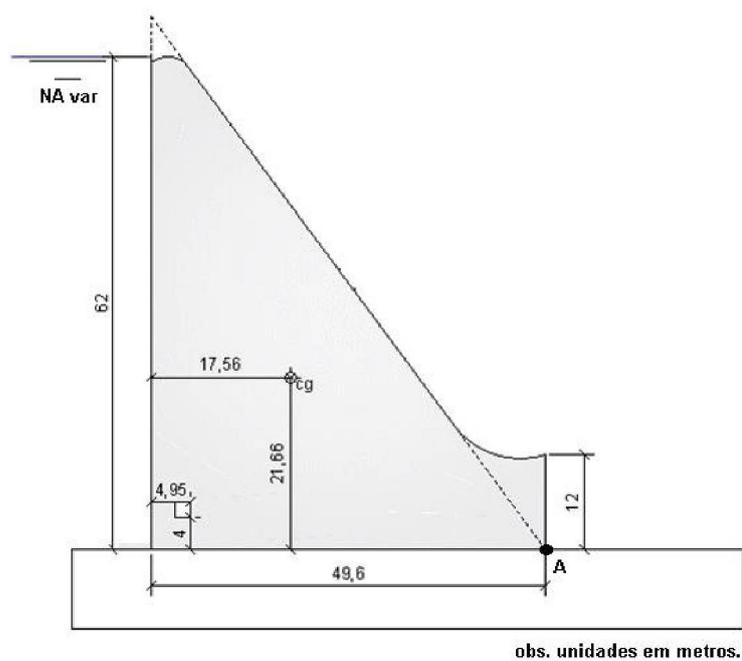


FIGURA 40 – Perfil básico considerado para a análise de estabilidade

Foram realizados os cálculos das ações e dos momentos com relação ao ponto A e, com base em cada condição de carregamento proposta, obteve-se os valores resumidos na Tabela 51 a seguir.

TABELA 51 – Resumo das ações consideradas para a análise de estabilidade

Condição		CCN	CCE-1	CCE-2	CCE-3	CCE-4
N.A.		Máximo normal	Máximo normal	Máximo normal	Mínimo normal	Máximo maximorum
Peso próprio	Força (kN)	42.463	42.463	42.463	42.463	42.463
	M_A (kN.m)	1.364.785	1.364.785	1.364.785	1.364.785	1.364.785
Empuxo jusante	Força (kN)	5	5	5	5	5
	M_A (kN.m)	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
Empuxo montante	Força (kN)	19.220	19.220	19.220	15.680	22.196
	M_A (kN.m)	371.597	371.597	397.213	292.693	551.485
Assoreamento montante	Força (kN)	51,25	51,25	51,25	41,81	59,50
	M_A (kN.m)	99,09	99,09	105,92	78,05	132,48
Subpressão	Tipo	com drenos operantes	com drenos inoperantes	com drenos operantes	com drenos operantes	com drenos operantes
	Força (kN)	7.214	15.624	7.365	6.698	7.903
	M_A (kN.m)	248.311	512.533	256.041	233.006	274.536

Fonte: Ramos (2021)

Com os resultados das ações atuantes e dos momentos, a verificação da estabilidade global da barragem estudada é apresentada em relação às três condições propostas na metodologia, sendo a flutuação, ao tombamento e ao deslizamento. Na Tabela 52, é apresentado os fatores de segurança calculados para cada caso de carregamento.

TABELA 52 – Verificação da estabilidade através de análise determinística

Condição	CCN	CCE-1	CCE-2	CCE-3	CCE-4
FSF	5,89	2,72	5,77	6,34	5,38
FST	2,20	1,54	2,09	2,60	1,66
FSD	1,47	1,18	1,46	1,82	1,25

Fonte: Ramos (2021)

É possível constatar, em comparação com a Tabela 5, que os valores obtidos atestam a verificação de estabilidade da barragem a partir das condições analisadas estatisticamente com os parâmetros adotados, fornecendo valores acima dos estabelecidos pela ELETROBRAS (2003).

A influência da subpressão na determinação do FSF, considerando ou não a funcionalidade de drenos operantes fica evidenciada na condição CCE-1. Na condição

CCN foram considerados os drenos operantes, enquanto que na CCE-1 os efeitos de drenos na determinação da subpressão foram desprezados. Em ambos os casos foi adotado o nível de água normal. E constatou-se que o FSF sofreu um aumento significativo quando utilizados os drenos operantes na seção da barragem, evidenciando a importância de manter a sua funcionalidade para a redução da subpressão, oferecendo um fator de segurança maior à estrutura.

Porém, ao completar a Tabela 53 correspondente a Etapa 5 da metodologia proposta, pode-se perceber que o volume de informações a respeito dos parâmetros dos materiais propicia uma análise probabilística.

TABELA 53 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 5

5. ESTABILIDADE									
Há informações suficientes para analisar a condição de estabilidade da barragem?									
Deslizamento		Tombamento		Capacidade de suporte das fundações		Tensões internas		Filtros e Drenos	
Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Qual a natureza da análise de estabilidade, com base nos dados disponíveis, possível de ser realizada?									
Determinística			Probabilística (mínimo de 3 informações para cada parâmetro envolvido na análise)			X			

Fonte: elaborado pela autora.

4.2.3 Análises probabilísticas

Para esta seção serão apresentados os resultados das simulações de Monte Carlo, apontando a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade para cada caso analisado.

Primeiramente, um teste de convergência foi aplicado ao modelo computacional desenvolvido em planilha eletrônica. Que apontou resultados satisfatórios a partir do ponto de 7.000 simulações. O teste de convergência considerou, como critério de parada, a amplitude menor que 5%, como apresentado na Figura 41.

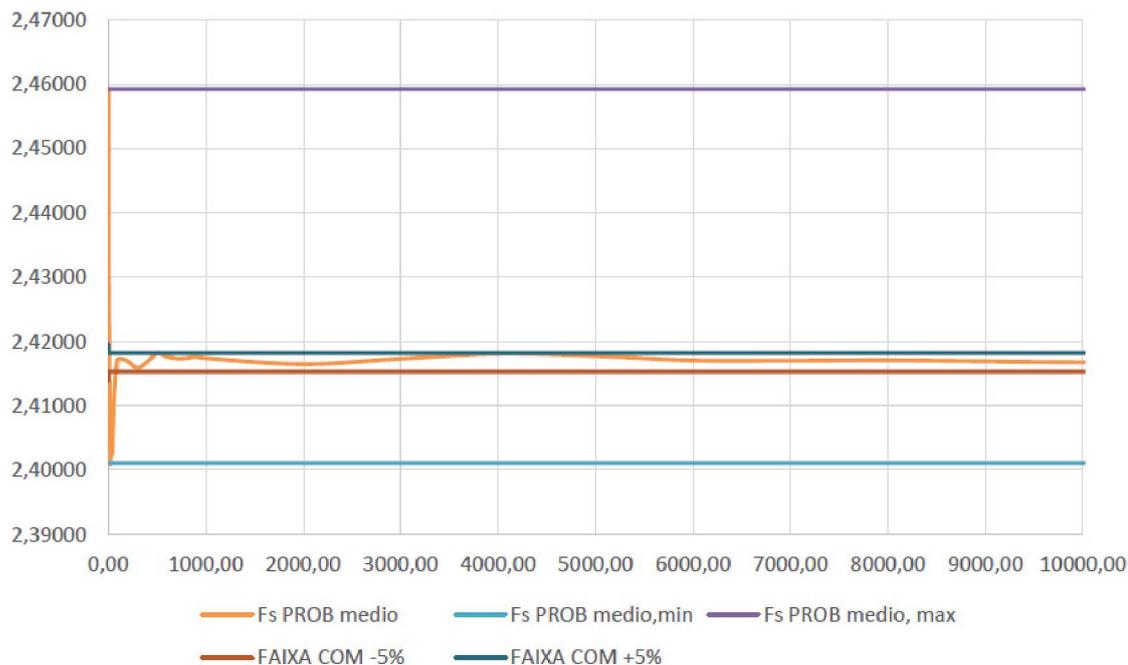


FIGURA 41 – Teste de convergência para o modelo de cálculo de estabilidade de uma barragem de concreto

Então, a partir das definições das variáveis aleatórias mostradas no capítulo Materiais e Méodos, as mesmas foram substituídas nas equações determinísticas, gerando uma amostra satisfatória para cada verificação de estabilidade analisada e será apresentada na Tabela 54.

TABELA 54 – Resultados da análise de estabilidade probabilística

	Condição	CCN	CCE-1	CCE-2	CCE-3	CCE-4
FSF	Média	5,89	2,72	5,77	6,34	5,38
	Desvio padrão	0,14	0,07	0,13	0,14	0,12
	Índ. de conf.	36,65	27,93	36,31	36,97	35,77
	Prob. de ruptura	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$
FST	Média	2,20	1,54	2,09	2,60	1,66
	Desvio padrão	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04
	Índ. de conf.	25,65	17,11	22,99	27,09	17,42
	Prob. de ruptura	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$
FSD	Média	1,47	1,18	1,46	1,82	1,25
	Desvio padrão	0,13	0,11	0,11	0,14	0,10
	Índ. de conf.	5,46	3,39	4,27	6,06	2,74
	Prob. de ruptura	$<10^{-6}$	0,01194	0,00040	$<10^{-6}$	0,09911

Para determinação do fator de segurança a flutuação (FSF) probabilístico, foi considerado como variável aleatória apenas o peso específico do concreto. Os índices de confiabilidades calculados, neste caso, foram altos, o que implica uma probabilidade à ruptura menos que 10^{-6} .

No cálculo do fator de segurança ao tombamento (FST) probabilístico, as variáveis aleatórias consideradas foram o peso específico do concreto e peso específico do sedimento.

Já no caso do fator de segurança ao deslizamento (FSD) probabilístico, as variáveis aleatórias consideradas foram o peso específico do concreto, o peso específico do sedimento, o ângulo de atrito interno do sedimento e o ângulo de atrito no contato concreto/rocha.

Ao determinar a estabilidade e segurança da barragem da derivação do rio Jordão, pode-se partir para a Etapa 6 da metodologia proposta.

As Tabelas 55 e 56, referente às Etapas 6 e 7, não puderam ser completamente preenchidas pois a autora não obteve acesso às informações requeridas. Porém, há conhecimento da responsabilidade e capacidade técnica do empreendedor (COPEL) que tem por tradição a boa instrumentação e monitoramento contínuo de suas estruturas.

TABELA 55 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 6

6. INSTRUMENTAÇÃO											
Qual a quantidade dos instrumentos abaixo que estão presentes na barragem?											
Inclinômetro		Piezômetro		Medidor de vazão		Células de carga		Marcos superficiais			
Prumo invertido		Células de poropressão		Placas de recalque		Sismógrafo		Acelerógrafo			
Medidor de junta		Deformímetro		Tensômetro		Termômetro		Outros			
O sistema de instrumentação existente na barragem é suficiente?				O sistema de instrumentação existente na barragem é:							
Sim		Não		Manual		Sem automatizado		Automatizado			

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 56 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 7

7. ESTRUTURAS AUXILIARES											
Quais estruturas auxiliares estão presentes na barragem?											
Vertedor	X	Casa de força	X	Tomada d'água	X	Descarregador de fundo	X	Túnel de desvio	X	Comporta(s)	X
As estruturas auxiliares podem comprometer a estabilidade e/ou segurança da barragem?											
Sim		Não		Se não, nova modelagem computacional deve ser realizada.							

Fonte: elaborado pela autora.

4.2.4 Documentação

As etapas finais da metodologia proposta, aplicadas na barragem da derivação do rio Jordão, se referem a um questionamento sobre a existência de documentos importantes. Para isso, as Tabelas 44, 45 e 46 foram preenchidas com base nas informações encontradas nos trabalhos de Levis (2006), Andriolo, Mussi e Oliveira (1998), COPEL (2021) e Krüger (2008).

TABELA 57 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 8

8. SEGURANÇA DE BARRAGENS	
O empreendedor da barragem possui os relatórios e documentos a seguir?	
Relatórios de inspeções periódicas	X
Análise de riscos	X
Plano de Segurança de Barragem (PSB)	X
Plano de Ação em Emergências (PAE)	X
Outros	

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 58 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão - Etapa 9

9. OPERAÇÃO	
O empreendedor da barragem possui uma rotina de operações que contemple as seguintes ações?	
Identificação manifestações patológicas	X
Planejamento de manutenções	X
Leitura periódica da instrumentação	X
Análise periódica do comportamento da barragem	X
Outros	

Fonte: elaborado pela autora.

TABELA 59 – Aplicação da metodologia proposta na barragem da derivação do rio Jordão -
Etapa 10

10. DESCARACTERIZAÇÃO	
O empreendedor da barragem possui um planejamento de descaracterização da barragem que contenha as seguintes informações?	
Plano de Gestão Ambiental	X
Limite de aceitabilidade de riscos	X
Plano de monitoramento perpétuo	
Definição de vida útil do empreendimento	X
Outros	

Fonte: elaborado pela autora.

Uma vez que a barragem da derivação do rio Jordão se encontra em completude de informações no SNISB, todos os documentos exigidos pela PNSB estão desenvolvidos. A presença do Manual de Operação e Manutenção preenche os requisitos estabelecidos pela Etapa 9 da metodologia. E a conscientização sobre uma possível descaracterização da barragem é evidente no corpo técnico da COPEL, que atua com muita responsabilidade na segurança de suas barragens.

5 CONCLUSÕES

Segurança de barragens é um tema muito discutido e estudado nos últimos anos e a quantidade de trabalhos científicos na área é uma clara demonstração da grande preocupação com a desatualização técnica por parte dos projetistas e empreendedores. Mas a discussão ainda precisa ser ampliada, ficando evidente nos números mostrados pelo mais recente Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2021b). A quantidade de incidentes e acidentes que ocorrem no país é expressiva, mas não é novidade, pois a subnotificação dos casos era prática comum antes da implementação da PNSB. O empreendedor precisa entender que a não comunicação dos acidentes e incidentes impede que outros erros sejam evitados, sejam eles de qualquer natureza.

Para suscitar esta discussão, este trabalho propôs uma metodologia para avaliação do nível de segurança das barragens, a qual é integrada por 10 etapas de verificação e 3 níveis de detalhamento que indicam o volume de informações técnicas relevantes disponíveis para a averiguação da segurança de uma barragem.

As barragens do Iraí e da Derivação do rio Jordão foram utilizadas como exemplos e se mostraram notórias no que diz respeito a responsabilidade técnica, social e ambiental dos empreendedores (SANEPAR e COPEL), apresentando Nível 3 de segurança através da aplicação da metodologia proposta por este trabalho.

A aplicação da metodologia proposta teve êxito mesmo quando não há total acesso às informações requeridas, como no caso da Barragem da Derivação do Rio Jordão. Portanto, pode se tornar uma ferramenta útil, especialmente aos fiscalizadores, visando um processo de cadastramento mais eficaz, acelerando o preenchimento do SNISB.

Como toda a análise científica, sua precisão é influenciada pela confiança dos dados de entrada do problema. Desta maneira, se torna imprescindível que a variabilidade dos parâmetros de entrada seja assegurada através de investigações extensivas e responsáveis. E, por isso, a análise crítica de uma equipe de engenheiros de segurança de barragens é necessária para cada empreendimento, independente de seu tamanho.

Através das análises de estabilidade da Barragem da Derivação do Rio Jordão, comprovou-se possível a utilização da abordagem probabilística mesmo com acesso limitado à informações sobre as campanhas de investigação ou controle da execução de uma barragem. Então, para que a variabilidade dos materiais seja incorporada nos projetos e análises, é necessário que a utilização de métodos probabilísticos através

de análises de confiabilidade seja incentivada pelos órgãos especializados.

A análise probabilística indica as fragilidades de cada parâmetro, além de possibilitar a realização de uma análise de sensibilidade que, por sua vez, indica o parâmetro que mais tem influência sobre a segurança da barragem. A análise probabilística também pode orientar inspeções, instalação de novos instrumentos ou, ainda, ações de manutenção. Além disso, a análise probabilística também permite verificar a eficácia de intervenções já realizadas, auxiliando na ratificação dos valores investidos nas ações de manutenção.

A utilização do método de Monte Carlo se mostrou uma alternativa interessante, visto que possui uma facilidade de aplicação em comparação a outros métodos probabilísticos. Além disso, com o avanço tecnológico computacional, seu tempo de resposta pôde ser diminuído significativamente nos últimos anos. Todas as análises deste trabalho exigiram um esforço computacional compatível com os providos pelos escritórios de engenharia do país.

Para as barragens de terra, como a Barrage do Iraí, foram notadas diferenças geométricas expressivas nas SPRs dos métodos de análise de estabilidade determinístico e probabilístico. Este tipo de informação pode ser útil no planejamento de instrumentação na fase de projeto ou de instrumentação auxiliar no caso de barragens em operação. Considerando que o mapeamento correto e exato das fragilidades de uma barragem se caracteriza uma tarefa essencial para a sua segurança, poder identificar mais zonas potenciais de falha auxilia o empreendedor nas intervenções a favor da segurança da barragem.

Depois de todas as análises realizadas neste trabalho pôde-se refletir sobre o conceito de perpetuidade das obras de represamento. O conjunto de fatores que se alteram com o passar do tempo, através da ocorrência de intempéries, deve ser levado em conta em cada etapa do projeto bem como na operação de barragens. Ao invés de considerar aspectos estáticos, deve-se considerar o dinamismo em fatores como a alteração de parâmetros de projeto, como o ângulo de atrito e a coesão de solos. Estes podem sofrer alteração devido ao rearranjo das partículas de solo que ocorre com o fluxo de água nos vazios ou, também, em função da variação do grau de saturação do maciço de solo. Outro exemplo desses fatores é o carreamento de materiais finos através do fluxo da água que pode ocasionar a ineficiência ou entupimento dos drenos. O deslocamento dos materiais compactados devido ao carregamento imposto pode resultar em trincas e rachaduras nos taludes de montante e jusante. As intempéries, já mencionadas, podem desencadear processos erosivos. E, ainda, a intervenção humana pode ser considerada, uma vez que o empreendedor pode entender que alterações de layout de obras auxiliares sejam necessárias durante a vida útil das barragens.

Como foi mencionado, os relatórios da ANA mostram que há uma lacuna de

dados em várias obras no Brasil, inclusive barragens sem responsável claramente definido, o que dificulta análises e estudos de segurança. Imagina-se que levantamentos complementares devem ser efetuados, de modo a permitir estudos confiáveis. Obviamente podem ser feitas priorizações baseadas nos critérios de classificação preconizados na PNSB. A autora indica que a metodologia proposta deve ser agregada aos Planos de Segurança de Barragens colaborando para a formação de processos formais, íntegros e realizados por profissionais adequadamente qualificados.

Ademais, como citado por este trabalho em vários tópicos, é importante que a figura de um engenheiro com formação e experiência específica em segurança de barragens esteja a frente nas tomadas de decisões. Esta análise crítica, necessária para o planejamento e execução de intervenções em barragens, pode ser exercida por um profissional capacitado ou por um grupo de profissionais de se somam em seus conhecimentos. Mas o que deve-se ressaltar é que esse(s) profissional(is) devem ter sua capacitação assegurada por órgãos governamentais como a ANA, por exemplo, que têm uma gama de cursos que tem sido ofertados frequentemente, evidenciando o desenvolvimento da PNSB no país.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando que, em países em desenvolvimento como o Brasil, a maior parte das barragens são pequenas e destinadas à irrigação, com alto potencial lesivo às comunidades adjacentes e ao meio ambiente, a lei vigente deixa uma lacuna no que diz respeito à proteção efetiva dessas populações e biomas. Portanto, no que tange à pequenas barragens, sugere-se que:

- o estudo sobre a aplicabilidade da metodologia em pequenas barragens;
- o mapeamento geográfico das barragens existentes ainda não cadastradas através de um levantamento minucioso utilizando ferramentas tecnológicas como drones;
- o estabelecimento de um tamanho mínimo de banco de dados em função do tamanho das barragens.

Além disso, no que diz respeito à metodologia proposta, se faz necessária a validação da mesma através de sua aplicação massiva nos mais diversos tipos e tamanhos de barragem e, para isto, pode-se utilizar os dados disponíveis no SNISB. Em específico, para as barragens estudadas neste trabalho, a análise probabilística pode ser feita nas demais seções transversais a fim de localizar mais zonas de fragilidade.

Outra lacuna do conhecimento é a respeito da tratativa quando da falta de informação dos parâmetros relevantes ao problema de estabilidade. Uma investigação a

respeito do impacto da utilização de menor número de parâmetros probabilísticos pode evidenciar novos caminhos para incentivo na utilização da abordagem probabilística.

Além das citadas, outra sugestão de trabalho futuro é a disseminação da cultura do engenheiro de segurança de barragens, afim de que este conceito alcance a legislação. A obrigatoriedade de um engenheiro de segurança de barragens seria um indicativo de aumento gradativo da segurança, especialmente nos casos das barragens com CRI alto.

Uma discussão mais detalhada sobre a diferença entre as SPRs determinísticas e probabilísticas representaria um ganho de conhecimento considerável, uma vez que agregaria em argumentos a favor da normalização das análises probabilísticas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 2 vez na página 54.
- ADAMO, Nasrat et al. Dam Safety and Dams Hazards. **Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, Scientific Press International Limited, v. 10, n. 6, 2020. Citado 15 vezes nas páginas 23, 27, 35, 37, 52, 63, 64, 74, 76, 78, 79, 88, 89.
- _____. Dams Safety: Inspections, Safety Reviews, and Legislations. **Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, Scientific Press International Limited, v. 11, n. 1, p. 109–143, 2021. Citado 39 vezes nas páginas 22, 28, 38–40, 47, 48, 63, 66–74, 112.
- AGENCY, Federal Emergency Management. Dam Safety in the United States. A Progress Report on the National Dam Safety Program Fiscal Years 2012 and 2013., 2014. Citado 1 vez na página 47.
- AL ASSAL, Nelson. Palestra da Associação Brasileira de Normas Técnicas. In: I SPD - Simpósio de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Tecnológica na Área de Barragens. [S.l.: s.n.], 2021. Citado 3 vez na página 109.
- ALMEIDA, A B. Emergência e gestão do risco. In: CURSO de Exploração e Segurança de Barragens, Instituto Nacional da Água (INAG). [S.l.: s.n.], 2001. Citado 1 vez na página 88.
- ALONSO, Eduardo E. Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays. **Geotechnique**, Thomas Telford Ltd, v. 26, n. 3, p. 453–472, 1976. Citado 1 vez na página 61.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Cadastro de Barragens da Agência Nacional das Águas**. Jun. 2021. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cadastros/cnbarragens-outorgadas.aspx>>. Citado 1 vez na página 22.
- _____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2018. P. 432. Citado 1 vez na página 22.
- _____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens - 2017**. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 1 vez na página 22.
- _____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens - 2020**. [S.l.: s.n.], 2021. Citado 16 vezes nas páginas 22, 30–35, 73, 110, 112, 115, 164.
- ANCOLD. Environmental Impact Statement, 2003. Citado 1 vezes nas páginas 48, 49.

ANCOLD. Guidelines on Dam Safety Management, 2003. Citado 1 vez nas páginas 48, 49.

ANCOLD, Comitê Australiano de Grandes Barragens. **Guidelines on risk assessment**. [S.l.], 2003. Citado 0 vez na página 84.

ANDRIOLO, F R; MUSSI, J M P; OLIVEIRA, L F P. Controle da Compactação Durante a Construção das Barragens de CCR de Jordão e Salto Caxias. In: III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo. [S.l.: s.n.], 1998. Citado 4 vezes nas páginas 127, 128, 138, 154, 162.

ANG, Alfredo H-S; TANG, Wilson H. Decision, Risk and Reliability. In: PROBABILITY Concepts in Engineering Planning and Design. [S.l.]: John Wiley Sons, 1984. v. II. Citado 2 vezes nas páginas 61, 98.

BALBI, D A F; BARBOSA, L R A; SILVA, E Do S. Plano de ações emergenciais para barragens das PCH da CEMIG GT. In: VIII Simpósio sobre Pequenas e Medias Centrais Hidrelétricas. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 1 vez na página 95.

BALBI, Diego Antonio Fonseca. Módulo 3, Unidade 2: plano de ações emergenciais. In: CURSO Segurança de Barragens - ANA. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 4 vezes nas páginas 87, 88, 96.

BECK, André T. **Confiabilidade e segurança das estruturas**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2019. Citado 6 vezes nas páginas 83, 85, 93, 94, 98, 100, 102, 104, 125, 146.

BHATTACHARYA, G et al. Direct search for minimum reliability index of earth slopes. **Computers and geotechnics**, Elsevier, v. 30, n. 6, p. 455–462, 2003. Citado 1 vez na página 61.

BIEDERMANN, Robert. Safety concept for dams: development of the Swiss concept since 1980. **Wasser, Energie, Luft**, v. 89, n. 3/4, p. 54–72, 1997. Citado 1 vez na página 27.

BRAJA, MD. Fundamentos de engenharia geotécnica. **Cengage Learning**, v. 8, 2011. Citado 1 vez na página 60.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20 set. 2010. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 14 jul. 2021. Citado 1 vez na página 27.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de Setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 30 set. 2020. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm>.

Acesso em: 14 jul. 2021. Citado 1 vez na página 31.

_____. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 2020. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 8 jan. 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm>. Acesso em: 14 jul. 2021. Citado 1 vez na página 30.

BRASIL, Ministério de Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. [S.l.: s.n.], 2002. Citado 2 vezes nas páginas 74, 75.

CARDIA, R J e R; ANDERÁOS, A. Algumas considerações sobre a importância do plano de ação emergencial - PAE. In: VIII Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 1 vez na página 95.

CARDOSO, J M B B et al. Fiabilidade de Estruturas com Comportamento Não-Linear Utilizando Redes Neurais e o Método de Monte Carlo. **VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional, Portugal**, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 103, 104.

CARVALHO, N O et al. Guia De Avaliação De Assoreamento De Reservatórios. ANEEL, 2000. Citado 1 vez na página 138.

CASTILLO-RODRIGUEZ, Jesica T; MORALES-TORRES, Adrián; ESCUDER-BUENO, Ignacio. A risk-informed journey towards improved dam safety governance in Spain. In: SECOND International Dam World Conference, Lisbon. De Andrés Rodriguez-Trelles, M., Mazaira, JP. [S.l.: s.n.], 2013. P. 22–27. Citado 9 vezes nas páginas 44–46, 80, 81.

CBDB. Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil. **II Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens. Belo Horizonte, MG.**, v. I, 1996. Citado 1 vez na página 65.

_____. Guia básico de segurança de barragens. **Núcleo Regional de São Paulo - Comissão Regional de Segurança de Barragens**, p. 77, 1999. Citado 1 vez na página 88.

- CBDB. **Site do Comitê Brasileiro de Barragens**. Dez. 2021. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 22, 23.
- CHENG, Yung Ming. Location of critical failure surface and some further studies on slope stability analysis. **Computers and geotechnics**, Elsevier, v. 30, n. 3, p. 255–267, 2003. Citado 1 vez na página 58.
- CHO, S E. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. **Engineering Geology**, v. 92, p. 97–109, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 61, 103.
- _____. Probabilistic Assessment of Slope Stability That Considers the Spatial Variability of Soil Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 7, p. 975–984, 2010. Citado 1 vez na página 103.
- CHOWDHURY R N; XU, D W. Rational polynomial technique in slope stability analysis. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, ASCE, v. 119, n. 12, p. 1910–1928, 1993. Citado 1 vez na página 103.
- CHOWDHURY, RN; TANG, WH. Comparison of risk models for slopes. In: UNIV. OF BRITISH COLUMBIA VANCOUVER, BC, CANADA. PROC., 5th Int. Conf. on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering. [S.l.: s.n.], 1987. v. 2, p. 863–869. Citado 1 vez na página 61.
- CHOWDHURY, RN; XU, DW. Geotechnical system reliability of slopes. **Reliability Engineering & System Safety**, Elsevier, v. 47, n. 3, p. 141–151, 1995. Citado 1 vez na página 61.
- CHRISTIAN, John T. Reliability methods for stability of existing slopes. In: ASCE. UNCERTAINTY in the geologic environment: From theory to practice. [S.l.: s.n.], 1996. P. 409–418. Citado 1 vez na página 61.
- CHRISTIAN, John T; LADD, Charles C; BAECHER, Gregory B. Reliability applied to slope stability analysis. **Journal of Geotechnical Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 120, n. 12, p. 2180–2207, 1994. Citado 1 vez na página 61.
- CNRH, Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Classificação de Barragens por Categoria de Risco, Dano Potencial Associado e Pelo Volume do Reservatório**. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 94, 95.
- COBA. Estudos e Projectos Relativos a Construção da Barragem de Iraí. [S.l.], 1996. Citado 11 vezes nas páginas 128, 130–136, 140, 141.
- COPEL. Usina Derivação do Rio Jordão, 2021. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcweb/copel-geracao/usina-derivacao-do-rio-jordao/>>. Citado 4 vezes nas páginas 137, 154, 162.
- CORNELL, C A. Bayesian Statistical Decision Theory and Reliability-Based Design. **Proceedings of the Int. Conference on Structural Safety and Reliability, Washington DC**, p. 47–66, 1969. Citado 2 vezes nas páginas 61, 100.

COSTA E SILVA, Daniela Carolina da et al. Segurança de pequenas barragens: estudo comparativo com as principais políticas internacionais para aprimoramento da aplicação da política nacional de segurança de barragens. [sn], 2021. Citado 2 vezes nas páginas 51, 108.

COSTA, Eli Antônio da. Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 103, 108.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 52, 53.

CRSB. Guia básico de segurança de barragens. Comissão Regional de Segurança de Barragens, Núcleo Regional de São Paulo, 1999. Citado 1 vez na página 58.

CRUZ, Paulo Teixeira; MATERÓN, Bayardo; FREITAS, Manoel. Barragens de enrocamento com face de concreto. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2009. Citado 1 vez na página 53.

CUIYUN, Cheng et al. Analysis of dam safety management system in China. In: IEEE. 2010 IEEE International Conference on Emergency Management and Management Sciences. [S.l.: s.n.], 2010. P. 110–113. Citado 3 vezes nas páginas 50, 76.

D'ANDREA, Robert A; SANGREY, Dwight A. Safety factors for probabilistic slope design. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, American Society of Civil Engineers, v. 108, n. 9, p. 1101–1118, 1982. Citado 1 vez na página 61.

DAI, Y; FREDLUND, D G; STOLTE, W J. A probabilistic slope stability analysis using deterministic computer software. In: **Proceedings of the Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering**, p. 267–74, 1993. Citado 1 vez na página 103.

DEC. Guidelines for Design of Dams. New York Department of Environment Conservation, 1989. Citado 1 vez na página 36.

DITLEVSEN, Ove. Narrow reliability bounds for structural systems. **Journal of structural mechanics**, Taylor & Francis, v. 7, n. 4, p. 453–472, 1979. Citado 1 vez na página 61.

DUNCAN, J Michael. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 126, n. 4, p. 307–316, 2000. Citado 1 vez na página 61.

DUNNICLIFF, L. Geotechnical Instrumentation for Measuring Field Performance. Wiley, Nova York, 1988. Citado 1 vez na página 65.

EHLERS, R S. Métodos Computacionalmente Intensivos em Estatística. **Notas de Aula, Universidade Federal do Paraná**, 2004. Citado 1 vez na página 105.

ELETROBRAS. **Avaliação de Segurança de Barragens Existentes**. [S.l.], 1987. Citado 1 vez na página 75.

_____. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. **Rio de Janeiro**, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 52, 54.

_____. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. **Rio de Janeiro**, 2003. Citado 17 vezes nas páginas 24, 52–57, 59, 65, 66, 75, 91, 126, 145, 158.

EUROCODE. **Basics of Structural Design**. [S.l.: s.n.], 2002. Citado 1 vez na página 24.

FABER, Michael Havbro. **Risk and safety in civil, surveying and environmental engineering**. [S.l.]: ETH, 2003. Citado 1 vez nas páginas 61, 97, 105.

FEMA. Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Hazards. US Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, 2004. Citado 1 vez na página 90.

FERC. Emergency Action Plans. In: ENGINEERING guidelines for the evaluation of hydropower projects, U.S. Department of Energy. [S.l.: s.n.], 2007. Citado 2 vezes nas páginas 88, 90.

FONTENELLE, Alexandre de Sousa. Proposta metodológica de avaliação de riscos em barragens do nordeste brasileiro-estudo de caso: barragens do estado do Ceará, 2007. Citado 1 vez na página 89.

FONTENELLE, Alexandre de Sousa et al. Ações de Segurança de Barragens do Estado do Ceará com ênfase em Inspeções e Risco. **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa**, 2005. Citado 1 vez na página 89.

FREDLUND, Delwyn G; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods of analysis. **Canadian geotechnical journal**, NRC Research Press Ottawa, Canada, v. 14, n. 3, p. 429–439, 1977. Citado 1 vez na página 58.

FREUDENTHAL, AM; GARRELTS, JM; SHINOZUKA, M. The safety of structures, transactions of the ASCE, 1947. Citado 1 vez na página 97.

FUSARO, Teresa Cristina. Módulo 3, Unidade 1: análise e gestão de risco. In: CURSO Segurança de Barragens - ANA. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 1 vez nas páginas 81, 93.

FUSARO, Teresa Cristina et al. Estruturação do manual de monitoramento como ferramenta para a segurança de barragens. Revista Brasileira de Segurança de Barragens, n. 5, 2017. Citado 1 vez na página 64.

GEOSLOPE. . **Stress-strain modeling with GeoStudio**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<https://downloads.geoslope.com/geostudioresources/books/11/2/Static%5C%20Stress%5C%20Strain%5C%20Modeling.pdf>>. Citado 1 vez na página 123.

- GEOSLOPE. **Dynamic Earthquake Modeling with GeoStudio**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<https://downloads.geoslope.com/geostudioresources/books/11/2/QUAKE%5C%20Modeling.pdf>>. Citado 1 vez na página 123.
- _____. **Stability Modeling with GeoStudio**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<https://downloads.geoslope.com/geostudioresources/books/11/2/SLOPE%5C%20Modeling.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 123, 124.
- GEOSTUDIO. **GeoStudio website**. Jun. 2021. Disponível em: <<http://www.geoslope.com>>. Citado 4 vezes nas páginas 122, 123.
- GOVERNMENT, British Columbia. **Dam Safety Regulation-Water Sustainability Act**. British Columbia, Canada, Victoria, 2016. Citado 1 vez na página 48.
- _____. **Inspection and Maintenance of Dam Safety Guidelines**. Water Management Branch, 1998. Citado 1 vez na página 48.
- GRAHAM, W.J. A Procedure for estimating loss of life from Dam Failures, 1999. Citado 1 vez na página 90.
- GRIFFITHS, DV; FENTON, Gordon A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 130, n. 5, p. 507–518, 2004. Citado 1 vez na página 61.
- GRIFFITHS, DV; LANE, PA. Slope stability analysis by finite elements. **Geotechnique**, Thomas Telford Ltd, v. 49, n. 3, p. 387–403, 1999. Citado 1 vez na página 58.
- GUO, X.; DIAS, D.; PAN, Q. Probabilistic stability analysis of an embankment dam considering soil spatial variability. **Computers and Geotechnics**, v. 113, 2019. Citado 1 vez na página 60.
- HASOFER, Abraham M; LIND, Niels C. Exact and invariant second-moment code format. **Journal of the Engineering Mechanics division**, American Society of Civil Engineers, v. 100, n. 1, p. 111–121, 1974. Citado 2 vezes nas páginas 61, 100.
- HASSAN, Ahmed M; WOLFF, Thomas F. Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 125, n. 4, p. 301–308, 1999. Citado 1 vez na página 61.
- HURTADO, Jorge E; ALVAREZ, Diego A. Classification approach for reliability analysis with stochastic finite-element modeling. **Journal of Structural Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 129, n. 8, p. 1141–1149, 2003. Citado 1 vez na página 101.
- ICOLD. Boletim nº 158 - Dam Surveillance Guide, 2014. Citado 1 vez na página 64.
- _____. **Dam Failure - Statistical Analysis**. **Bulletin 99**, International Commission on Large Dams, 1995. Citado 2 vez na página 77.

ICOLD. Small Dams, Design, Surveillance and Rehabilitation, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 29, 36–38.

ICPDR. Danube River Protection Convention, 2020. Citado 1 vez na página 51.

JANSEN, Robert B. **Dams and public safety**. [S.l.]: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1983. Citado 4 vezes nas páginas 39, 77, 78, 112.

JI, J; LIAO, H J; LOW, B K. Modeling 2-D spatial variation in slope reliability analysis using interpolated autocorrelations. **Computers and Geotechnics**, v. 40, p. 135–146, 2012. Citado 1 vez na página 103.

KANJI, M A. Parecer técnico sobre as causas da ruptura da barragem Camará. **Relatório ao Ministério Público, Paraíba**, 2004. Citado 1 vez na página 79.

KOCHEN, R. Segurança, Operação e Monitoramento de Barragens, 2016. Citado 1 vez na página 76.

KOHLER, Jochen. **Risk and safety in engineering**. [S.l.]: ETH, 2011. Citado 0 vezes nas páginas 99, 101.

KOHNO, Shigeyuki; ANG, Alfredo H-S; TANG, Wilson H. Reliability-based design of tunnel support in jointed rock. In: ASCE. STRUCTURAL Safety and Reliability. [S.l.: s.n.], 1990. P. 247–254. Citado 1 vez na página 102.

KRÜGER, C. M. Análise de confiabilidade estrutural aplicada às barragens de concreto. **Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná.**, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 102, 127, 128, 138, 154, 162.

LACASSE, S. Reliability and probabilistic methods. In: INTERNATIONAL conference on soil mechanics and foundation engineering. [S.l.: s.n.], 1994. P. 225–227. Citado 1 vez na página 61.

LACASSE, S; NADIM, F. Uncertainties in Characterizing Soil Properties (Plenary), Uncertainty in the Geologic Environment, From Theory to Practice. In: PROCEEDING of Uncertainty. [S.l.: s.n.], 1996. v. 96. Citado 1 vez na página 61.

LAMBE, T William; WHITMAN, Robert V. **Soil mechanics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1991. v. 10. Citado 1 vez na página 73.

LANE, Nic. **Aging Infrastructure: Dam Safety**. [S.l.], 2006. Citado 2 vez na página 73.

LATHAM, Sir Michael et al. Constructing the team. HM Stationery Office London, UK, 1994. Citado 1 vez na página 92.

LEVIS, Silvia Delattre. Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens de concreto. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo., 2006. Citado 3 vezes nas páginas 137, 138, 154, 162.

LI, Kai Shun; LUMB, Peter. Probabilistic design of slopes. **Canadian geotechnical journal**, NRC Research Press Ottawa, Canada, v. 24, n. 4, p. 520–535, 1987. Citado 1 vez na página 61.

LOW, BK. Practical probabilistic approach using spreadsheet. In: ASCE. **UNCERTAINTY in the geologic environment: From theory to practice**. [S.l.: s.n.], 1996. P. 1284–1302. Citado 1 vez na página 61.

_____. Practical probabilistic slope stability analysis. **Proceedings, soil and rock America**, v. 12, p. 22–26, 2003. Citado 1 vez na página 61.

LOW, BK; GILBERT, RB; WRIGHT, SG. Slope reliability analysis using generalized method of slices. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 124, n. 4, p. 350–362, 1998. Citado 1 vez na página 61.

LOW, BK; LACASSE, S; NADIM, F. Slope reliability analysis accounting for spatial variation. **Georisk**, Taylor & Francis, v. 1, n. 4, p. 177–189, 2007. Citado 1 vez na página 61.

LOW, BK; TANG, Wilson H. Efficient reliability evaluation using spreadsheet. **Journal of engineering mechanics**, American Society of Civil Engineers, v. 123, n. 7, p. 749–752, 1997. Citado 1 vez na página 61.

_____. Reliability analysis of reinforced embankments on soft ground. **Canadian Geotechnical Journal**, NRC Research Press Ottawa, Canada, v. 34, n. 5, p. 672–685, 1997. Citado 1 vez na página 61.

MARQUES FILHO, José. Princípios Básicos da Normalização de Barragens no Brasil: Foco, Abrangência e Participação. I SPD - Simpósio de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Tecnológica na Área de Barragens, 2021. Citado 2 vez na página 110.

MATSUO, Minoru; KURODA, Katsuhiko. Probabilistic approach to design of embankments. **Soils and Foundations**, The Japanese Geotechnical Society, v. 14, n. 2, p. 1–17, 1974. Citado 1 vez na página 61.

MCCULLY, P. When Things Fall Apart: The technical Failure of Large Dams. In: [s.l.: s.n.], 2001. Citado 2 vezes nas páginas 73, 78.

MCCULLY, Patrick. And the Walls Came Tumbling Down: Dam Safety Concerns Grow in Wake of Failures, Changing Climate. **International Rivers Network (Sept. 15)**. **Digital document available at <http://www.irn.org/basics/ard/index.php>**, 2005. Citado 1 vez na página 76.

MCGRATH, S. To study International Practice and use of Risk assessment in Dam Management. Canberra: Winston Churchill Memorial Trust of Australia, 2000. Citado 1 vez na página 39.

MÉAN, P et al. Dam Safety Enhancement Program: A Cooperation Project between Switzerland and China. In: PROCEEDINGS, International Symposium of ICOLD, Kyoto, Japan. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 6 vezes nas páginas 40–42, 51.

MEDEIROS, C H A C. Módulo 1, Unidade 1: diretrizes, legislação e regulamentação. In: CURSO Segurança de Barragens - ANA. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 8 vezes nas páginas 68, 78, 86–88, 95, 109.

MEDEIROS, C H A; PINTO, A A V. A Importância dos Fatores Não Tecnológicos na avaliação da Segurança de Barragens. Destaque para o Erro Humano e Gestão de Risco. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens. CBDB**, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 34, 92.

MELBINGER, R. Die Genehmigung und Überwachung der Talsperren in Österreich. **Österreichische Wasserwirtschaft**, v. 43, n. 5-6, p. 112–124, 1991. Citado 1 vez na página 42.

MELCHERS R E; AHAMMED, M. A fast approximate method for parameter sensitivity estimation in Monte Carlo structural reliability. **Computers and Structures**, v. 82, p. 55–61, 2004. Citado 1 vez na página 103.

MELCHERS, Robert E; BECK, André T. **Structural reliability analysis and prediction**. [S.l.]: John wiley & sons, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 61, 97.

MELO, AV; FUSARO, TC. Avaliação de métodos de análise de riscos aplicados a barragens. **XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**, v. 20, 2015. Citado 1 vez nas páginas 79, 80.

MENESCAL, Rogério de Abreu. **Gestão da segurança de barragens no Brasil-Proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. 2009. 727p.** 2009. Tese (Doutorado) – Tese (Doutorado em Recursos Hídricos)–Centro de Tecnologia, Universidade . . . Citado 2 vezes nas páginas 28, 32.

MI. Manual de Segurança e Inspeção de Barragem, 2002. Citado 1 vez na página 89.

MOSTYN, GR; LI, Kai Shun. Probabilistic slope analysis—State-of-play. In: PROBABILISTIC methods in geotechnical engineering. [S.l.]: CRC Press, 1993. P. 89–109. Citado 1 vez na página 61.

MUANIS PERSECHINI, Maria Ines et al. **Segurança de barragens: engenharia a serviço da sociedade**. [S.l.], 2015. Citado 1 vez na página 23.

NASSER, Rafael Barbosa. McCloud Service Framework: Arcabouço para desenvolvimento de serviços baseados na Simulação de Monte Carlo na Cloud. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro., 2012. Citado 1 vez na página 126.

NIPFP. Dam Safety in India, 2021. Citado 8 vezes nas páginas 35, 49, 50, 81, 86, 87.

- NOWAK, Andrzej S; COLLINS, Kevin R. **Reliability of structures**. [S.l.]: CRC press, 2012. Citado 1 vez na página 103.
- OFFICIALS, American State Dam Safety. Dam Failures and Incidents. Learning from The Past: A Snapshot of Historic U.S. Dam Failures., 2020. Citado 1 vez na página 47.
- OKA, Yoneo; WU, Tien H. System reliability of slope stability. **Journal of Geotechnical Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 116, n. 8, p. 1185–1189, 1990. Citado 1 vez na página 61.
- PEREIRE, Geraldo Magela. **Acidentes e rupturas de barragens**. [S.l.]: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2020. P. 307. Citado 3 vezes nas páginas 75, 77, 78.
- PERSECHINI, Maria Inês Muanis et al. Série Água Brasil 11. Grupo Banco Mundial, 2015. Citado 1 vezes nas páginas 35, 36.
- PHOON, Kok-Kwang. **Reliability-based design of foundations for transmission line structures**. 1995. Tese (Doutorado) – Cornell University. Citado 1 vez na página 62.
- PHOON, Kok-Kwang; KULHAWY, Fred H. Characterization of geotechnical variability. **Canadian geotechnical journal**, NRC Research Press Ottawa, Canada, v. 36, n. 4, p. 612–624, 1999. Citado 1 vez na página 62.
- PIASENTIN, Corrado. Módulo 1, Unidade 3: aspectos de projeto, construção, operação e manutenção de barragens. In: CURSO Segurança de Barragens - ANA. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 2 vez na página 64.
- _____. Módulo 2, Unidade 3: inspeções visuais. In: CURSO Segurança de Barragens - ANA. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 2 vez na página 68.
- PÍNFAARI, J C; CARNEIRO, E F; CESTARI, E J R. Aquisições automáticas de leituras de instrumentos de auscultação utilizando sensores de baixo custo. In: XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. [S.l.: s.n.], 2011. Citado 1 vez na página 67.
- PINTO, A Veiga. Gestão de Risco e Segurança de Barragens. **3 Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados**, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 81, 85, 92.
- PROGRAM", "Water Resources. Dam Safety Program Guidelines; Part IV: Dam Design and Construction. Washington State Department of Ecology, 1993. Citado 1 vez na página 36.
- QI X H; LI, D Q. Effect of spatial variability of shear strength parameters on critical slip surfaces of slopes. **Engineering Geology**, v. 239, p. 41–49, 2018. Citado 1 vez na página 61.

RACKWITZ, Rüdiger. Reliability analysis—a review and some perspectives. **Structural safety**, Elsevier, v. 23, n. 4, p. 365–395, 2001. Citado 1 vez na página 97.

EL-RAMLY, Hassan Mahmoud Fawzy. Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: Bridging theory and practice., 2002. Citado 1 vez na página 61.

_____. _____. 2002. Citado 2 vezes nas páginas 102, 104.

RAMOS, M. Abordagem determinística e probabilística na análise de estabilidade de uma barragem de concreto à gravidade, 2021. Citado 1 vezes nas páginas 126, 158.

REGAN, Patrick J. Dam and Civil Structures: An Examination os Dam Failures vs. Age of Dams. *Hydro Review*, 2010. Citado 1 vez na página 76.

RIVERS, International. Damming Statistics, 2007. Citado 1 vez na página 76.

ROBERT, C P. **Monte Carlo Methods**. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 1 vez na página 102.

SANEPAR. **Relatório Técnico de Monitoramento Geotécnico da Barragem de Iraí - PR**. [S.l.], 2015. P. 73. Citado 5 vezes nas páginas 128, 130, 131, 136.

SARMA, SK; TAN, D. Determination of critical slip surface in slope analysis.

Géotechnique, Thomas Telford Ltd, v. 56, n. 8, p. 539–550, 2006. Citado 1 vez na página 58.

SAYED, T. The Resolve to Cooperate on Danube: Condition for Transboundary Water Cooperation., 2018. Citado 1 vez na página 51.

SEIDENFUB, T. Collapses in tunnelling. **Foundation Engineering and**, 2006. Citado 1 vez na página 92.

SERAFIM, J L. Safety of dams judged from failures, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 77, 78.

SHINODA, M. Quasi-Monte Carlo simulation with low-discrepancy sequence for reinforced soil slopes. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 133, n. 4, p. 393–404, 2007. Citado 1 vez na página 61.

SHINOZUKA, Masanobu. Basic analysis of structural safety. **Journal of Structural Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 109, n. 3, p. 721–740, 1983. Citado 1 vez na página 61.

SILVA CARVALHO, Patrícia Garcia da. Módulo 1, Unidade 4: barragens e seus impactos socioambientais. In: CURSO Segurança de Barragens - ANA. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 3 vezes nas páginas 91, 92.

SILVA, Daniela Carolina da Costa; FAIS, Laura Maria Canno Ferreira; FREIRIA, Rafael Costa. Segurança de barragens: panorama histórico da legislação brasileira. **Revista de direito, política e filosofia**, v. I, 2020. ISSN 2316-1833. Citado 6 vezes nas páginas 29–32.

- SILVA, João Paulo Moreira da et al. Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes, 2011. Citado 0 vez na página 60.
- SILVEIRA, J F A. Riscos associados a barragens e o histórico de casos. **Simpósio de Riscos Associados a Barragens**, 2001. Citado 1 vez na página 79.
- SILVEIRA, JFA da. Análise de Risco Aplicada a Segurança de barragens. **Revista do Comitê Brasileiro de Barragens, Edição Especial, Novembro**, p. 1–42, 1999. Citado 1 vez na página 79.
- SIVAKUMAR BABU, GL; MUKESH, MD. Effect of soil variability on reliability of soil slopes. **Geotechnique**, Thomas Telford Ltd, v. 54, n. 5, p. 335–337, 2004. Citado 1 vez na página 61.
- SNISB. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens**. 2020. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br>>. Citado 1 vezes nas páginas 128, 129.
- SOUZA, Luan Rodrigo de Almeida. Avaliação da influência das características do maciço rochoso de fundação sobre a probabilidade de falha por deslizamento de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas, 2017. Citado 1 vez na página 23.
- SQUARCIO, Roberto Mauro Felix. Análise da confiabilidade de oleodutos corroídos utilizando o Método de Monte Carlo: um estudo de caso, 2009. Citado 1 vez na página 106.
- TANG, WH; YUCEMEN, MS; ANG, AH-S. Probability-based short term design of soil slopes. **Canadian Geotechnical Journal**, NRC Research Press Ottawa, Canada, v. 13, n. 3, p. 201–215, 1976. Citado 1 vez na página 61.
- US DEPARTMENT OF THE INTERIOR, Bureau of Reclamation. **Safety Evaluation of Existing Dams**. [S.l.], 1987. Citado 1 vez na página 75.
- USACE. **EM 1110-2-1902 - Slope Stability**. [S.l.], 2003. Citado 1 vez na página 59.
- _____. Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies. **ETL**, n. 1110-2-556, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 24, 103.
- USBR. Dam safety risk analysis methodology. **Technical Service Center, Denver - CO**, 2003. Citado 1 vez na página 79.
- USBR, Teton Dam Failure Review Group. **Failure of Teton Dam: A Report of Findings**. [S.l.]: Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering e Research, 1977. Citado 1 vez na página 77.
- VANMARCKE, Erik H. Reliability of earth slopes. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, American Society of Civil Engineers, v. 103, n. 11, p. 1247–1265, 1977. Citado 1 vez na página 61.
- WCD. A new framework for decisio-making. Report of the World Commission on Dams, 2001. Citado 1 vez na página 78.

- WHITMAN, Robert V. Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 126, n. 7, p. 583–593, 2000. Citado 1 vez na página 61.
- WOLFF, Thomas F. Probabilistic slope stability in theory and practice. **Uncertainty in the geologic environment: From theory to practice**, ASCE, Reston, Va, p. 419–433, 1996. Citado 1 vez na página 61.
- WOLNEY, D. Regulamentação e fiscalização sobre segurança de barragens ainda é um desafio no Brasil. **Revista Fundações e Obras Geotécnicas**, Rudder, v. 66, 2016. Citado 1 vez na página 23.
- XU, B; LOW, BK. Probabilistic stability analyses of embankments based on finite-element method. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 132, n. 11, p. 1444–1454, 2006. Citado 1 vez na página 61.
- ZENZ, Gerald; OBERNHUBER, Pius; CZERNY, Helmut. The great significance of dam safety in Austria/Der hohe Stellenwert der Talsperrensicherheit in Österreich. **Geomechanics and tunnelling**, Wiley Online Library, v. 5, n. 5, p. 631–637, 2012. Citado 10 vezes nas páginas 36, 42–44, 75, 112.
- ZHANG, L et al. Risk-based estimate for operational safety in complex projects under uncertainty. **Applied Soft Computing**, v. 54, p. 108–12, 2017. Citado 1 vez na página 102.
- ZHOU, Xingbo et al. Study on dam risk classification in China. **Water Science and Technology: Water Supply**, IWA Publishing, v. 15, n. 3, p. 483–489, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 50, 82.
- ZUCULIN, Sérgio. Módulo 2, Unidade 2: instrumentação em barragens. In: CURSO Segurança de Barragens - ANA. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 6 vezes nas páginas 65, 67, 73.
- ZUFFO, Monica Soares Reslo; GENOVEZ, Ana Inês Borri. A segurança de barragens sob a ótica de algumas legislações internacionais. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 46, 48, 51.
- _____. Dam safety legislation: a focus on the different approaches. Proceedings of 16th IAHR-APD Congress e 3rd Symposium os IAHR-ISHS, 2008. Citado 1 vez na página 73.