



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy

Sérgio R. Leite

Dissertação apresentada como requisito parcial para conclusão do
Mestrado Profissional em Computação Aplicada

Orientador
Prof. Dr. Ricardo Matos Chaim

Brasília
2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L533m Leite, Sérgio Ribeiro
Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens
com Associação de Métodos de Análise de Decisão
Multicritério e Conjuntos Fuzzy / Sérgio Ribeiro Leite;
orientador Ricardo Matos Chaim. -- Brasília, 2019.
222 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado Profissional em
Computação Aplicada) -- Universidade de Brasília, 2019.

1. Segurança de Barragens. 2. Gerenciamento de Risco. 3.
Métodos de Decisão. 4. Análise Multicritério. 5. Teoria de
Conjuntos Fuzzy. I. Chaim, Ricardo Matos, orient. II. Título.

Dedicatória

Para minha mãe.

Agradecimentos

À Deus.

Aos meus pais, Félix José da Mota Leite (*in memoriam*) e Tereza Cristina Ribeiro Leite, começo de tudo.

À minha amada esposa e Nair Leonarda de Souza e ao meu filho Nicolas Leonardo Ribeiro Leite, razões da minha contínua busca por melhoria. Obrigado pela compreensão pelas horas ausentes.

Ao meu irmão André Ribeiro Leite pela eterna torcida.

Ao Prof. Dr. Ricardo Matos Chaim pelas orientações pautadas no profissionalismo e na amizade. Suas preciosas observações foram fundamentais para o enriquecimento e desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores Dr^a. Ana Carla Bittencourt Reis e Dr. Hércules Antônio do Prado, por fazerem parte da banca examinadora.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da UnB, em especial Dr. Ari Melo Mariano, Dr. Edgard Costa Oliveira; Dr. João Carlos Félix Souza e Dr^a. Simone Borges Simão Monteiro pelo sempre pronto atendimento e apoio.

Aos Superintendentes de Fiscalização dos Serviços de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica – SFG/ANEEL Alessandro D´Afonseca Cantarino, Hélivio Neves Guerra, Ludimila Lima da Silva e Gentil Nogueira De Sá Júnior pelo reconhecimento da importância deste projeto e pelo apoio à sua viabilização.

Aos Especialistas em Regulação da SFG/ANEEL Wellington Santos de Andrade, Hermann Friedenberg de Lemos e Júlio Louzada Ribeiro Mendes pelas sempre produtivas discussões.

À equipe de Gestão de Informação da ANEEL pelo suporte tecnológico, em particular aos profissionais Wendel Ribeiro, Thiago Pimenta e Uriane Moreira, sempre dispostos a ajudar nos momentos difíceis.

Aos colegas de mestrado, que vivenciaram momentos de estudo, de escrita de artigo e de tensão, como a prova de qualificação, no decorrer desta jornada. Em especial cito, representando todos, Fabrício Carmo Cabral, amigo e guerreiro.

Uma dissertação de mestrado não chega a um bom porto sem o precioso apoio de várias pessoas. Nesse sentido, agradeço à todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Acesso ao Portal de Periódicos.

*“Do rio que tudo arrasta se diz que é violento.
Mas ninguém diz violentas as margens que o comprimem.
(Bertolt Brecht - dramaturgo e poeta alemão)*

*“Tudo na vida é gerenciamento de risco,
Não sua eliminação.
(Walter Wriston - executivo-chefe do Citibank / Citicorp de 1967 a 1984)*

Resumo

Esse trabalho objetiva modelar a análise de riscos em anomalias e patologias em barragens para prevenção de incidentes e acidentes que levem à ruptura com impacto danoso. Dessa forma por meio de análise documental identificaram-se as anomalias ou patologias em barragens advindas de modelos estabelecidos; também identificaram-se os fatores de risco associados a tais anomalias; categorizaram-se quanto à natureza do risco as barragens selecionadas por equipe de especialistas; e validaram-se os fatores de risco associados a essas por intermédio de entrevistas semiestruturadas realizadas com os engenheiros responsáveis por sua segurança. Para tanto, a pesquisa documental ajudou a identificar os grandes grupos e os fatores de risco. A utilização de Método de Apoio Multicritério à Tomada de Decisão associado a regras *Fuzzy* apoiaram na categorização quanto a natureza do risco. Além disso, 57 engenheiros especialistas, responsáveis pela segurança das estruturas estudadas, foram entrevistados para que se pudessem validar os fatores de risco. O modelo desenvolvido permitiu a análise ampla do desempenho e da integridade das estruturas avaliadas, servindo de base para identificação de vulnerabilidades específicas, sendo os resultados apresentados para os cenários avaliados considerados conexos com as preferências dos especialistas e do decisor. Neles 26% das barragens estudadas posicionaram-se em categoria de grau de risco elevado, indicando necessidade de maior atenção em termos de conservação dessas estruturas, reforçando a necessidade de ações de controle e monitoramento.

Palavras-chave: Segurança de Barragens, Gerenciamento de Risco, Métodos de Decisão, Análise Multicritério, Teoria de Conjuntos *Fuzzy*

Abstract

This work aims to model risk analysis of anomalies and pathologies in dams to prevent incidents and accidents that lead to rupture with harmful impact. Thus, through documental analysis, anomalies or pathologies in dams resulting from established models were identified; risk factors associated with such anomalies were also identified; the nature of the risk was categorized by the dams selected by a team of specialists; and the risk factors associated with these were validated through semi-structured interviews conducted with the engineers responsible for their safety. To this end, desk research helped identify the large groups and risk factors. The use of the Multicriteria Decision Support Method associated with Fuzzy rules supported the categorisation of the nature of the risk. In addition, 57 specialist engineers, responsible for the safety of the structures studied, were interviewed in order to validate the risk factors. The model developed allowed a broad analysis of the performance and integrity of the evaluated structures, serving as a basis for the identification of specific vulnerabilities, with the results presented for the evaluated scenarios considered related to the preferences of the specialists and the decision maker. In them, 26% of the dams studied were in a high-risk category, indicating the need for greater attention in terms of the conservation of these structures, reinforcing the need for control and monitoring actions.

Keywords: Dam Safety, Risk Management, Decision Methods, Multicriteria Analysis, *Fuzzy Sets Theory*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	4
1.2	Definição do Problema	9
1.2.1	Objetivos	13
1.2.1.1	Objetivo Geral	13
1.2.1.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Justificativa e Relevância	14
1.3.1	Estruturação dos Capítulos	16
2	Revisão Bibliográfica e Documental	18
2.1	Segurança em Barragens: Breve Histórico	18
2.2	Definição de Risco, Risco Operacional, Incidentes e Acidentes	22
2.3	Avaliação de Riscos em Barragens	25
2.4	Gestão de Risco Aplicada a Barragens	27
2.4.1	Avaliação de Riscos	30
2.4.2	Análise de risco	31
2.4.3	Apreciação de risco	32
2.4.4	Controle de risco	33
2.5	Riscos Associados a Barragens	34
2.6	Legislação Internacional Relacionada à Segurança de Barragens	38
2.6.1	Argentina	40
2.6.2	Austrália	41
2.6.3	Canadá	42
2.6.4	Estados Unidos	43
2.6.5	França	45
2.6.6	Holanda e Países Baixos	46
2.6.7	Noruega	46
2.6.8	Portugal	47
2.6.9	Reino Unido	48

2.7	Legislação Nacional Relacionada à Segurança de Barragens	49
2.8	Considerações Finais sobre a Legislação e Regulamentação de Barragens .	52
2.9	Métodos de Priorização e a Tomada de Decisão	54
2.10	O Processo Multicritério de Apoio à Decisão	56
2.11	Métodos Multicritério de Apoio à Decisão	57
	2.11.1 Métodos de Sobreclassificação	59
	2.11.2 Problemas e Tipos de Problemáticas	59
	2.11.3 Família de Métodos PROMETHEE	60
	2.11.4 Família de Métodos ELECTRE	62
2.12	Método ELECTRE TRI	63
	2.12.1 A Problemática de Classificação	64
	2.12.2 Modelagem de Preferências	65
	2.12.3 Procedimento de Agregação	66
	2.12.4 Procedimentos e Condições a Serem Observadas	67
	2.12.5 Índices de Concordância Parcial e Global	68
	2.12.6 Índice de Discordância	69
	2.12.7 Índice de Credibilidade	70
	2.12.8 Nível de Corte	70
	2.12.9 Procedimentos de Alocação	71
2.13	Abordagem Fuzzy MCDA	72
	2.13.1 Teoria dos Conjuntos e Lógica Fuzzy	72
	2.13.1.1 Conjuntos Nebulosos	73
	2.13.1.2 Operações com Conjuntos Nebulosos	74
	2.13.1.3 Agregação de Conjuntos Nebulosos	75
	2.13.1.4 Números Fuzzy	75
	2.13.1.5 Variáveis Linguísticas	76
	2.13.1.6 Sistemas Fuzzy	77
	2.13.2 Exemplos de Aplicações do Fuzzy MCDA Considerando o Fator de Risco	78
3	Procedimentos e Métodos	80
3.1	Finalidade da Pesquisa	83
3.2	Tipo de Pesquisa	83
3.3	Caracterização do Objeto de Estudo e Delimitação do Universo de Pesquisa	84
3.4	Fontes de Informações e Dados	88
	3.4.1 Quanto à Classificação das Barragens	89
	3.4.2 Quanto à Validação dos Fatores de Risco com Técnicos do Setor . .	89
3.5	Ferramentas Computacionais Aplicadas	90

3.6	Limitações e Restrições do Estudo	91
4	Modelo Proposto	92
4.1	Descrição do Modelo Proposto	92
4.2	Objetivo Específico 1: Identificar os Fatores de Risco Associados aos Padrões de Segurança Regulatoriamente Reconhecidos e às Anomalias Observadas em Barragens	95
4.2.1	Definição dos Eventos e Fatores de Risco	96
4.3	Objetivo Específico 2: Categorizar Quanto à Natureza do Risco, Barragens Seleccionadas por Equipe Especialista, Mediante Associação de Método de Apoio Multicritério à Decisão	99
4.3.1	Aplicação do Modelo	99
4.3.2	Aplicação do Modelo Fuzzy	99
4.3.2.1	Primeira etapa: Determinação das variáveis linguísticas do modelo	99
4.3.2.2	Segunda etapa: Escolha dos termos linguísticos a serem utilizados	101
4.3.2.3	Terceira Etapa: Criação das funções de pertinências para os termos <i>fuzzy</i> apresentados	103
4.3.2.4	Quarta etapa: Aplicação dos conjuntos <i>fuzzy</i> na amostra definida	104
4.3.2.5	Quinta etapa: Tratamento dos dados	105
4.3.3	Aplicação do Método ELECTRE TRI	110
4.3.3.1	Definição dos Critérios e Categorias	110
4.3.3.2	Definição do Desempenho das Alternativas por Critério	111
4.3.3.3	Definição dos Perfis das Categorias	112
4.3.3.4	Definição dos Limites de Preferência (p), Indiferença (q) e Veto (v)	114
4.3.3.5	Definição do Grau de Influência dos Critérios e do Grau de Sobreclassificação	115
4.3.3.6	Execução do Algoritmo de Classificação ELECTRE TRI	116
4.3.3.7	Análise das Restrições e Ajustes do Modelo de Classificação	119
4.3.4	Análise da Classificação Fuzzy	124
4.3.4.1	Galgamento	126
4.3.4.2	Percolação	128
4.3.4.3	Deformação	130
4.3.4.4	Recalque	132
4.3.4.5	Escorregamento	134

4.3.5	Análise da Classificação ELECTRE TRI	135
4.4	Objetivo Específico 3: Validar os Fatores de Risco Associados às Barragens por Intermédio de Entrevistas Semiestruturadas Realizadas com os Engenheiros Responsáveis pela Segurança dessas Estruturas	138
4.4.1	Análise das Questões 1 a 3	139
4.4.2	Análise da Questão 4	141
4.4.3	Análise da Questão 5	144
4.4.4	Análise da Questão 6	146
4.4.5	Análise da Questão 7	148
4.4.6	Análise da Questão 8	149
4.4.7	Análise da Questão 9	150
5	Conclusões e Recomendações	154
5.1	Dificuldades	157
5.2	Recomendações	157
	Referências	159
	Apêndice	173
A	Código Python Análise Conjuntos Fuzzy	174
B	Código Python Electre TRI	177
	Anexo	186
I	Usinas Seleccionadas	186
II	Tabelas de Avaliação REN 696/2015 - ANEEL	188
III	Formulário de Segurança de Barragens - FSB	193
IV	Questionário de Validação - Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação Estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens	197

Lista de Figuras

1.1	Perspectivas de (a) uma sociedade orientada para a segurança e (b) uma sociedade orientada para o risco	3
1.2	Aproveitamentos Hidrelétricos Brasileiros	8
1.3	Estrutura Matricial para Avaliação de Barragens	9
1.4	Faixas de Classificação de Barragens quanto ao CRI e ao DPA	10
1.5	Matriz para Classificação Final de Barragens	10
1.6	Problema da Classificação de Risco	13
1.7	Modelo de Fiscalização em 3 Níveis	15
2.1	Mapa das mais importantes barragens romanas (cheio) e pré-romanas (vazado) na zona mediterrânea e no Oriente Próximo	18
2.2	Diagrama da barragem <i>Saad el-Kafara</i> baseado em foto aérea	19
2.3	Ruptura da barragem de Teton	20
2.4	Sistema Integrado de Segurança de Barragens	26
2.5	Controle de Riscos em Barragens	26
2.6	Atividades fundamentais da gestão de risco	28
2.7	Gerenciamento do Risco em Barragens	29
2.8	Etapas Fundamentais da Gestão de Risco em Barragens conforme a CNPGB	29
2.9	Desencadeamento de um incidente e sua trajetória através de barreiras	30
2.10	Princípios de aceitabilidade e tolerabilidade	33
2.11	Relação entre os envolvidos no sistema da teoria multicausal da ocorrência de incidentes	35
2.12	Frequência de incidentes com barragens brasileiras reportados pela imprensa escrita entre 2000 a 2008	38
2.13	Tabelas de Classificação de Barragens utilizadas pelos principais Órgãos Fiscalizadores	50
2.14	Comparação entre o tempo médio de implementação de programas de segurança de barragens	54
2.15	Processo de apoio multicritério à decisão	56
2.16	Tipos de Problemáticas	60

2.17	Preferência do decisor	61
2.18	Categorias e limites no método ELECTRE TRI	64
2.19	Diagrama de utilização do ELECTRE TRI	66
2.20	Relações entre δ e λ	70
2.21	Comparativo entre a Lógica Clássica e a Lógica <i>Fuzzy</i>	73
2.22	Representação de um número <i>fuzzy</i> triangular	76
2.23	Discretização <i>fuzzy</i> para uma variável dividida em cinco conjuntos <i>fuzzy</i>	76
2.24	Arquitetura Funcional Genérica de um Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>	77
3.1	Distribuição Geográfica da Amostra	87
3.2	Resultados para o Teste t de Student	88
4.1	Modelo de Avaliação Proposto	94
4.2	Fluxograma de estruturação para Classificação de Barragens quanto ao Risco	99
4.3	Conjuntos <i>fuzzy</i> dos termos relacionados aos graus de presença dos fatores de risco relacionados à Segurança de Barragens	103
4.4	Equivalência entre categorias do Método ELECTRE e o Modelo de Fiscalização em 3 Níveis	111
4.5	Resultados da Classificação para $\lambda = 0,76$	116
4.6	Resultados da Classificação Ajustados pelos Quintis para $\lambda = 0,76$	117
4.7	Resultados da Classificação Otimista Ajustados pelos Quintis para $\lambda = 0,76$	118
4.8	Matriz de Preferências: Resultados para Barragens de Concreto para $\lambda = 0,76$	119
4.9	Matriz de Preferências: Resultados Ajustados para Barragens de Concreto $\lambda = 0,60$	120
4.10	Matriz de Preferências: Resultados Ajustados para Barragens de Terra e Enrocamento $\lambda = 0,70$	121
4.11	Resultados da Classificação Ajustados para os Novos Níveis de Corte e pelos Quintis da Amostra	122
4.12	Resultados das Classificações Pessimista e Otimista para os valores ajustados de λ	123
4.13	Matrizes de correlação para os fatores de risco calculados	125
4.14	Mapa de Situação. Classificação por Nível de Galgamento	126
4.15	Distribuição de barragens. Classificação por Nível de Galgamento	127
4.16	Estudo de Correlações por Nível de Galgamento	127
4.17	Mapa de Situação. Classificação por Nível de Percolação	128
4.18	Estudo de Correlações por Nível de Percolação	129
4.19	Distribuição de barragens. Classificação por Nível de Percolação	129

4.20	Mapa de Situação. Classificação por Nível de Deformação	130
4.21	Curva de densidade para valores de deformação	131
4.22	Distribuição de barragens. Classificação por Nível de Deformação	131
4.23	Mapa de Situação. Classificação por Nível de Recalque	132
4.24	Comparativo das dos Níveis de Recalque e de Deformação. Classificação por Nível de Deformacao	132
4.25	Estudo de Correlações. Comparativo dos Níveis de Recalque e de Deformação	133
4.26	Estudo de Correlações por Nível de Recalque	134
4.27	Mapa de Situação. Classificação por Nível de Escorregamento	135
4.28	Mapa de Situação. Resultado da Classificação de Barragens pelo Método ELECTRE TRI	136
4.29	Matriz de Classificação de Risco	138
4.30	Respostas para as Questões de 1 a 3: Descrição do Conjunto de Respondentes	140
4.31	Respostas para Questão 04	141
4.32	Correlações entre número de barragens rompidas até 1988 e sua altura . . .	142
4.33	Correlações entre número de barragens rompidas até 1988 e tipo de material de construção	143
4.34	Respostas para Questão 05	144
4.35	Respostas para Questão 06	146
4.36	Respostas para Questão 07	148
4.37	Respostas para Questão 08	149
4.38	Respostas para Questão 09	150

Lista de Tabelas

1.1	Diferenças entre Barragens de Rejeito e de Acumulação de Água	5
1.2	Rompimento de Barragens no Estado de Minas Gerais 2000-2015	6
1.3	Rompimento de Barragens no Brasil 2000-2015	6
2.1	Comparativo entre algumas definições de risco e os elementos que o compõem	23
2.2	Tipos de Incerteza: Origem e Forma de Tratamento	31
2.3	Riscos em Barragens	36
2.4	Causas de ruptura de barragens 1975-2011.	37
2.5	Causas de acidentes em barragens de terra e enrocamento	37
2.6	Causas de acidentes e rupturas em barragens de concreto	37
2.7	Legislação Internacional Relacionada à Segurança de Barragens	39
2.8	Classificação de Risco Canadense	43
2.9	Classificação de perigo potencial	44
2.10	Classificação das Barragens Francesas	45
2.11	Países estudados pelo Banco Mundial	53
2.12	Estágios do processo decisório	56
3.1	Classificação Quanto ao Risco - REN 696/2015	85
3.2	Distribuição das Barragens Seleccionadas para Avaliação	86
4.1	ELECTRE TRI <i>vs</i> Riscos	93
4.2	Eventos Seleccionados para Avaliação do Risco da Barragem	97
4.3	Fatores de Risco Associados aos Eventos	98
4.4	Determinação do Coeficiente de Importância das Variáveis Linguísticas . .	100
4.5	Determinação do Coeficiente de Importância das Variáveis Linguísticas de Recalque	101
4.6	Variáveis Linguísticas do Modelo	101
4.7	Graus de presença dos fatores de risco relacionados à Segurança de Barragens	102
4.8	Conjuntos <i>Fuzzy</i> escolhidos e seus Números Triangulares <i>Fuzzy</i> correspon- dentes	103

4.9	Resultados da Amostra Padronizada pelos Conjuntos <i>fuzzy</i> - Barragens de Terra / Enrocamento	104
4.10	Resultados da Amostra Padronizada pelos Conjuntos <i>fuzzy</i> - Barragens de Concreto	105
4.11	Números Fuzzy Triangulares <i>fuzzy</i> - Barragens de Terra / Enrocamento . .	107
4.12	Números Fuzzy Triangulares <i>fuzzy</i> - Barragens de Concreto	108
4.13	Valores Normalizados <i>fuzzy</i> - Barragens de Terra / Enrocamento	109
4.14	Valores Normalizados <i>fuzzy</i> - Barragens de Concreto	110
4.15	Perfis das Categorias	113
4.16	Perfis das Categorias Ajustado para Barragens de Terra / Enrocamento . .	113
4.17	Perfis das Categorias Ajustado para Barragens de Concreto	114
4.18	Limiares do Modelo	114
4.19	Influência dos critérios	115
4.20	Matriz de Classificação de Riscos	137
4.21	Tipos de Cultura Organizacional	152
I.1	Usinas Seleccionadas para Avaliação	187

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AHP Analytic Hierarchy Process.

ALARP As Low As Reasonably Practicable.

AMD Apoio à Decisão Multicritério.

ANA Agência Nacional de Águas.

ANCOLD Comitê Australiano de Grandes Barragens.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica.

ANP Analytic Network Process.

AVA Ambiente Virtual de Aprendizagem.

BC Hydro British Columbia Hydro.

CDA Canadian Dam Association.

CEG Código dos Empreendimentos de Geração.

CGH Central Geradora Hidrelétrica.

CNPGB Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens.

CNRH Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

CONFEA Conselho Federal de Engenharia e Agronomia.

CRI Categoria de Risco.

CSB Comissão de Segurança de Barragens.

CT Características Técnicas Intrínsecas das Estruturas de Barragem.

DPA Dano Potencial Associado.

DSA Dam Safety Act.

DSR Dam Safety Regulations.

EC Estado de Conservação das Estruturas de Barragem.

EDD Etudes de Dangers.

EISH Incident Declaration.

ELECTRE Elimination et Choix Traduisant la Réalité.

Eletrobras Centrais Elétricas Brasileiras S.A..

EPA Environmental Protection Agency.

ETL Extract, Transform and Load.

FAD Formulário de AutoDeclaração.

FEMA Federal Emergency Management Agency.

FMEA Failure Mode and Effect Analysis.

FMECA Failure Mode, Effect and Criticality Analysis.

FSB Formulário de Segurança de Barragens.

HSE UK Health and Safety Executive.

ICODS Interagency Committee on Dam Safety.

ICOLD International Commission On Large Dams.

IEC International Electrotechnical Commission.

ISO International Organization for Standardization.

IST Instituto Superior de Tecnologia em Ciências da Computação.

MCDA Multicriteria Decision Aid.

MEEDDM Ministério da Ecologia, da Energia, do Desenvolvimento Sustentável e do Mar.

NASA National Aeronautics and Space Administration.

NBR Norma Brasileira.

OCDE Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

ONU Organização das Nações Unidas.

ORSEP Organismo Regulador de Seguridade de Presas.

PAMC Procedimento de agregação.

PAR Population at Risk.

PCH Pequena Central Hidrelétrica.

PMBOK Project Management Body of Knowledge.

PMI Project Management Institute.

PNSB Política Nacional de Segurança de Barragens.

PRA Probabilistic Risk Analysis.

PROMETHEE Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation.

PS Planos de Segurança.

QRA Quantitative Risk Analysis.

REN Resolução Normativa ANEEL.

RNMMP Rede Nacional de Médicas e Médicos Populares.

RSB Relatório de Segurança de Barragens.

SNISB Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

TOPSIS Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution.

UHE Usina Hidrelétrica.

USBR US Bureau of Reclamation.

Capítulo 1

Introdução

"Depois de tudo que a gente viveu em Mariana, é devastador vivenciar isso de novo em Brumadinho, de forma ainda mais grave ainda. Nesses três anos, participamos de mobilizações, a imprensa divulgou, lutamos. Mas Mariana está esquecida".

Marina Abreu Corradi Cruz

Médica da Rede Nacional de Médicas e Médicos Populares - RNMMP

De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens - RSB, elaborado pela Agência Nacional de Águas - ANA, referente ao ano de 2017, o Brasil registra em média quatro acidentes com barragens a cada ano. Há evidências, no entanto, de que tal estatística possa ser bem maior: a própria agência reconhece em seu relatório que há acidentes não relatados e mesmo barragens que não foram informadas ao governo federal.

Os riscos associados ao rompimento de barragens são, na maioria dos casos, de grandes proporções. Envolvem ameaças à vida humana, danos materiais, ambientais e sociais. Além disso, o arranjo espacial de uma barragem favorece a propagação do desastre em grande escala, uma vez que essas comumente situam-se em vales de rios, córregos e afluentes ocupados a jusante por núcleos urbanos e demais formas de adensamento populacional.

Barragens constituem um importante vetor de desenvolvimento socioeconômico e territorial, fixando populações e consolidando nações. Sua existência não pode ser ignorada, sequer prescindida, estando sua história intimamente associada à da humanidade. Nesse sentido, Jansen [1] afirma que o risco de falha de barragens é um dos pesos inevitáveis que a humanidade deve carregar.

As barragens são estruturas que se destinam a reter líquidos ou misturas de líquidos e sólidos de maneira controlável e segura [2]. Apesar de reduzido, o risco de ruptura de uma barragem constitui uma realidade potencial e tem sido uma preocupação pública.

De acordo com o Boletim 99 da ICOLD ¹ [3], a percentagem de ruptura de grandes barragens é de 2,2% para aquelas construídas antes de 1950 e de cerca de 0,5% para as construídas após esta data. A maior parte das rupturas, cerca de 70%, ocorreu com barragens nos seus primeiros 10 anos de operação e, mais especialmente, no primeiro ano após seu comissionamento ².

Nesse contexto as políticas e programas de segurança de barragens tem adquirido cada vez mais importância. Hoje cerca de 40 países adotam programas de segurança de barragens, entre esses Austrália, Canadá, Estados Unidos, Reino Unido, Portugal e Suécia. Nesses a estatística relativa aos acidentes de barragens, sejam elas de terra ou de concreto, comprova uma redução do número total de acidentes para uma mesma quantidade de barragens ao longo das últimas décadas.

Porém, ainda há muito a ser feito no que concerne à análise de risco e à gestão de segurança. Vallerio & Letcher [4] apontam que recentes desastres têm destacado as dificuldades em avaliar e gerir os riscos e tipos de falhas que podem ocorrer em situações extremas. A transcrição da fala à imprensa, da médica voluntária em Mariana e Brumadinho, que abre este documento, é uma prova material dessa condição [5] .

Os riscos estão estreitamente relacionados ao desenvolvimento da própria sociedade. Sua percepção progride conforme as sociedades percebem ou integram a ocorrência de uma crise ou catástrofe em seu cotidiano [6]. A sociedade contemporânea reconhece a existência destes riscos e a impossibilidade de se eliminar todas as ameaças existentes e, diante da necessidade de certos benefícios, acaba por tolerá-los, porém, não mais aceita que estes não recebam o tratamento adequado [2].

O aumento da discussão relativa aos riscos impostos à sociedade como consequência da implantação de reservatórios, vem demandando maior preparo dos proprietários de barragens e das autoridades constituídas. Para os primeiros não basta mais apenas a busca pelo atendimento aos critérios normatizados, como valores mínimos de resistência e de fatores de segurança. Para os segundos, além da promoção de ambientes regulatórios mais severos, verifica-se a necessidade da formatação de mecanismos e de indicadores de desempenho que promovam uma melhor gestão da sua base de informações.

¹A *International Commission On Large Dams* - ICOLD é uma organização internacional não governamental que atua como fórum para o intercâmbio de conhecimento e experiência em engenharia de barragens. Fundada em 1928, possui Comitês Nacionais em cerca de 100 países e aproximadamente 10.000 membros filiados. Os membros da ICOLD são essencialmente engenheiros, geólogos e cientistas oriundos de organizações governamentais ou privadas, empresas de consultoria, universidades, laboratórios e empresas de construção civil.

² Conforme definido no Manual de Procedimentos para a Verificação do Exercício Profissional, do Conselho Federal de Engenharia e Agronomia - CONFEA, ano 2105, comissionamento consiste na atividade técnica que confere, testa e avalia o funcionamento de máquinas, equipamentos ou instalações, nos seus componentes ou no conjunto, de forma a permitir ou autorizar o seu uso em condições normais de operação.

Têm-se, portanto, a migração de uma abordagem centrada na segurança, onde a incerteza é levada em consideração na aplicação de fatores de segurança e na adoção de valores conservadores para as variáveis de resistência, para uma perspectiva orientada para o risco, na qual ações, desempenho e consequências devem ser tratadas de forma integrada. Uma comparação entre essas abordagens pode ser verificada na Figura 1.1.



Figura 1.1: Perspectivas de (a) uma sociedade orientada para a segurança e (b) uma sociedade orientada para o risco. Fonte: Adaptado de Vianna *et al.*, 2015 [7].

O reconhecimento de que a existência de um risco residual associado às barragens e que a segurança, como um valor absoluto, é inatingível, não significa, contudo, dizer que a abordagem centrada na segurança constitua necessariamente uma premissa equivocada, pois, como aponta Rettmeier *et al.* [8], as barragens são, tradicionalmente, consideradas seguras, em virtude de serem construídas de acordo com elevados padrões técnicos de qualidade. Além disso, não há dúvidas de que a abordagem tradicional também tem sido um meio efetivo de “gestão de risco”, haja vista o histórico de projetos e empreendimentos com bons registros de desempenho [9].

Por sua vez, sem o adequado projeto, construção e manutenção, barragens gerenciadas de modo precário podem causar danos significativos. A consequência da ruína total ou parcial de uma barragem de acumulação, pela quantidade de massa que armazena, traduz-se em uma série de eventos traumáticos, indo de danos materiais e ambientais a perdas humanas, conforme observado adiante, na Tabela 1.2 e na Tabela 1.3 .

A segurança de barragens é constituída por atividades estruturais, como obras de manutenção ou reforço, e atividades não estruturais, que permitam detectar eventos perigosos em tempo hábil, como monitoramento, ou que reduzam o risco através de medidas operativas preventivas. Para essas últimas, verifica-se que a abordagem baseada na avaliação e na gestão dos riscos ainda se encontra em fase de aperfeiçoamento, necessitando

maiores estudos [2]. O que não impede que essa seja considerada por várias organizações como o Comitê Australiano de Grandes Barragens (ANCOLD), o Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), o *US Bureau of Reclamation* (USBR), o *British Columbia Hydro* (BC Hydro) e até mesmo em legislações de países como as da Holanda e África do Sul [10].

No Brasil, o marco regulatório da segurança de barragens deu-se com a promulgação da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens - SNISB [11], como consequência do reconhecimento pela sociedade do elevado nível de problemas de natureza organizacional, responsável pelo estado geral de abandono de centenas de barragens brasileiras, com vulnerabilidades latentes em projetos, construção e operação de estruturas existentes [12].

Esta dissertação enfoca a questão qualitativa da análise de risco (priorização dos riscos para análise ou ação adicional através da avaliação e combinação de sua probabilidade de ocorrência e impacto), uma vez que tem por base os princípios estabelecidos na Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Sob essa ótica, as próximas seções contextualizam o problema da avaliação de desempenho em segurança de barragens, descrevendo fatores motivadores para seu estudo, a definição dos objetivos desejados e um sumário das ações a serem desenvolvidas para consecução desses.

1.1 Motivação

A avaliação da ocorrência de eventos extremos, principalmente em grandes estruturas civis, como é o caso das barragens, é de grande importância em um estudo de análise de risco mais completo, tanto para os gestores quanto para os tomadores de decisões.

Segundo estatísticas, o índice atual de acidentes com barragens é da ordem de 10^{-5} barragens/ano, o que corresponde a um acidente por ano em 100.000 barragens, mas, há algumas décadas, esse índice era de 10^{-4} barragens/ano, ou seja, dez vezes maior [13]. As estatísticas brasileiras relativas aos acidentes com barragens, no entanto, conforme observado no Relatório de Segurança de Barragens da ANA, parecem caminhar no sentido inverso da média mundial.

Cabe estabelecer a distinção existente entre barragens de rejeito e de acumulação de água. Barragens de rejeito são estruturas construídas com terra, enrocamento, rejeitos e até mesmo concreto, para armazenar resíduos de alguns processos industriais, formando um reservatório com substâncias sólidas e água, sob a forma de lama. O armazenamento desses resíduos é necessário para evitarem-se danos ambientais. No caso da mineração, os

resíduos resultam do processo de beneficiamento do minério, quando acontece a separação do produto bruto em concentrado (material rico, com valor econômico) e rejeito (material sem demanda de mercado).

As barragens de rejeitos de mineração têm uma particularidade que as diferencia das barragens para acumulação de água em geral. Enquanto uma barragem, por exemplo, de um aproveitamento hidrelétrico, cuja finalidade é represar e estocar água, matéria-prima para a produção de energia, não sofre alterações significativas ao longo da sua vida operacional, uma barragem de rejeito, à medida que seu volume é preenchido, pode ter seu barramento aumentado para poder conter volumes adicionais de rejeitos.

Esse procedimento é conhecido no jargão técnico como alteamento da barragem. A sequência de alteamentos tem, evidentemente, impacto na segurança da barragem de rejeitos de mineração, o que exige cuidados especiais por parte do empreendedor e supervisão atenta do órgão fiscalizador.

Nesse contexto, identificam-se três processos de alteamento: montante, jusante, e eixo central. Pelo método montante o maciço da barragem faz uso da camada de rejeito seco. Esse método é considerado pouco seguro, já que o maciço em cima de rejeitos pode conter traços de líquidos, tornando a estrutura mais instável e fortemente dependente de um bom sistema de drenagem. No processo jusante o alteamento da barragem é feito sobre o maciço do solo, conferindo à estrutura condições maiores condições de estabilidade e de segurança. O processo de eixo central consiste em uma mescla dos dois métodos.

A Tabela 1.1 apresenta de forma resumida as principais características que diferenciam uma barragem de rejeitos de uma barragem de acumulação de água.

Tabela 1.1: Diferenças entre Barragens de Rejeito e de Acumulação de Água

Aspectos	Barragens de Rejeitos	Barragens de Acumulação de Água
Projeto	Aterro hidráulico com o próprio rejeito bombeado. Diques geralmente de rejeito	Aterro compactado ou concreto
Controle Construtivo	Baixo	Alto
Construção / Operação	Construção em etapas. Alteamentos de barragem durante a operação	Enchimento do reservatório usualmente após a conclusão da barragem
Resistência a Abalos Sísmicos	Baixa	Alta
Suscetibilidade à Liquefação e Piping	Alta	Baixa
Agente do Impacto	Lama	Água

Fonte: Adaptado de ABRAGE, 2019 [14].

No Brasil o rompimento de barragens de rejeitos minerários é o mais recorrente. Conforme Tabela 1.2 verifica-se, somente no estado de Minas Gerais, o rompimento de 6 barragens entre os anos 2000 e 2015. Este número condiz com levantamento realizado por

Milanez [15], o qual indica que ao menos, desde 2001, o estado de Minas Gerais registra em média um acidente envolvendo barragens a cada dois anos. Atualmente Minas Gerais possui cerca de 754 barragens, sendo 317 delas de rejeitos minerários.

Tabela 1.2: Rompimento de Barragens no Estado de Minas Gerais 2000-2015

Local	Ano	Nome	Tipo	Impacto
Itabirito	1986	Barragem de Fernandinho	Barragem de rejeitos minerários.	7 óbitos
Nova Lima	2001	Barragem de Macacos	Barragem de rejeitos minerários.	5 óbitos
Cataguases	2003	Barragem em Cataguases	Barragem de rejeitos industriais.	Contaminação do rio Paraíba do Sul, mortandade de animais e peixes e interrupção do abastecimento de água de 600.000 pessoas.
Miraí	2007	Barragem da Rio Pomba / Cataguases	Barragem de rejeitos minerários.	Mais de 4000 pessoas desabrigadas ou desalojadas.
Itabirito	2014	Barragem da Herculano	Barragem de rejeitos minerários.	3 óbitos.
Mariana	2015	Barragem Fundão	Barragem de rejeitos minerários.	19 óbitos, 8 desaparecidos 600 desabrigados ou desalojados, interrupção do abastecimento de água de milhares de pessoas e poluição do rio São Francisco e do mar no ES, interrupção da atividade pesqueira e afetação ao Turismo em Regência/ES.

Fonte: Adaptado de Alves, 2015 [16].

Fora de Minas Gerais, 4 acidentes de maior porte foram registrados no mesmo período (Tabela 1.3).

Tabela 1.3: Rompimento de Barragens no Brasil 2000-2015

Local	Ano	Nome	Tipo	Impacto
Alagoa Nova (PB)	2004	Camará	Barragem de água.	5 óbitos e aproximadamente 3 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas.
Vilhena (RO)	2008	Apertadinho	Barragem de água para geração de energia.	Danos ambientais variados (assoreamento de rios, erosão do solo, entre outros).
Cocal e Buriti dos Lopes (PI)	2009	Algodões	Barragem de água.	Entre 9 e 24 mortos e aproximadamente 2000 pessoas ficaram desabrigadas ou desalojadas.
Laranjal do Jari (AP)	2014	Santo Antônio do Jari	Barragem de água para geração de energia.	4 óbitos.

Fonte: Adaptado de Alves, 2015 [16].

Como visto, acidentes com barragens não são de exclusividade do setor minerário brasileiro. Menescal [17] afirma que *“até mesmo o setor elétrico, que tem um melhor padrão de controle da segurança, pela sua tradição e pela sustentabilidade financeira de suas usinas, tem apresentado problemas, com uma tendência de agravamento nos próximos anos”*.

Eventos de rupturas em barragens de pequeno porte também trazem consigo consequências desastrosas. Na China, em 1975, o rompimento das barragens de Shimantan e Banquia tiveram como resultado a ruptura cumulativa de mais de 60 pequenas represas a jusante, resultando na morte de 230 mil pessoas. Em 1985, na Itália, a barragem Stava, localizada nas proximidades de Trento, rompeu lançando 180 mil m³ de rejeitos minerais, matando cerca de 268 pessoas e causando sérios danos ambientais [18].

Para Viseu [19], as rupturas de grandes barragens recebem maior atenção do que aquelas de barragens menores. As rupturas de barragens pequenas, construídas em propriedades privadas, ocorrem com maior frequência. Isso porque, como a construção de uma barragem é relativamente cara, seus proprietários tendem torná-la menos onerosa, sacrificando, geralmente, a sua segurança. Em termos de registros históricos, estima-se em 2% a probabilidade de uma pequena barragem romper [20], valor consideravelmente superior ao associado a grandes barragens, atualmente estimado em 0,5% [3].

Conforme disposto na Lei nº 12.334/2010, art. 7º, *as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por Categoria de Risco, por Dano Potencial Associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH*. Essa forma de classificação é necessária para determinação dos procedimentos que devem ser adotados pelos empreendedores ou operadores no âmbito da lei, como a elaboração de planos de segurança, de ações emergenciais e estabelecimento de rotinas de inspeção de segurança.

Por sua vez, a correta classificação dos níveis de comprometimento da estrutura aliada à possibilidade de prevenção e manutenção periódicas, contribuem significativamente para a redução da ocorrência de rupturas em barragens, promovendo maior confiabilidade e, conseqüentemente, maior segurança para populações distribuídas ao longo de sua área de influência.

A classificação também é importante para a priorização de ações por parte dos órgãos reguladores. Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE [21], reguladores em muitos países estão cada vez mais pressionados a fazer “mais com menos”. Enquanto aumentam as demandas por proteger melhor o meio ambiente, a saúde e a segurança dos cidadãos, crises econômicas obrigam os governos a reduzir gastos com a administração pública, incluindo atividades de fiscalização regulatória.

No Brasil, a situação não difere do cenário apresentado pela OCDE. O número de barragens cadastradas chega a 24 mil [22]. Dessas, 13.997 (ou 58%) possuem algum tipo de ato de autorização (outorga, concessão, autorização, licença, entre outros), estando, portanto, regularizadas.

Estima-se, no entanto, que existam no país cerca de 300 mil barragens de todos os tipos e tamanhos [23]. Desse universo cerca de 4.500 submetem-se à Política Nacional de

Segurança de Barragens - PSNB, entendidas, portanto, como sendo estruturas de grande porte ³, estando em sua maioria associadas ao setor de geração de energia hidrelétrica, cuja distribuição de aproveitamentos pode ser observada no mapa da Figura 1.2.

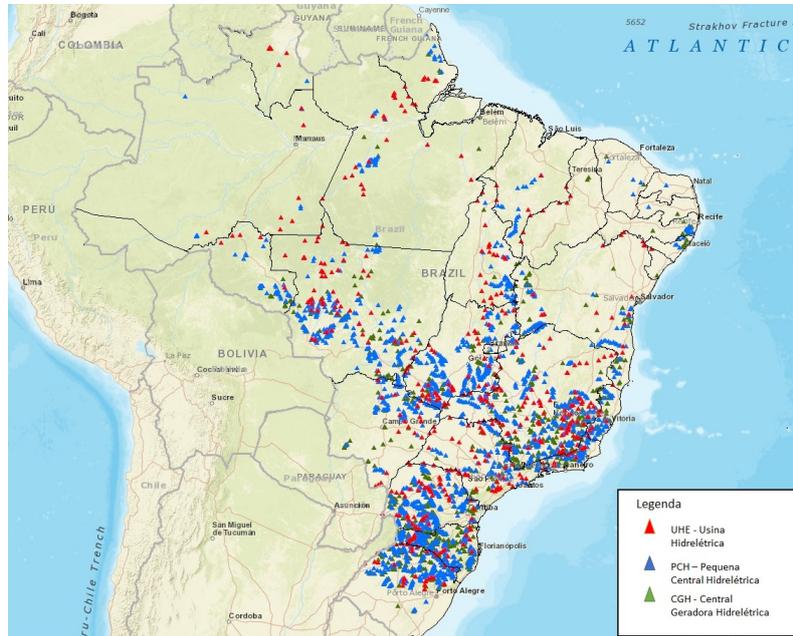


Figura 1.2: Aproveitamentos Hidrelétricos Brasileiros. Fonte: SIGEL/ANEEL, 2019 [24].

Dada a permanente expansão do sistema elétrico, decorrente das necessidades energéticas do país; e a natureza dos aproveitamentos hidrelétricos, que requer a exploração de grandes massas de água, é inevitável que muitas dessas estruturas situem-se cada vez mais distantes dos centros de carga, em sítios remotos ou de difícil acesso. Tal realidade torna inviável a inspeção periódica de todas as instalações para efeito de garantir seu bom desempenho técnico. Observa-se, portanto, um conflito entre a otimização dos recursos e a qualidade da atividade de fiscalização.

O aumento da discussão relativa aos riscos impostos à sociedade pela implantação de reservatórios, associado ao amadurecimento das leis de segurança de barragens e políticas de proteção civil, demanda maior preparo dos proprietários de barragens e das autoridades constituídas.

Nesse contexto a atividade de fiscalização destaca-se como uma das principais fronteiras na interação entre reguladores e regulados. Uma fiscalização inadequada pode trazer

³O Registro Mundial de Barragens, da Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB/ICOLD), considera uma grande barragem a barragem que possua altura de 15 metros (independentemente do volume de água armazenável em seu reservatório) ou também a que possua altura entre 10 e 15 metros desde que tenha capacidade de armazenar mais de três milhões de metros cúbicos de água em seu reservatório. De acordo com esse critério, a altura de uma barragem é determinada pela diferença da elevação de sua crista até o ponto mais baixo da sua fundação. A PSNB vale-se desses critérios para delimitação de seu alcance.

impactos negativos para o ambiente regulatório e, conseqüentemente, para a sociedade. Constitui assim a motivação deste trabalho, desenvolver um modelo de seleção e priorização capaz de orientar, em termos de nível de atuação, as ações de fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, no tocante ao processo de monitoramento de barragens aproveitamento hidrelétrico quanto ao seu grau de segurança. Antes, porém, é necessário contextualizar o ambiente operacional dos eventos que serão analisados.

1.2 Definição do Problema

A regulamentação da Lei nº 12.334/2010 com as especificidades do setor elétrico deu-se por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 696, de 15 de dezembro de 2015 – REN 696/2015. Além de determinar quais serão as barragens enquadradas pelas disposições regulatórias da Agência, em seu Anexo II são apresentados os critérios, parâmetros e pontuações para cada condição ou fator de risco a ser avaliado.

Uma vez que um regulamento tem por princípio ser claro (de fácil entendimento), preciso (não prolixo ou escasso) e ostensivo (de fácil constatação ou percepção), o modelo de classificação de barragens estipulado pela REN 696/2015 - ANEEL, em busca de uma linguagem única, alinha-se aos critérios gerais estabelecidos na Resolução 143/2012 - CNRH [25].

Nesse contexto, foi estabelecida uma estrutura matricial para efeito de classificação de barragens por Categoria de Risco (CRI) e por Dano Potencial Associado (DPA), resumida na Figura 1.3 e detalhada no Anexo II deste documento.



Figura 1.3: Estrutura Matricial para Avaliação de Barragens. Fonte: ANEEL, 2015 [26].

A classificação por CRI leva em conta aspectos estruturais e funcionais da barragem. Tem como objetivo representar, de acordo com os estudos estatísticos de ruptura já existentes, o índice de vulnerabilidade a um acidente do maciço, em termos de suas: (i) Características Técnicas (CT) intrínsecas; (ii) Estado de Conservação (EC) atual de suas estruturas; e (iii) Planos de Segurança (PS) ou documentação e procedimentos de manutenção.

Por sua vez, a classificação em termos de DPA, relaciona-se à consequência a que todas as barragens são niveladas quando se consideram os efeitos a jusante [27], destacando os danos que poderão ser provocados pela cheia induzida pelo rompimento do barramento em cenários distintos de perdas de vidas humanas, impacto ambiental e impacto socioeconômico.

Em cada uma das quatro dimensões que compõem a estrutura matricial, há a descrição dos fatores de risco e suas condições com as respectivas pontuações a atribuir no julgamento de cada barragem. As pontuações obtidas são somadas por critério, com o objetivo de classificar a barragem quanto a CRI e DPA, em alto, médio ou baixo, conforme diagrama da Figura 1.4.



Figura 1.4: Faixas de Classificação de Barragens quanto ao CRI e ao DPA. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2015 [26].

As combinações dos resultados obtidos em termos de CRI e DPA dão origem à classificação final da barragem, conforme estabelecido em Matriz de Classificação específica proposta pelo CNRH e recepcionada pela REN 696/2015 - ANEEL, de acordo com a Figura 1.5.

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	B
Médio	B	C	C
Baixo	B	C	C

Figura 1.5: Matriz para Classificação Final de Barragens. Fonte: ANEEL, 2015 [26].

Trata-se, portanto, de um processo de Análise Qualitativa de Riscos Baseado em Índices que possibilita uma classificação expedita baseada no risco e que emprega conhecimentos específicos de engenharia de barragens. Em termos de segurança de barragens esta abordagem não é considerada inadequada, embora as análises quantitativas sejam mais consistentes por empregarem valores numéricos de probabilidades e consequências.

Os maiores desafios, no entanto, estão relacionados à determinação do Dano Potencial Associado. Até que ponto do vale a jusante se deve olhar buscando-se os impactos para fazer a classificação? Em outras palavras, como definir a área afetada? Deve-se fazer um estudo de rompimento ou deve-se adotar alguma metodologia simplificada para essa análise?

Na visão do setor de energia elétrica a atual classificação qualitativa empregada pela REN 696/2015 - ANEEL é adequada e deve ser utilizada pelos proprietários de barragens. Ao mesmo tempo, entretanto, reconhece-se que o modelo necessita ser melhorado ao passo que novas informações sobre seu uso estejam disponíveis e à medida que o estado da arte do conhecimento sobre o assunto progrida [28].

Ter uma barragem classificada, por sua vez, não garante, por si só, um critério de priorização de ações para sua reabilitação. Isso porque a classificação envolve múltiplos critérios e, em alguns casos, avaliações subjetivas nas quais não se conhece a estatística de ocorrência do evento.

Como fator agravante, de acordo com a Resolução 143/2012 - CNRH, as barragens devem ser classificadas a cada cinco anos pelos órgãos fiscalizadores, valendo-se das informações prestadas pelo próprio empreendedor. Se esse, porém, não apresentá-las, ainda que sobre determinado critério especificado nas portarias, o órgão fiscalizador deve aplicar-lhe a pontuação máxima para todos os critérios ou para os faltantes [29].

A autodeclaração do empreendedor sobre condições de segurança das barragens pressupõe que os órgãos fiscalizadores examinarão a veracidade e pertinência técnica das informações prestadas, de modo a validá-las ou retificá-las. Como discutido, na prática faltam técnicos e técnica para fazê-lo, de modo que a autodeclaração por parte do empreendedor potencializa a ocorrência de assimetria de informação.

A assimetria de informação é uma falha de mercado que ocorre quando as informações de conhecimento do agente regulado não são observadas ou detectadas pelo órgão regulador ou estão disponíveis em quantidade e qualidade insuficientes para uma regulação eficiente. Refere-se, portanto, à desigualdade de acesso de diferentes atores a uma mesma informação. Nesse sentido, a informação é considerada um capital precioso que agrega valor à tomada de decisão, atuando como garantia da continuidade dos serviços e a minimização da exposição do negócio aos riscos associados. No caso das barragens, contribuindo para a prevenção ou minimização de danos decorrentes de potenciais rupturas.

Outro fator relevante na teoria da informação assimétrica é a questão da incerteza, ou seja, não há como prever as formas de contingências que podem ocorrer ao longo do tempo, sendo necessárias adaptações [30]. Partindo-se dessa premissa os maiores desafios estão relacionados à determinação do Dano Potencial Associado. Até que ponto do vale a jusante se deve olhar buscando-se os impactos para fazer a classificação? Em outras palavras, como definir a área afetada? Deve-se fazer um estudo de rompimento (*dam break*) ou deve-se adotar alguma metodologia simplificada para essa análise?

O propósito dos programas de segurança de barragens é reconhecer os perigos potenciais oferecidos pelas estruturas e reduzi-los a níveis aceitáveis [31]. Sob essa ótica a adoção de abordagens orientadas para o risco, que tratem ações, desempenho e consequências de forma integrada, torna-se necessária.

Segurança de barragens envolve a identificação de fatores de risco a monitorar. Segundo Pedrosa [32], as principais causas de rompimento de barragens são causadas por problemas na fundação, capacidade inadequada dos vertedouros, instabilidade dos taludes, falta de controle de erosões, deficiência no controle e inspeção pós-operação e falta de procedimentos de segurança ao longo da vida útil da estrutura. Para Peck (1984, *apud* Martini 2018) [33], a maior parte das rupturas de barragens ocorrem não por deficiências no estado da arte atual, mas sim por negligências, falta de comunicação entre o executor da obra e o projetista ou por previsões muito otimistas das condições geológicas da região.

Controlar o risco é portanto um desafio para os sistemas de gestão em virtude da combinação de fatores técnicos, ambientais e operacionais. Obriga os reguladores a considerar adequadamente a natureza da empresa e todos os fatores externos que afetam os riscos que essas oferecem para os resultados regulatórios. Com base nessas informações é possível direcionar os recursos no sentido de obter um resultado mais efetivo, ao passo em que reduzem seus custos administrativos.

Nesse sentido, destaca-se a questão da classificação do risco. Para este tipo de problema, classifica-se o risco associado a um evento genérico em classes distintas. A Figura 1.6 ilustra um problema desta natureza: classificar o risco associado a um evento X em uma dentre n classes distintas.

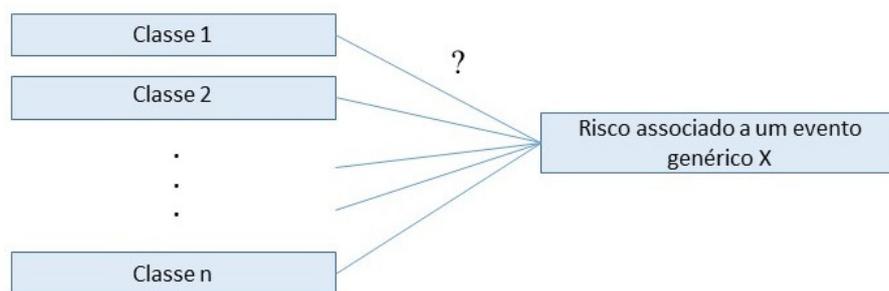


Figura 1.6: Problema da Classificação de Risco. Fonte: Adaptado de Costa *et al.*, 2007 [34].

Assim, pode-se definir a principal questão desta pesquisa: Como um modelo estruturado de suporte ao *Processo de Monitoramento e Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL*, mediante aplicação de abordagem multicriterial, pode auxiliar na seleção e priorização de barramentos conforme padrões de segurança regulatoriamente reconhecidos?

1.2.1 Objetivos

Nesta pesquisa de mestrado pretende-se alcançar os seguintes objetivos geral e específico.

1.2.1.1 Objetivo Geral

É objetivo geral *desenvolver um modelo estruturado de suporte ao Processo de Monitoramento e Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL*, mediante aplicação de abordagem multicriterial, que permita a seleção e priorização de barramentos conforme padrões de segurança regulatoriamente reconhecidos.

1.2.1.2 Objetivos Específicos

Em busca da coerência e qualidade dos resultados pretendidos, como objetivos específicos, esta pesquisa busca:

1. Identificar fatores de risco associados aos padrões de segurança regulatoriamente reconhecidos e às anomalias observadas em barragens;
2. Categorizar quanto à natureza do risco, barragens selecionadas por equipe especialista, mediante associação de Método de Apoio Multicritério à Decisão; e

3. Validar os fatores de risco associados às barragens por intermédio de entrevistas semiestruturadas realizadas com os engenheiros responsáveis pela segurança dessas estruturas.

1.3 Justificativa e Relevância

Os setores em que o Estado dispõe a sua prestação por meio de concessão demandam de monitoramento forte e contínuo, visto que são serviços fundamentais ao país. No exercício de suas atribuições, as agências reguladoras exercem funções típicas do poder Executivo, fiscalizando, regulamentando e controlando atividades consideradas estratégicas para a atividade econômica.

Manifesta-se neste momento o conceito de serviço público adequado o qual, conforme art. 6º § 1º da Lei nº 8.987/95, ou Lei das Concessões de Serviços Públicos e de Obras Públicas [35], é aquele que satisfaz as condições de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas. Pode-se perceber que o referido artigo menciona todos os princípios norteadores da correta aplicação do serviço público.

Por tutelar serviços de natureza pública, a ANEEL têm o dever de zelar pelo bom funcionamento desses, atuando como instrumentos de proteção e segurança focados no bem estar social, resguardando dessa forma serviços que pertencem à sociedade.

A segurança nada mais é do que a minimização de riscos que por ventura a prestação dos serviços possa impor aos usuários [36]. Sua importância fica mais evidente em atividades na qual o risco é intrinsecamente elevado. No contexto brasileiro, as barragens estão envelhecendo, o que favorece o surgimento de comportamentos deficientes por parte dessas estruturas, reforçando assim a necessidade de cuidados com relação à sua segurança.

Adicionalmente a proliferação de barragens aliada a um crescimento populacional sujeito a uma política habitacional pouco efetiva, leva as populações mais desassistidas a ocupar áreas inundáveis a jusante, criando um potencial de risco inaceitável de perdas humanas e bens materiais. A ocorrência de acidentes recentes no Brasil, demonstra que tanto os empreendedores quanto o poder público precisam atuar de maneira mais efetiva nesta questão.

A primeira resposta nesses casos, em atendimento aos anseios da sociedade ante tais adversidades, consiste no aumento do número de fiscalizações e de sanções impostas aos agentes regulados. Entretanto, estudos comparativos têm mostrado que um grande número de inspeções não garante a conformidade regulatória e muitas sanções não necessariamente salvaguardam o público [21]

Diante disso, a bem do interesse público e com base na legislação vigente, as superintendências de fiscalização, alinhadas a diretrizes da Diretoria Colegiada da ANEEL, vêm trabalhando na reestruturação de suas atividades, com o intuito de dotar a fiscalização de ações preventivas⁴ e de monitoramento contínuo da qualidade dos serviços prestados.

Nesse sentido, em 2015, iniciou-se o Projeto Fiscalização Estratégica, baseado em técnicas de fiscalização regulatória apresentadas pela OCDE [21], que integram um conjunto de documentos com foco na disseminação de princípios de boas práticas para as políticas de regulação.

Dentre os modelos de diferenciação de risco regulatório⁵, adotou-se o conceito de fiscalização responsiva⁶, o qual sugere que ações de fiscalização devem variar de acordo com o risco e, sobretudo, de acordo com o comportamento do agente regulado [40, p. 105-133]. Para incorporação desse conceito foi formulado, em 2015, um modelo de fiscalização em 3 níveis [38] representado na Figura 1.7.

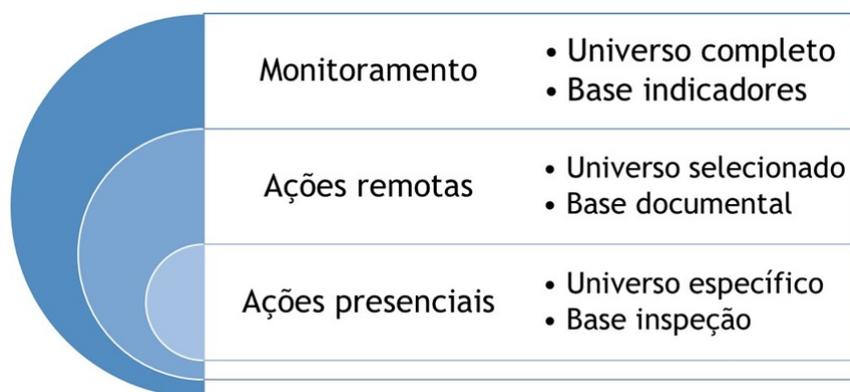


Figura 1.7: Modelo de Fiscalização em 3 Níveis. Fonte: Adaptado de Hirata *et al.*, 2016 [38].

⁴A natureza preventiva da fiscalização tem origem no Decreto nº 2.335/1997, que regulamentou as atividades da Agência. O decreto estabelece que a ação fiscalizadora da ANEEL deva visar, primordialmente, à educação e orientação dos agentes do setor de energia elétrica e à prevenção de condutas violadoras da lei e dos contratos [37].

⁵A diferenciação de risco regulatório é um processo utilizado por entidades reguladoras para avaliar sistematicamente os riscos associados às não conformidades dos entes regulados [38]. Observa-se que o conceito de diferenciação de risco regulatório pode ser confundido com uma simples questão de exercício de “bom-senso” nas ações do regulador. Contudo, a aplicação do conceito não é algo trivial e nem sempre sua essência está presente nas ações do dia-a-dia do regulador [38].

⁶A Regulação Responsiva foi proposta pela primeira vez por Ian Ayres e John Braithwaite no livro *Responsive Regulation: Transcending the Deregulation Debate* [39], em 1992. Consiste na modulação das ações do regulador de acordo com a resposta dos agentes aos comandos regulatórios e com a capacidade e o comprometimento do agente regulado na busca pela conformidade regulatória. Isso significa que não há necessidade da utilização dos mesmos recursos para agentes com diferentes disposições em manter a conformidade regulatória. Agentes que sistematicamente cometem violações são considerados de maior risco e são fiscalizados e punidos com maior frequência. Agentes com histórico de boas práticas de conformidade regulatória são vistos com menor risco e podem ser fiscalizados com menor frequência e receber chances para a melhoria da qualidade dos serviços prestados.

O Primeiro Nível, ou Monitoramento, é o mais abrangente e envolve o universo de todos os agentes de geração de energia. Nesse nível, os agentes são monitorados por meio de indicadores de qualidade e desempenho gerados a partir de dados obtidos por meio de Formulários de AutoDeclaração – FAD dos próprios agentes e de bases de dados de outras instituições integrantes do Setor Elétrico.

O Segundo Nível, ou Ação à Distância, envolve um conjunto menor de usinas, selecionadas por meio da análise de risco realizada no Monitoramento. Este nível contempla uma análise criteriosa dos indicadores, análise documental e solicitação ao agente de informações complementares.

Contudo, em diversos casos é necessária a realização de uma fiscalização presencial, seja pela necessidade de se coletar mais evidências, seja pela necessidade intrínseca da inspeção *in loco* inerente a determinados tipos de fiscalização. Nesses casos, a fiscalização avança para o Terceiro Nível do Modelo que é a Ação Presencial.

Sendo esse modelo de fiscalização atualmente aplicado a todas as plantas de geração de energia sob jurisdição da ANEEL, seja na etapa de implantação de novos empreendimentos, de avaliação de desempenho de usinas existentes ou de avaliação de obrigações regulatórias, como no caso do Processo de Monitoramento e Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens.

Nesse contexto, esta pesquisa é justificada face à necessidade de aprimorar o conhecimento e as técnicas vinculadas ao processo de monitoramento de barragens promovido pela ANEEL de modo a obter-se um resultado mais efetivo, ao passo em que busca reduzir seus custos administrativos.

Tal abordagem, ao fundamentar-se em critérios e metodologias consolidadas, aplicáveis no dia-a-dia da organização, personificada no modelo de fiscalização em 3 níveis, vem permitindo a avaliação sistemática do setor contribuindo para a mitigação de impactos sociais, ambientais e de segurança associados à atividade estudada.

Adicionalmente, a avaliação dos resultados dessa pesquisa pode servir de referência para avaliação da viabilidade de aplicação de intervenções semelhantes em outras áreas e órgãos de fiscalização, ainda que em segmentos diferentes do setor de energia elétrica.

Por fim, a avaliação da intervenção pode subsidiar o Superintendente de Fiscalização dos Serviços de Geração no aprimoramento do desenho do projeto e na adoção de ajustes na implantação que melhorem a efetividade das ações de fiscalização no tocante ao Processo de Monitoramento e Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens.

1.3.1 Estruturação dos Capítulos

A dissertação está organizada em cinco capítulos. O presente capítulo descreve o problema, define os objetivos desta pesquisa e a forma como está organizado o texto.

Estabelecido o marco introdutório, o Capítulo II discorre sobre os aspectos técnicos e regulatórios vinculados ao processo de Segurança de Barragens, bem como apresenta o referencial teórico pertinente à definição de critérios de seleção e escolha de Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA), com ênfase no método ELECTRE TRI e na aplicação de regras *Fuzzy*.

O Capítulo III mostra os procedimentos e métodos utilizados para concepção de um modelo de apoio à decisão em termos de avaliação de segurança de barragens, tendo como referência os critérios estabelecidos pela Lei nº 12.334/2010.

A partir de um estudo de caso, o Capítulo IV apresenta, aplica e discute os resultados do modelo desenvolvido para estabelecimento de um *ranking* de avaliação de barragens quanto a vulnerabilidade das barragens, bem como analisa os demais resultados relacionados aos objetivos específicos desta pesquisa.

Por fim, o Capítulo V traz as conclusões obtidas por meio da execução da pesquisa, bem como propostas de estudos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica e Documental

2.1 Segurança em Barragens: Breve Histórico

Construídas para utilizações diversas dos recursos hídricos, as barragens servem ao homem há milhares de anos, estando sua história intimamente conectada à da humanidade. Suas ruínas são encontradas em locais considerados berços da civilização, tais como Babilônia, Egito, Índia, Pérsia e em países situados no oriente distante [1], conforme Figura 2.1.



Figura 2.1: Mapa das mais importantes barragens romanas (cheio) e pré-romanas (vazado) na zona mediterrânea e no Oriente Próximo. Fonte: Quintela, 1986 [41].

Neste universo, as barragens de *Jawa*, na Jordânia, consistem nas estruturas de repascimento mais antigas já documentadas. Implantadas há cerca de 5.600 anos [42], a 100 km a nordeste de Amã, este agrupamento de cinco pequenas barragens de acumulação era parte integrante de um sistema de abastecimento de água composto por canais e demais estruturas de desvio, projetado para suprir a cidade de *Jawa* [43].

Tão antigo quanto as próprias barragens são os registros de acidentes a elas associadas. Historicamente reconhece-se a ruptura da barragem de *Saad el-Kafara*¹, no Egito, ocorrida há aproximadamente 4.600 anos, retratada na Figura 2.2), como o primeiro acidente neste tipo de estrutura [44].

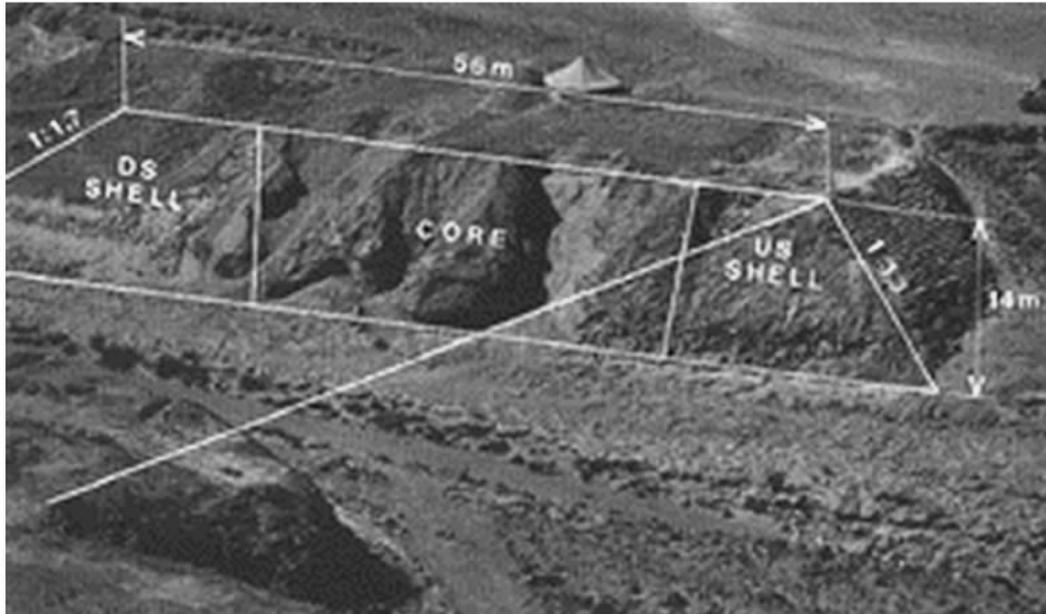


Figura 2.2: Diagrama da barragem *Saad el-Kafara* baseado em foto aérea. Fonte: Schmitter, 1994 [43].

A exemplo de el-Kafara, os primeiros barramentos consistiam em barreiras de terra situadas ao longo de cursos d'água. Adicionalmente seus construtores faziam uso de materiais como solo e pedras. Porém, como as técnicas construtivas eram bastante rudimentares, muitas vezes as estruturas falhavam em sua finalidade por serem facilmente destruídas [31]. Como consequência, surgiram os primeiros marcos legais.

O *Código de Hamurabi*, conjunto de leis criadas na Mesopotâmia, por volta do século XVIII a.C, pelo rei Hamurabi, da primeira dinastia babilônica, é reconhecido como a lei mais antiga que trata sobre o tema segurança de barragens. Em seu corpo são identificadas regras e regulamentos relativos a muitos aspectos da operação de barragens [45], quais sejam:

- Caso haja colapso no dique, o proprietário deve ressarcir todos os danos materiais causados;

¹A barragem de *Saad el-Kafara*, por não dispor de sistema de desvio, foi destruída por transbordamento na fase final de sua construção, cujo tempo de duração foi estimado de 8 a 10 anos. O galgamento originou a formação de uma grande brecha no trecho central do corpo da barragem, sendo possível ainda hoje observar-se os vestígios de seus trechos laterais.

- Caso não tenha recursos para cobrir os danos, o proprietário transfere seus bens e escravos aos atingidos pela inundação;
- Caso as duas condições acima ainda não cobrirem os danos causados, o proprietário torna-se escravo dos atingidos pela inundação.

Até o final do século XIX, as barragens continuaram a desempenhar um papel fundamental no desenvolvimento econômico das nações, na produção de água para uso doméstico, irrigação, para repor perdas em canais de navegação e abastecimento de água, entre outros [46].

Após a Revolução Industrial, estas necessidades permaneceram e se ampliaram como um recurso no combate a enchentes, geração de energia elétrica e para prover recreação [43]. No decorrer do século XX, foram construídas muitas barragens e institucionalizadas diversas normas de segurança.

Incidentes e rupturas de consequências trágicas, ocorridos na Europa e nos Estados Unidos entre as décadas de 50 e 70, a exemplo de: Malpasset, França, 1959; Vajont, Itália, 1963; Baldwin Hills e Teton, Estados Unidos, 1951 e 1976; intensificaram este processo, servindo como motivadores para o desenvolvimento das políticas de segurança de barragens e de vales e dos estudos de ruptura e propagação em seus respectivos países.



Figura 2.3: Ruptura da barragem de Teton. Fonte: Uemura, 2009 [47].

Estas ações possibilitaram um controle mais rigoroso do comportamento das barragens. A gestão de riscos e emergências passou a ser considerada, motivando a elaboração

de Planos de Ações Emergenciais [48]. Até então, o campo da segurança de barragens considerava apenas a segurança das próprias estruturas, sem incluir a hipótese de um provável cenário de acidente, como uma ruptura do barramento.

Mas foi a década de 90 a mais marcante no desenvolvimento desses documentos. Nesse período, vários países europeus promulgaram ou iniciaram estudos de novas regulamentações ou normas técnicas de segurança. No Brasil, o marco regulatório deu-se com a promulgação da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens - SNISB [11].

Dentre os motivos que levaram à aglutinação de esforços para a elaboração e aprovação da Lei nº 12.334/2010, destaca-se o reconhecimento do elevado nível de problemas de natureza organizacional, responsável pelo estado geral de abandono de milhares de barragens brasileiras, com vulnerabilidades latentes em projetos, construção e operação de estruturas existentes [49]. De acordo com Menescal (2009 *apud* PANIAGO, 2018) [49]:

"(...) a importância da atenção do Estado à questão de Segurança de Barragens: "Não só devido à falta de cuidados, mas, também, ao envelhecimento natural das barragens, chegou-se a uma situação que precisa ser de imediato corrigida, sob o risco de causar elevados prejuízos à sociedade e ao patrimônio nacional. Somente com um grande esforço de melhoria da gestão da segurança, as barragens poderão atender às necessidades da população, sem representarem fonte permanente de riscos inaceitáveis. Outro aspecto a ser considerado é que a implantação de um Sistema Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos não se completará sem a elaboração e implementação de um sistema de gestão da segurança de barragens, que garanta sua operação com níveis aceitáveis de risco para a população e para o meio ambiente(...)".

Independentemente dos esforços depreendidos, muito ainda há a ser feito. Conforme destaca Almeida [50]:

O rompimento de barragens no Brasil acontece numa frequência considerada acima do normal, ou seja, entre cada 3 e 4 anos. No período de 15 anos, entre 2000 e 2015, foi registrado o rompimento de 10 barragens, 6 das quais no estado de Minas Gerais. Esse elevado quantitativo indica a necessidade de revisão na eficiência da aplicabilidade da lei de segurança das barragens, visto que não está gerando os retornos esperados e assim ocasiona altos custos, seja para o governo, a sociedade, o meio ambiente ou até mesmo para as empresas responsáveis pela manutenção das barragens.

A necessidade de sensibilização e responsabilização parece, no entanto, não acompanhar a velocidade dos fatos. Pouco mais de 3 anos após o acidente de Mariana, em 25 de janeiro de 2019, registrou-se o rompimento da barragem de na região de Córrego do Feijão, no município brasileiro de Brumadinho, a 65 km de Belo Horizonte, em Minas Gerais. O

rompimento resultou em um desastre de grandes proporções, considerado como um desastre industrial, humanitário e ambiental, com cerca de 246 óbitos e 24 desaparecimentos registrados ², gerando nova calamidade pública.

Segundo registros o desastre pode ainda ser considerado o segundo maior desastre industrial do século e o maior acidente de trabalho do Brasil. Nesta perspectiva, um dos autores do relatório sobre barragem de minério intitulado *Mine Tailings Storage: Safety is no Accident*, publicado pela Organização das Nações Unidas - ONU, o geólogo Alex Cardoso Bastos, afirmou que "*a tragédia em Brumadinho estará, certamente, no topo dos maiores desastres com rompimento de barragem de minério do mundo. Infelizmente, é possível que ultrapasse Stava, que foi a maior tragédia do tipo nos últimos 34 anos*"[51].

O acidente de Brumadinho reacende e reforça perante a sociedade o ainda descaso dado para a gestão de risco em barragens, bem como na promoção e aperfeiçoamento de mecanismos técnicos e regulatórios como no caso da Lei nº 12.334/2010.

2.2 Definição de Risco, Risco Operacional, Incidentes e Acidentes

De acordo com Berstein [52], o termo *risco* é uma derivação do italiano antigo *risicare*, que, por sua vez, deriva do baixo latim *risicu*, *riscu*, que significa ousar.

Na percepção de Cohen [53], risco consiste simplesmente no potencial existente em termos de complicações e problemas relacionados à conclusão de uma tarefa ou à realização de uma meta em um projeto. Uma vez que o risco é inerente a todas as atividades de uma iniciativa (ou projeto) e, como tal, nunca pode ser totalmente eliminado, seus impactos podem ser mitigados para efeito de consecução dos objetivos.

Assaf Neto [54] entende o risco como sendo esse a associação direta das probabilidades do alcance de determinados resultados, em relação a uma determinada expectativa. De forma similar, Vaughan [55] conceitua risco como sendo uma condição na qual existe possibilidade de desvios adversos em relação aos resultados esperados.

Ao propor uma Metodologia para Gerenciamento de Risco tendo como foco a segurança e a continuidade, Calil [56] expõe a dificuldade de consenso quanto à uma definição de risco e aos elementos que o compõem, apresentando um comparativo entre as definições de risco elaboradas por diversos autores, conforme Tabela 2.1.

²Conforme registro da Defesa Civil de Minas Gerais, atualizado em 08/06/2019. Disponível para consulta em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_rumadinho/Documents/PDFs/080620191150.pdf

Tabela 2.1: Comparativo entre algumas definições de risco e os elementos que o compõem

Fontes	Definição de risco proposta pelos autores	Elementos que se podem destacar
Holton (2004)	Definição geral: É a exposição a algo, o qual é incerto.	Algo; exposição e incerteza.
Saldanha (2000)	Definição geral: É a probabilidade de se concretizar um evento.	Evento e incerteza.
ABNT (2009) – ISO/IEC Guia 73	Definição geral: Combinação da probabilidade de um evento e de suas consequências.	Evento, consequências e incerteza.
Kumamoto & Henley (1996)	Definição geral: É a combinação de cinco fatores: o resultado; a chance; a significância (ou a utilidade, que é seu oposto); o cenário causal (como aconteceu); e a população afetada.	Resultado; significância; cenário causal; população e incerteza.
PMI (2000) – PMBOK	Para projetos: É um evento ou uma condição incerta, que, se ocorrer, tem efeito positivo ou negativo nos objetivos do projeto.	– Evento (ou condição); consequências e incerteza.
NPR 7120.5	Para projetos: É a combinação de (1) a probabilidade de um projeto (ou programa) ser atingido por um evento indesejado, como sobrecustos, deslizos no cronograma, etc.; (2) as consequências, impacto, ou severidade do evento indesejado, quando ele ocorrer.	– Evento (ou condição); consequências e incerteza
NASA (1997) – STD-8719.13A.	Para segurança: É a exposição à probabilidade de ferimento ou perdas. É uma função da possível frequência do evento indesejado ocorrer; da potencial severidade das consequências; e da incerteza associada com a frequência e a severidade.	Evento; consequências; incerteza e metaincerteza (incerteza na avaliação da incerteza).
Brasil (2004) – NR 10	Para segurança humana: É “a capacidade de uma grandeza com potencial para causar lesões ou danos à saúde das pessoas” Brasil (2004, p. 15).	Capacidade; consequências e incerteza.
Bühlmann (1970)	Para questões de seguro: É uma relação entre a probabilidade de um determinado prêmio, num intervalo de tempo, e a soma da quantia que pode ser reivindicada, isto é: o que se poderá receber (num período de tempo) relativo ao que se poderá ter que pagar.	Duas variáveis estocásticas: – P_t (Prêmio, num intervalo de tempo) e S_t (Soma da quantia reivindicada).
DRJ / DRI (2005) – Glossário	Para recuperação de desastres: Potencial para exposição a perdas. O potencial é usualmente medido pela probabilidade – em anos	Consequências; exposição e incerteza.
Castro et al.(2005) – Manual de defesa Civil do Ministério da Integração Nacional	Para recuperação de desastres: É a “medida de danos e prejuízos potenciais, expressa em termos de: (1) probabilidade estatística de ocorrência; (2) intensidade ou grandeza das consequências possíveis. Relação existente entre: (1) a probabilidade estatística de que uma ameaça de evento adverso ou de acidente determinado se concretize com uma magnitude definida; (2) o grau de vulnerabilidade do sistema receptor e seus efeitos.”	Evento (ameaça); vulnerabilidade; consequências e incerteza.

Fonte: Adaptado de Calil, 2009 [56].

Outras definições de risco estão disponíveis na literatura, indo das mais generalistas

como “*uma barreira para o sucesso*” [57], às mais específicas do tipo “*a exposição à possibilidade de perda ou ganho econômico ou financeiro, dano físico ou prejuízo, ou atraso, como consequência da incerteza associada à busca de um determinado curso de ação*” [58].

Depreende-se que o conceito de risco está associado à incerteza de um resultado e, como visto, a depender do enfoque é possível conferir a esse diferentes abordagens. É oportuno observar, conforme entendimento de Morand (2005 *apud* CALIL, 2009) [56], que o risco é inerente a qualquer iniciativa, e nossa cultura aceita o risco como o motor propulsor do progresso. O risco, portanto, deve ser reconhecido como onipresente e considerado um parâmetro do cotidiano em qualquer atividade humana.

No que concerne à segurança de barragens, estamos a tratar de um risco de ordem operacional³, tecnológica, usualmente atribuído como as consequências esperadas associadas à ocorrência de um evento adverso.

O risco operacional está associado ao risco resultante da execução dos processos de negócio de uma empresa. Trata-se de um conceito amplo, que pode incluir muitos riscos diferentes que colocam em causa a normal execução do negócio. Sua administração concentra-se na prevenção, controle e mitigação de eventos que impliquem perdas.

A exemplo do conceito de risco, não existe uma definição única para risco operacional. Uma que se ajusta aos nossos propósitos é fornecida pelo *Deutsch Bank* [60]. Na percepção da organização, risco operacional é explicado como: “*(...) a potencial ocorrência de falhas relacionadas a pessoas, a especificações contratuais e documentações, à tecnologia, à infraestrutura e desastres, a projetos, a influências externas e relações com clientes*”.

Em Segurança de Barragens os termos “incidente” e “acidente” são utilizados de modo recorrente e basicamente diferenciam-se pela magnitude do problema, o que, a exemplo dos conceitos discutidos anteriormente, de certa forma tem caráter subjetivo, causando certa confusão.

Vieira [61] desmembra estes conceitos de forma mais conveniente definindo acidente como um evento de grande porte correspondente à ruptura parcial ou total de obra e/ou a sua completa disfuncionalidade, com graves consequências econômicas e sociais e incidente é um “*evento físico indesejável, de pequeno porte, que prejudica funcionalidade e/ou a inteireza da obra, podendo vir a gerar eventuais acidentes, se não corrigido a tempo*”.

A ICOLD utiliza o termo “*deterioração*” (*deterioration*) para expressar tanto acidentes como incidentes. Muitos autores por considerarem este um termo de caráter restritivo,

³Na Lei nº 12.334/2010, não há uma definição formal de risco, assim como na Resolução 143/2012 - CNRH e na REN 696/2015 - ANEEL. No entanto a grandeza do risco pode ser inferida partindo-se do pressuposto que os dois fatores CRI e DPA, de certa forma, traduzem o par de valores probabilidade e consequência. Contudo, essa é uma visão que se apoia em deduções e hipóteses que surgem da ausência de uma clara definição de risco. Esse aspecto demonstra uma fragilidade da classificação por categoria de risco, já que o resultado do risco emitido pela classificação (Baixo, Médio ou Alto) não se fundamenta na dimensão das consequências [59].

voltado apenas para o registro de aspectos estruturais, preferem ignorá-lo e, quando possível, adotam a palavra “*anomalia*”, a qual entendem ser aplicável não somente a aspectos estruturais, mas também a fatores não estruturais e abstratos.

A expressão anomalia também é adotada pela REN 696/2015 - ANEEL, sendo definida, em seu artigo V, como: “*deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa a vir a afetar a segurança da barragem*”.

Seguindo a linha e técnicas da norma legislativa, a Resolução CNRH nº 144/2012 [62] inicia com as seguintes definições de acidente e incidente:

- a. Acidente: comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou estrutura anexa;
- b. Incidente: qualquer ocorrência que afete o comportamento da barragem ou estrutura anexa que, se não for controlada, pode causar um acidente.

Uma vez delimitados esses conceitos, a próxima seção discute os riscos aos quais estão expostas as barragens.

2.3 Avaliação de Riscos em Barragens

Em engenharia, os riscos estão basicamente associados à resistência dos materiais, à estabilidade das estruturas e ao desempenho de máquinas, equipamentos e instalações [63], quer sob o ponto de vista operacional, quer sob o ponto de vista do atingimento dos objetivos pré-estabelecidos, sejam eles econômicos, sociais ou ambientais.

Um conceito que ultimamente vem sendo considerado como o mais completo para o controle da segurança de barragens é o chamado Sistema Integrado de Segurança [2, 64], que distingue a questão sobre três pilares:

1. Técnico-Operacional (T-O);
2. Monitoramento-Vigilância (M-V); e
3. Gestão de Riscos / Emergência (G-E).

Cada pilar deve ser entendido como condição necessária para a segurança, mas não suficiente [2]. Sendo, portanto, dimensões complementares e não excludentes, que, em conjunto, mantém a barragem segura durante as diversas fases de vida, conforme ilustrado na Figura 2.4.



Figura 2.4: Sistema Integrado de Segurança de Barragens. Fonte: Perini, 2009 [2].

Os dois primeiros componentes do Sistema Integrado de Segurança fazem parte das medidas tradicionais do sistema de segurança, sendo o Técnico-Operacional responsável pelo controle da segurança estrutural, hidráulica e operacional, e o Monitoramento-Vigilância pelo monitoramento, inspeção, detecção e análise da obra. Já o de Gestão de Riscos / Emergência compreende a implementação e preparação de todas as medidas e procedimentos necessários para o controle dos riscos e para dar uma resposta aos eventuais acidentes que possam ocorrer numa barragem, com o objetivo de antecipar a detecção de crises e falhas [2, 64].

Com uma abordagem similar, Biedermann [65] 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 2.5.

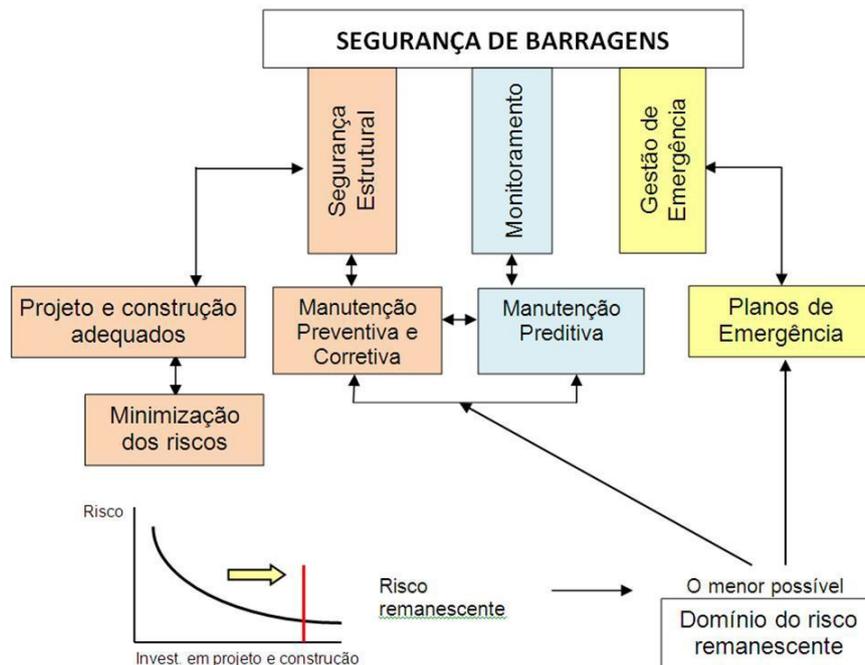


Figura 2.5: Controle de Riscos em Barragens. Fonte: Adaptado de Biedermann, 1997 [65].

Nas fases de projeto e construção, devem ser feitos investimentos de forma que os riscos associados a cada estrutura civil sejam minimizados. Todavia, mesmo sendo o projeto e construção adequados, existe um risco remanescente a ser controlado através de um processo de acompanhamento e avaliação permanentes do desempenho das estruturas. Este processo é usualmente denominado de auscultação de barragens, e engloba as atividades de observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que possam aumentar o potencial de risco de uma estrutura [66].

As ações de monitoramento serão pouco efetivas se, quando detectadas necessidades de manutenção (reparo ou melhorias), estas não forem realizadas em tempo hábil. O terceiro pilar da segurança, a gestão de emergências, assume que a segurança só pode ser garantida por meio da adoção de medidas integradas de gerenciamento de risco por meio das partes interessadas pelo sistema, a saber: Responsáveis pela Barragem, Instituições Reguladoras e Público.

2.4 Gestão de Risco Aplicada a Barragens

Na percepção de Vaughan [55], gerenciamento de risco é uma abordagem científica para lidar com os riscos puros, de maneira a antecipar possíveis perdas acidentais e implementar procedimentos que minimizem a ocorrência da perda. Não tem por objetivo eliminar todos os riscos, mas tornar mais eficiente o uso dos recursos disponíveis, incorporando no processo de decisão, uma otimização do comportamento perante os riscos.

Hartford e Baecher [67] defendem o uso do processo de gestão baseado no risco como uma melhoria na prática tradicional da gestão da segurança de barragens, na qual os três componentes fundamentais - monitoramento, revisões periódicas de segurança e procedimentos de manutenção e operação - são as atividades centrais do processo.

No campo da engenharia de barragens, a gestão de risco pode ser entendida como um processo gerencial sistemático composto pelas seguintes etapas:

1. Avaliação de risco;
2. Análises de risco;
3. Apreciação de risco; e
4. Controle de risco.

Onde os três primeiros estágios, muitas vezes, são tratados de forma conjunta, recebendo a denominação de Análise de Risco em Barragens. Conforme Pinto [68]:

“Por análise de riscos entende-se o conjunto de procedimentos referentes à identificação dos acontecimentos indesejáveis, que conduzem à materialização dos riscos, à análise dos mecanismos que desencadeiam esses acontecimentos e à determinação das respostas das estruturas e das respectivas consequências (estimativa da extensão, da amplitude e da probabilidade da ocorrência de perdas)”.

De forma similar, Pimenta [69] define gestão de riscos como o desenvolvimento integrado das atividades de análise de riscos e de controle de risco. No controle de risco são elencadas como medidas cabíveis: mitigação, prevenção, detecção, planejamento de emergência, revisão e comunicação do risco, conforme esquema da Figura 2.6.

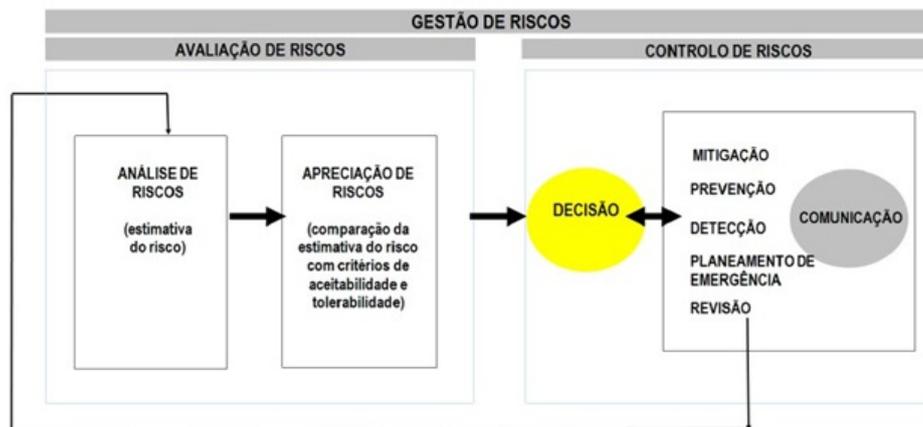


Figura 2.6: Atividades fundamentais da gestão de risco. Fonte: Pimenta, 2009 [69].

O autor ainda destaca a natureza multidisciplinar das atividades, que extrapolam as áreas técnico-científicas das análises de risco, destacando áreas como a política, a social e econômico-financeira. Com relação ao processo de decisão, alguns autores, como a Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens - CNPGB [70] e Bowles [71], entendem que a decisão não é de exclusividade da atividade de controle de risco, estando na fronteira entre a avaliação e o controle.

Por fim Kreuzer [72] e Menescal [23] ao desenvolverem seus estudos vinculados à segurança de barragens, apresentam como atividades fundamentais do gerenciamento de risco o seguinte arranjo, de acordo com o diagrama da Figura 2.7.

Em todos os casos consensa-se a Gestão de Riscos como um procedimento iterativo, subdividido em etapas, cuja realização resulta num ciclo que proporciona um aprimoramento contínuo das tomadas de decisão, promovendo um incremento permanente de desempenho. Adicionalmente, Perini [2] faz uma ressalva quanto a necessidade do correto estabelecimento do contexto como elemento fundamental para o sucesso e a eficiência da gestão.

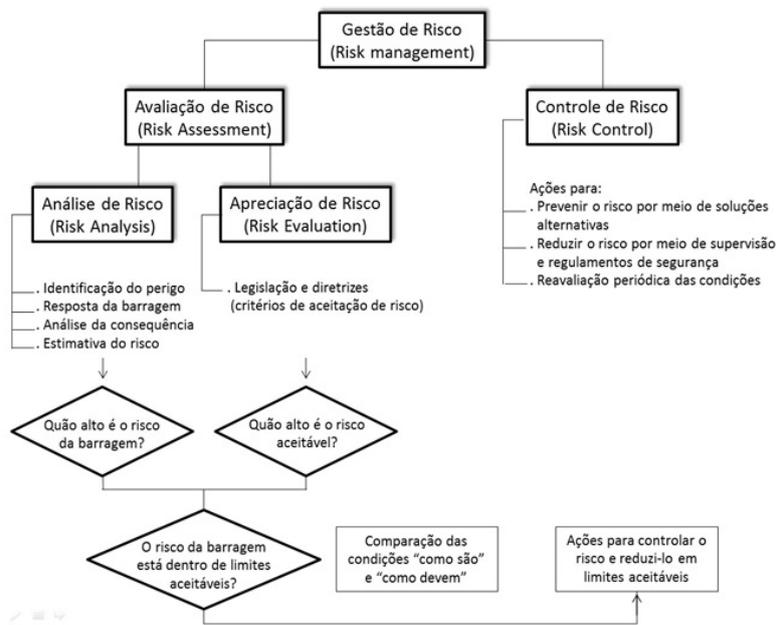


Figura 2.7: Gerenciamento do Risco em Barragens. Fonte: Adaptado de Menescal *et al.*, 2001 [73].

O contexto do Processo de Gestão de Riscos delimita o escopo no que se refere à abrangência das partes da organização envolvidas e aos critérios gerais para as atividades da gestão de riscos. De acordo com a ABNT NBR ISO 31000:2018 o estabelecimento do contexto define os parâmetros básicos para a gestão de riscos e define o escopo e os critérios para o resto do processo [74, 75]. Além disso, convém que a organização, durante esta etapa, defina os critérios a serem utilizados para avaliar a significância dos riscos.

Os modelos previamente discutidos encontram amparo na teoria dos sistemas, a exemplo do método *bow-tie* de gerenciamento de riscos, exibido na Figura 2.8, adotado pela CNPGB [70].

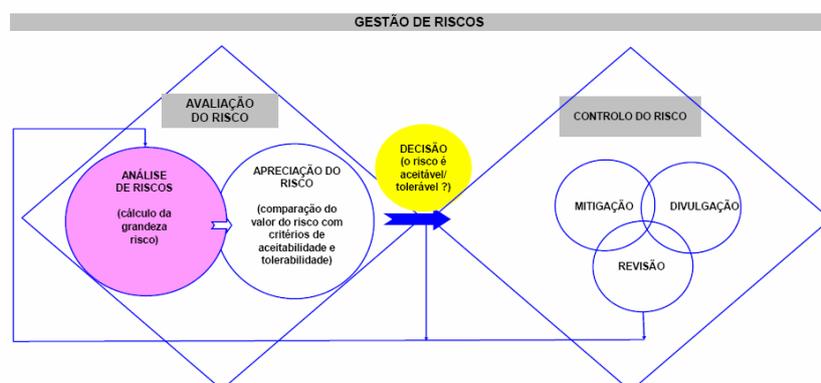


Figura 2.8: Etapas Fundamentais da Gestão de Risco em Barragens conforme a CNPGB. Fonte: Gomes, 2005 [70].

A funcionalidade do método *bow-tie*⁴ é vislumbrada na Figura 2.9 a partir no modelo proposto por Mosieh [76], no qual o incidente é resultado de uma condição perigosa aliada a um evento deflagrador, atravessando as barreiras.

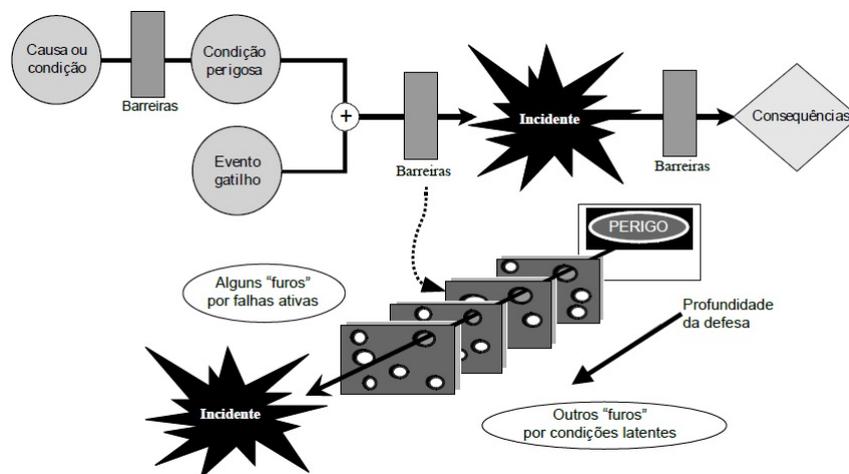


Figura 2.9: Desencadeamento de um incidente e sua trajetória através de barreiras. Fonte: Mosieh, 2004 [76], adaptado de Reason, 1997 [77].

De acordo com o modelo, a diminuição da probabilidade de ocorrência de um incidente dá-se por meio da implementação de barreiras ao longo da corrente causal. Tais barreiras podem ser físicas, procedimentos, manuais, educação, capacitação, motivação ou qualquer medida que vise atuar na causa evitando o incidente ou minimizando suas consequências [56].

2.4.1 Avaliação de Riscos

Uma vez definido o contexto em que se dará a gestão e os critérios de referência, o próximo passo é a avaliação dos riscos. A avaliação de risco pode ser definida como o processo de tomada de decisão se os riscos são toleráveis e as medidas de controle são adequadas e, caso contrário, se as medidas de alternativas de controle do risco são justificadas ou serão implementadas [78]. Tem por objetivo apoiar o gerenciamento de risco, incluindo alternativas de controle. Dentre seus benefícios destacam-se:

- Obtenção da resposta se a barragem pode ou não ser seguramente operada e sob que condições;
- Melhoria no conhecimento das barragens, subsistemas, componentes, riscos associados, modo de falha e consequências;

⁴O método *bow-tie* ou gravata borboleta, é considerado uma evolução do diagrama de causa e efeito. Consiste em identificar e analisar os possíveis caminhos de um evento de risco, dado que um problema pode estar relacionado a diversas causas e consequências.

- Comparação da segurança relativa de barragens baseada em métodos consistentes e informações objetivas;
- Identificação de alternativas para administrar um risco, incluindo monitoramento e outras medidas não estruturais; e
- Comparação do risco das barragens com os riscos de outros segmentos (indústrias)

Como limitações tem-se:

- Dificuldades e incertezas associadas à estimativa das consequências, que envolvem perda de vidas, danos ambientais, perdas monetárias; e
- Falta de uma metodologia largamente reconhecida e aceita para determinar a tolerabilidade do risco.

2.4.2 Análise de risco

A análise de riscos se baseia no uso da informação disponível para estimar o risco relativo a indivíduos ou populações, a propriedades ou ambientes, decorrentes de condições de perigo. Ela envolve a desagregação ou decomposição do sistema da barragem e fontes de riscos nas suas partes fundamentais [78].

Um dos elementos que fazem da engenharia de barragem uma ciência de certa dificuldade são as incertezas decorrentes das limitações dos modelos e do entendimento da performance física das barragens, presentes em etapas diversas do projeto, construção e operação da estrutura. A Tabela 2.2 elaborada por Kreuzer (2000 *apud* FONTENELLE, 2007) [79] apresenta as principais fontes/tipos, exemplos de origem e forma de tratamento de incertezas.

Tabela 2.2: Tipos de Incerteza: Origem e Forma de Tratamento

Fonte/Tipo	Exemplo de Origem	Tratamento Analítico
Física	Conhecimento limitado da geologia, hidrologia, comportamento estrutural.	Simulação Monte Carlo
Estatística	Amostragem	Desvio padrão, erro médio, limites de confiança
Epistêmica	Simplificação de modelos matemáticos	Simulação Monte Carlo, Teorema de Bayes, Árvore de eventos
Decisão	Visão humana subjetiva de um estado oculto	Árvore de eventos, Teorema de Bayes
Predição	Eventos futuros incertos	Árvore de eventos, Teorema de Bayes
Reação Pública	Falta de confiança ou impossibilidade de transferência	Comunicação
Erro Humano	Ignorância, negligência, subestimação da influência, falta de experiência e treinamento, falta de autoridade para decidir, falta de habilidade para comunicar	Teoria do erro grosseiro

Fonte: Kreuzer, 2000 [72].

Segundo a norma australiana AS/NZS 4360:2004 [80], tão importante quanto obter um valor numérico, a análise de risco deve proporcionar ao avaliador o aprimoramento do entendimento sobre o risco, permitindo que, durante o processo de tomada de decisões, não só seja decidido se o risco deve ou não ser tratado, mas também a forma mais apropriada, com uma estratégia tal que permita obter a melhor relação custo-eficiência.

Tendo em vista a necessidade de classificar e quantificar os riscos a Resolução CNRH nº 143/2012 apresenta critérios qualitativos para a classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório. A Resolução CNRH nº 143/2012 considera risco como a possibilidade de ocorrência de acidente. Sua formulação, no entanto, diverge do formalmente definido e encontrado na literatura, estando restrito às características técnicas e de conservação da barragem e de suas estruturas associadas [81].

2.4.3 Apreciação de risco

A atividade de apreciação de risco trabalha com a definição de critérios de aceitabilidade e tolerabilidade dos riscos [69], constituindo um tema polêmico no âmbito da gestão de riscos [78] ao transcender o ambiente da engenharia, integrando a esse interesses políticos, sociais, econômicos e legais. Conforme destaca Perini [2], critérios de Apreciação dos Riscos são na verdade julgamentos de valor e, portanto, de caráter não técnico.

Para estabelecer os critérios de tolerância é necessário conhecer o risco individual e o risco societal gerados pelo empreendimento. O risco individual equivale ao incremento de risco gerado pela existência desse novo empreendimento. No caso de barragens, esse incremento é o aumento do risco de morte, com o qual o indivíduo conviverá por ser diretamente afetado pelas consequências que uma eventual ruptura da barragem poderá causar [9, 78].

Já o risco societal é aquele que assume consequências de grande escala e implicam em uma resposta do meio social e político, por meio de discussões públicas e mecanismos de regulação. O risco societal é tipicamente distribuído de maneira desigual, assim como os seus respectivos benefícios [9, 78].

A Figura 2.10 demonstra os princípios de aceitabilidade e tolerabilidade. Na parte superior situam-se os riscos considerados inaceitáveis, que independem do benefício associado à atividade. Na base, têm-se os riscos de natureza aceitável, considerados baixos, sem maior relevância e controláveis. Na região intermediária encontram-se os riscos toleráveis, referentes às atividades para as quais a população admite tolerância em troca da garantia de benefícios.

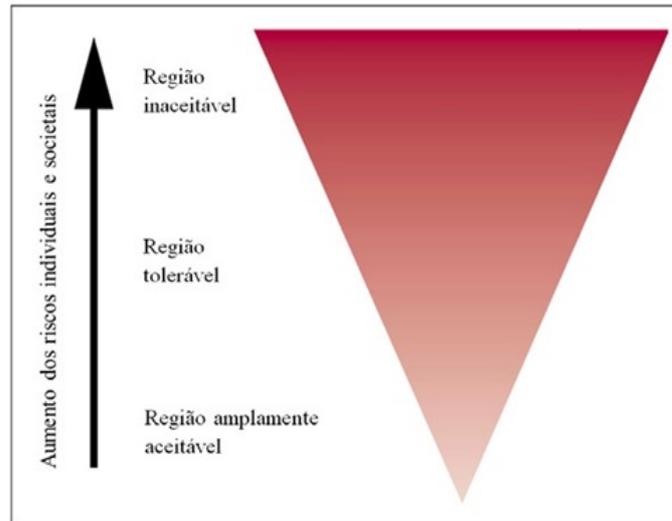


Figura 2.10: Princípios de aceitabilidade e tolerabilidade. Fonte: Adaptado de Vaz, 2014 [78].

Bowles (2007 *apud* PERINI, 2009) [2] identifica três diretrizes como as mais difundidas dentre as que apresentam limites de tolerabilidade a riscos e com aplicabilidade em segurança de barragens: *UK HSE Tolerability of Risk Guidelines*, *ANCOLD Guidelines on Risk Assessment* e *USBR Public Protection Guideline*. Todas têm como fundamento os chamados critérios puros de apreciação:

- **Equidade** - Premissa de que todos os indivíduos têm direitos incondicionais a certos níveis de proteção;
- **Utilidade** - Comparação entre o benefício incremental das medidas adotadas para prevenir o risco e o custo da medida; e
- **Tecnologia** - Ideia de que um nível satisfatório de prevenção do risco é atingido quando o estado da arte das medidas de controle corresponde efetivamente àquelas aplicadas para controlar os riscos, quaisquer que sejam as circunstâncias.

2.4.4 Controle de risco

O controle de risco encerra um conjunto de atividades integradas, englobando ações de decisão, redução, prevenção, detecção, planos de emergência, revisão e comunicação de riscos [69]. A ICOLD [9] propõe o agrupamento das opções de controle de risco com base nas seguintes categorias:

- Evitar (eliminar) o risco;
- Reduzir a probabilidade de ocorrência;

- Reduzir as consequências;
- Transferir o risco; e
- Conservar (tolerar ou aceitar) os riscos (residuais).

Vaz [78] destaca que as três primeiras opções minimizam os riscos em que terceiros são expostos, enquanto que a quarta e a quinta opção não se aplicam para o caso de barragens.

Caldeira [82] propõe uma análise de risco dividida em riscos quantitativos e qualitativos. No presente trabalho, será realizada uma análise qualitativa de riscos.

2.5 Riscos Associados a Barragens

As barragens, assim como outras estruturas de engenharia, estão sujeitas a incidentes e acidentes. Conforme expõe Piasentin [83, 84], os incidentes de barragens decorrem do desenvolvimento de comportamentos anômalos ou inesperados em tais estruturas.

Incidentes são entendidos como o resultado de processos defeituosos envolvendo interação entre os componentes dos sistemas envolvidos, incluindo: pessoas, estrutura organizacional e social, atividades de engenharia e componentes físicos [56].

Anomalias, por sua vez, podem apresentar diversos sintomas, que raramente podem ter uma única causa, mas que geralmente podem ter diversas causas que ocorrem em simultâneo ou em sequência com a acumulação de efeitos no tempo.

Essas causas ou anomalias, identificadas como fatores de risco, de modo geral são sistematizadas em aspectos relativos ao homem, ao ambiente e à máquina (ou ao sistema técnico, em uma visão mais abrangente), conforme ilustrado na Figura 2.11.

Teorias que consideram mais de uma causa são denominadas multicausais⁵. Com base nessa abordagem, Melo e Fusaro [59], classificam os riscos de barragens em fatores ambientais (ambiente), internos (sistema técnico) e socioeconômicos (homem), conforme Tabela 2.3.

Do ponto de vista da identificação das causas mais comuns de rupturas de barragens, alguns levantamentos estatísticos devem ser considerados. Em 2013, a *Federal Emergency Management Agency - FEMA*, agência do governo norte americano subordinada ao Departamento de Segurança Interna, publicou um levantamento dos principais acidentes ocorridos nas barragens de seu país, entre anos de 1975 e 2011, cujos resultados podem ser observados na Tabela 2.4:

⁵As teorias multicausais consolidaram-se na década de 60, quando as teorias monocausais demonstraram-se insuficientes para explicar a ocorrência de acidentes de trabalho, de forma a permitir a identificação de ações que evitassem ou reduzissem a chance de reincidência de um acidente, ou a mitigação de suas consequências [56].

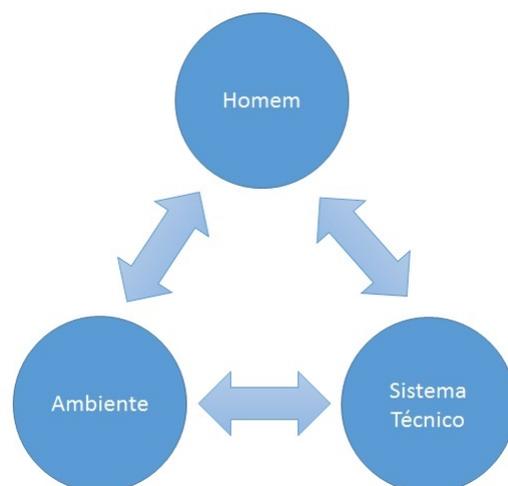


Figura 2.11: Relação entre os envolvidos no sistema da teoria multicausal da ocorrência de incidentes. Fonte: Adaptado de Calil, 2009 [56].

Sandroni [86] comparou os resultados de quatro importantes estudos sobre as causas do rompimento em barragens de terra e de enrocamento resumindo as causas observadas e sua frequência de ocorrência na Tabela 2.5.

A partir desse estudo, Baima [85] aponta como merecedores de registro os seguintes aspectos:

- A percolação é responsável por 38 a 55% dos acidentes;
- Os galgamentos ocupam o segundo lugar, respondendo por 24 a 42% dos acidentes;
- Percolação e galgamento juntos são responsáveis por 70 a 80% dos acidentes;
- Há acidentes difíceis de enquadrar (note-se o modo "outros" colocado junto com erosão).

A Tabela 2.6, compilada a partir de *Lessons from Dam Incidents*, [87], apresenta as principais causas de rupturas (R) e acidentes (A) verificados nos principais tipos de barragens de concreto.

Conforme verificado por Perini [2] e Baima [85], o Brasil não mantém estatística ou registro oficial sobre o número e tipo de incidentes, causas prováveis ou dos danos causados, sendo os levantamentos realizados de forma independente pelos pesquisadores, de acordo com a necessidade de suas pesquisas. Essa realidade permanece.

Dentre os estudos realizados, os autores destacam o levantamento realizado por Menezes entre os anos de 2000 e 2008 [17]. O trabalho mostra que neste intervalo cerca de 166 acidentes e incidentes foram noticiados pela imprensa local, dos quais metade são

Tabela 2.3: Riscos em Barragens

Fator	Tipo	Definição
Fatores Naturais ou Ambientais	Risco Hidrológico	Probabilidade de falha de uma estrutura hidráulica face a ocorrência de vazão superior àquela para a qual foi dimensionada. Matematicamente é definido como produto entre a probabilidade de ocorrência de uma cheia associada a um determinado período de retorno e os danos que se esperam dessa ocorrência.
	Sismicidade	Um sismo é um fenômeno de vibração brusca e passageira da superfície da Terra, resultante de movimentos subterrâneos de placas rochosas, de atividade vulcânica, ou por deslocamentos de gases no interior da Terra, principalmente metano. O enchimento de reservatórios formados pela construção de barragens ou açudes pode induzir a ocorrência de sismos e eventualmente produzir danos severos a essas estruturas e benfeitorias vizinhas.
	Escorregamento	Possibilidade de escorregamento de taludes de terra ou rochosos nas margens dos reservatórios, movimentando uma massa significativa para dentro do lago, podendo vir a causar ondas significativas no reservatório e o galgamento da barragem.
	Ações Agressivas	Atuação das intempéries (chuva, vento, calor, frio) alternadamente sobre a barragem e estruturas associadas podendo causar, ao longo do tempo, desagregação, envelhecimento, erosão e corrosão, dentre outros fenômenos térmicos, mecânicos e químicos.
Fatores Internos (Dependentes da Barragem)	Riscos na Operação do Reservatório	Vertedouros hidrológicamente subdimensionados e/ou apresentando grau de incerteza na determinação da capacidade de descarga devido a dimensionamento por critérios empíricos, dados cadastrais e informações geométricas inconsistentes
	Riscos Geológicos	Possibilidade de ocorrência de condições geológicas durante uma obra, diferentes daquelas previstas nos estudos de projeto, gerando impactos nas soluções adotadas no projeto, no prazo de execução e no custo da obra.
	Riscos Estruturais	Fatores ligados ao dimensionamento estrutural e geotécnico, que podem levar à falha de estruturas da barragem na resposta aos carregamentos a elas impostas
	Riscos associados ao Monitoramento	Relativos ao controle permanente do comportamento das estruturas por meio das atividades de auscultação de barragens (manutenção preditiva), ou seja, das inspeções visuais e da análise dos dados da instrumentação instalada.
	Riscos Técnico-Organizacionais	Fatores associados à gestão dos riscos pelas empresas de projeto, construção e operação dos empreendimentos.
	Riscos Associados à Gestão de Emergências	Relativos às respostas as emergências para se evitar uma ruptura ou, se esta for inevitável, reduzir as suas consequências na área industrial e no vale a jusante
	Riscos de Ruptura de Barragens em Cascata	Causados pela possibilidade de ruptura de uma barragem, causando uma onda de cheia e transbordamento de barragens existentes a jusante, podendo levá-las a ruptura.
Fatores Externos	Socioeconômicos	São riscos externos ao sistema barragem e associados às consequências humanas e econômicas no caso de ruptura

Fonte: Adaptado de Melo e Fusaro, 2015 [59].

casos de ruptura. A Figura 2.12 apresenta graficamente a frequência de ruptura e acidentes de barragens brasileiras resultante da interpretação de Perini [2] sobre a estatística de Menescal.

O levantamento de Menescal não faz distinção quanto às características técnicas (tipo de material de construção, altura, idade, etc.) das barragens, o que impossibilita a elaboração de estatísticas relacionadas. Ao mesmo tempo, segundo o autor, os resultados da pesquisa registram uma situação preocupante: grande parte dos eventos registrados

Tabela 2.4: Causas de ruptura de barragens 1975-2011.

Causas de ruptura	Número de rupturas	Porcentagem de rupturas
Galgamento ou transbordamento	465	70,90%
Piping	94	14,30%
Estrutural	12	1,80%
Humano (relacionado)	4	0,60%
Animais (atividade)	7	1,10%
Vertedouro	11	1,70%
Erosão/escorregamento/instabilidade	13	2,00%
Desconhecido	32	4,90%
Outros	18	2,70%
Total		656

Fonte: Baima, 2015 [85], adaptado de FEMA, 2013.

Tabela 2.5: Causas de acidentes em barragens de terra e enrocamento

Causa	Justin (1932)	Middlebrooks (1952)	Blind (1983)	Charles & Boden (1985)
Nº de Acidentes	100 acidentes	220 acidentes	267 acidentes	100 acidentes
Percolação	48%	38%	39%	55%
Instabilidade	5%	15%	10%	14%
Erosão	Galgamento	39%	30%	42%
	Outros	8%	17%	9%
				7%

Fonte: Sandroni, 2012 [86].

Tabela 2.6: Causas de acidentes e rupturas em barragens de concreto

Tipo de Barragem	Arco		Contrafortes		Gravidade		TOTAL		
	R	A	R	A	R	A	R	A	R&A
Causas da ruptura	R	A	R	A	R	A	R	A	R&A
Transbordamento	2	1			3	2	6	3	9
Erosão por fluxo	1		1		1		3		3
Fundações (infiltração, piping)	1	1	1		2	5	5	6	11
Escorregamento							2		2
Deformação		2	2					2	2
Deterioração		3		2		1		6	6
Falha na construção					2		2		2
Falha das comportas					1	2	1		3
TOTAL	4	7	7	2	11	10	19	19	38

Fonte: Baima, 2015 [85], adaptado de Lessons from Dam Incidents, 1988.

decorrem da incapacidade dessas estruturas de suportar, com certa margem de segurança, os eventos hidrológicos (cheia) para os quais teoricamente foram projetados.

Deve-se no entanto ter em mente que, em alguns casos, as estatísticas sobre a ruptura ou falha não são suficientes para a determinação da confiabilidade de sua aplicação à cada barragem em um sentido absoluto. Desta forma, a probabilidade de ruptura para a barragem em estudo deve somente ser apresentada dentro de uma classificação relativa [88].

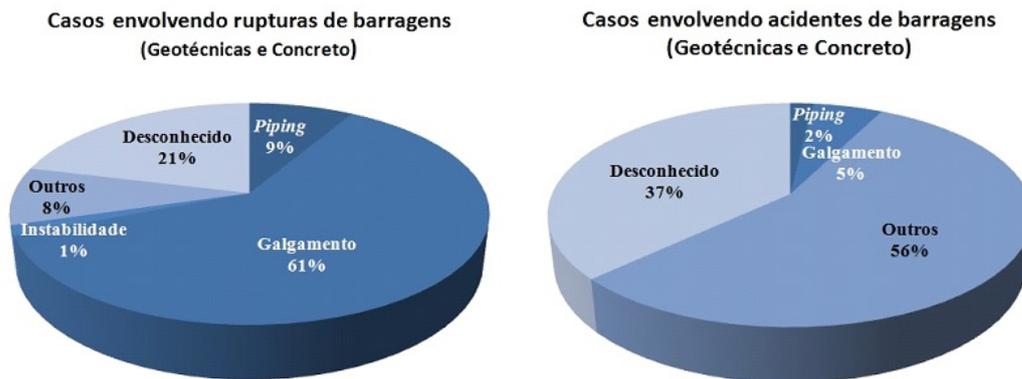


Figura 2.12: Frequência de incidentes com barragens brasileiras reportados pela imprensa escrita entre 2000 a 2008. Fonte: Perini, 2009 [2].

2.6 Legislação Internacional Relacionada à Segurança de Barragens

Antes do Brasil, alguns países implementaram leis sobre segurança de barragens. Essa diferença temporal histórica deixa clara a importância da questão, ao mesmo tempo em que evidencia o atraso do brasileiro no tratamento do assunto.

Por outro lado, curiosamente, regulamentos e legislações relativas à Segurança de Barragens somente foram estabelecidas após a ocorrência de acidente que sensibilizasse de forma significativa a opinião pública [89]. Nos Estados Unidos, por exemplo, o Estado da Califórnia, pioneiro na implantação de legislação específica sobre Segurança de Barragens, somente o fez após o rompimento da Barragem St. Francis, em 1929, a qual resultou na perda de mais de 400 vidas humanas. A legislação da Califórnia tornou-se ainda mais restritiva em 1965, após o colapso da Barragem Baldwin Hill que matou 5 pessoas.

O rompimento da Barragem San Fernando, Califórnia, em 1971, que se seguiu a um terremoto e o colapso da Barragem Buffalo Creek, Virgínia, em 1972, vitimando 125 pessoas e deixando 1.121 pessoas feridas mais 4.000 desalojadas, despertou a atenção do Governo Federal Americano para o problema de Segurança de Barragens. A empresa responsável, *Pittston Coal Company*, alegou que um ato divino (*Act of God*) teria sido responsável pela tragédia. A Justiça norte-americana, no entanto, não engoliu a justificativa, obrigando a empresa a pagar pesadas multas e indenizações terrenas.

A partir da década de 80, começaram a ser estudados métodos de tomada de decisão baseados no risco (*Risk-Based Decision Analysis*), métodos estes que, naquela época, encontraram maior utilização na indústria que na engenharia de barragens.

Na década de 90, estes estudos constituíram um embasamento teórico para os métodos de análise probabilística de risco aplicada a barragens, que buscam a quantificação científica e matemática dos riscos associados a estas estruturas.

No entanto, estes métodos ainda apresentam restrições, tais como dificuldades de estabelecer uma árvore de eventos consistente e “universal” e dificuldades na quantificação probabilística do risco. Apesar disso, muitos países têm investido muito no estudo e aplicação destes.

Nos últimos vinte anos, multiplicaram-se as ações no âmbito do tema da segurança das barragens, principalmente, nas atividades de desenvolvimento e melhoria da legislação em muitos países, sob a forma de recomendações, normas e regulamentos nacionais.

A Tabela 2.7 apresenta uma síntese das principais legislações mundiais consultadas. Como referência foram utilizados os estudos comparativos de legislação e de avaliação de risco promovidos por McGrath [90], em parceria com o governo australiano, bem como levantamentos e relatórios emitidos pelo Banco Mundial [91]. Também foram avaliados os estudos comparativos dos demais trabalhos abordados neste estudo [2, 31, 85, 92].

Tabela 2.7: Legislação Internacional Relacionada à Segurança de Barragens

País	Regulamentação quanto ao controle de segurança	Classificação de Perigo	Análise Dam –Break e plano de emergência
Austria	$H \geq 15m$ ou $V \geq 500.000m^3$	-	(3)
Finlândia	Todas	3 classes	(3)
França	$H \geq 20m^{(1)}$	-	$H \geq 20m$ e $V \geq 15.000.000m^3$
Alemanha	$\geq 5m$ e $V \geq 100.000m^3$ ⁽¹⁾ ,	-	(4)
Itália	$H \geq 15m$ ou $V \geq 1.000.000m^3$ ⁽²⁾	-	(5)
Holanda	-	-	-
Noruega	Todas	5 classes	Para as classes 2, 3 e 4
Portugal	$H \geq 15m$ ou $V \geq 100.000m^3$ ^{(1),(2)}	3 classes	(3)
Espanha	$H \geq 15m$ ou $10H < 15m$ e $V \geq 1.000.000m^3$	3 classes	classes A e B
Suécia	Todas	4 classes	(3)
Reino Unido	$V \geq 25.000m^3$	-	(3)
Austrália	Descentralizado	Descentralizado	Descentralizado
Canadá	Descentralizado	Descentralizado	Descentralizado
Estados Unidos	Descentralizado	Descentralizado	Descentralizado

Fonte: Modificado de Baima, 2015 [85].

Onde:

H – altura; V – volume; (1) outro critério; (2) regras simplificadas para pequenas barragens; (3) Barragens “muito grandes” ou de risco “alto”; (4) requerimentos e normas legais não preveem a elaboração de planos; (5) barragens sujeitas a legislação

A comparação limitou-se a aspectos gerais e objetivos, como a existência de uma lei de segurança de barragens, de um arcabouço técnico para implementação dessa e o tempo de existência da lei/programa de segurança de barragens.

De modo geral, verificou-se uma tendência de que a regulamentação dos países adote 3 classes de perigo (alta, significativa e baixa), embora também se adotem, com menor frequência, 2, 4 ou mais classes. Os critérios para a adoção das classes refletem diferentes arranjos constitucionais e organizacionais, bem como procedimentos operacionais, fazendo com que as leis e as expectativas em relação ao seu cumprimento difiram, em alguns casos, significativamente. Em Portugal, por exemplo, há regulamentos e normas, enquanto que no Canadá há orientações (*guidelines*) que não são estritamente obrigatórias;

A legislação também pode diferenciar-se em termos de natureza (puramente administrativa ou técnico-administrativa) e dotada de "peso" jurídico variável. Nesse sentido buscou-se incluir a legislação identificada em contextos mais amplos, como, por exemplo, o de infra-estruturas hidráulicas. A seguir são detalhados alguns esquemas regulatórios estudados.

2.6.1 Argentina

O marco regulatório para a segurança de barragens na Argentina consiste em um decreto (239/99), que cria o Organismo Regulador de Seguridad de Presas - ORSEP, ou órgão regulador de segurança de barragens. O ORSEP é uma agência reguladora independente dentro da Secretaria de Recursos Hídricos do país. Substitui o ORSEP Comahue, que foi estabelecido em 1993, e três comissões transitórias de segurança de barragens. Sua função é supervisionar a segurança das barragens no que diz respeito à concepção, construção, manutenção e operação de projetos hidrelétricos de empresas privadas.

O ORSEP consiste na única entidade governamental argentina especializada cientificamente e tecnicamente para gerenciar e atender atividades de: controle, auditoria técnica, avaliação do estado da operação, recomendação de medidas corretivas estruturais e não estrutural, contratação de estudos e execução de obras, formulação de planos contingentes, por si ou em conjunto com os Comitês de Bacias.

O Decreto 106/03 do Poder Executivo Nacional estendeu o escopo de competência do ORSEP a todas as barragens nacionais, viabilizando a assinatura de acordos de cooperação com as jurisdições provinciais do país e seus organismos específicos.

Atualmente a instituição passa por processo de atualização dos seus critérios de classificação de segurança em barragens, adequando-os a uma abordagem probabilística de análise de riscos (*Probabilistic Risk Analysis* – PRA).

2.6.2 Austrália

Na Austrália o regulamento relevante relacionado à segurança de barragens é encontrado no nível estadual. Dentre estes destacam-se os de New South Wales, Queensland e Victoria. A Austrália espelha-se na abordagem do Reino Unido, acompanhando os avanços técnicos e regulamentares dos britânicos.

Em New South Wales a Lei de Segurança de Barragens (ou *Dam Safety Act* - DSA) instituiu um Comitê de Segurança de Barragens (*Dam Safety Committee* - DSC) que tem por finalidade manter sob vigilância as barragens nela discriminadas de modo a garantir sua segurança por em termos de localização, concepção, construção, reconstrução, extensão, modificação, operação e manutenção. Observa-se que as "barragens discriminadas" correspondem a todas aquelas registradas no Anexo 1 da DSA.

Este Anexo lista os nomes e localizações de todas as barragens passíveis de supervisão, sem no entanto esclarecer qual critério foi adotado para esta seleção. O DSC também regula atividades de mineração nas proximidades das barragens e seus reservatórios, a fim de garantir que essas não comprometam sua segurança.

Em Queensland o *Water Act* (Código de Águas), editado em 2000, ao substituir a Lei de Recursos Hídricos local, estabeleceu que uma barragem se enquadra sob sua jurisdição se, ao realizar-se uma avaliação de impacto, for demonstrada a ocorrência de PAR (*Population at Risk*) em caso de falha da barragem. Os custos de confecção e de validação deste estudo de impacto ficam ao encargo do empreendedor.

A principal lei de segurança de barragens em Victoria é o *Water Act* de 1989. Sob seus termos estabelece que os proprietários de aproveitamentos hidráulicos serão diretamente responsabilizados pelos danos causados pela operação de suas barragens. Barragens consideradas potencialmente perigosas precisam ser projetadas, construídas, operadas e mantidas de acordo com padrões apropriados e melhores práticas relacionadas à segurança.

Para efeito de licenciamento, a lei exige que os proprietários de grandes barragens tenham seus projetos, planos de vigilância e de gestão de emergências atestados por um engenheiro de segurança de barragens. As licenças de operação para essas barragens, para as quais os agentes privados devem pagar uma taxa, são geralmente concedidas por um período de cinco anos. Um engenheiro qualificado deve rever o programa de vigilância de barragens durante o processo de renovação da licença.

No âmbito nacional, em 1978, a Austrália lançou o *Dam Safety Act* - Decreto de Segurança de Barragens. O ANCOLD – Australian National Committee on Large Dams Incorporated, publicou uma revisão dos documentos intitulados: *Guidelines on Dam Safety Management* e *Guidelines on Risk Assessment*, em 1994; com o objetivo de contribuir no planejamento, projeto, construção e operação de grandes barragens e seus reservatórios.

Em 2000 foi publicado o *Dam Safety Code* – Código de Segurança em Barragens -, uma complementação do *Dam Safety Act*. Esta legislação prevê que todo barramento deve ser operado e mantido de acordo com as diretrizes da ANCOLD. Ainda segundo documento, para cada empreendimento, há a necessidade de se produzir um relatório anual de segurança e deve-se desenvolver e manter um programa de fiscalização de barragens.

Assim, como ocorre na legislação britânica e se opondo à portuguesa, a legislação australiana não prevê as partes da barragem que devem ser monitoradas e vistoriadas, deixando este assunto a encargo de entidades especialistas em engenharia. Também não discorre sobre o tamanho das barragens que são submetidas ao código, deixando a nítida impressão que se aplica a qualquer porte de empreendimento.

2.6.3 Canadá

A Legislação Canadense é de suma importância visto que o “Manual de Segurança e Inspeção de Barragens” foi baseado nas diretrizes que compõem o *Dam Safety Guidelines* – Guia da Segurança em Barragens -, o manual canadense correspondente ao brasileiro [31].

No Canadá, a gestão de recursos hídricos é descentralizada, de responsabilidade de cada província. Órgãos federais têm jurisdição sobre alguns aspectos relacionados com cursos d’água situados na divisa com os Estados Unidos.

Na ausência de legislação provincial específica, as Diretrizes de Segurança de Barragens (*Dam Safety Guidelines*), da *Canadian Dam Association* - CDA, editadas desde 1999, servem como referência de melhores práticas a serem adotadas.

As diretrizes do CDA determinam que a responsabilidade para todos os aspectos da segurança da barragem esteja claramente definida e a delegação autoridade devidamente documentada. Em quaisquer casos, as regulamentações legais se sobrepõem as diretrizes estabelecidas por entidades não governamentais.

A CDA também propõe a mesma necessidade de definição de responsabilidades para as agências reguladoras. Nesse rol de obrigações está inclusa a manutenção de um inventário de barragens, no qual os proprietários de barragens são obrigados a fornecerem relatórios periódicos de segurança.

Em tais documentos devem estar discriminadas as medidas corretivas adotadas com base nas recomendações do engenheiro responsável pela revisão de segurança da estrutura, assim como o calendário das revisões periódicas de segurança. À autoridade reguladora, desde que devidamente fundamentado, é reservado o poder de aceitar ou rejeitar relatórios de segurança de barragens apresentados.

Outra característica marcante da legislação é a imposição de multas pesadas aos responsáveis por acidentes com barragens. No último reajuste a multa máxima passou de 100

mil dólares canadenses para 1 milhão de dólares canadenses, passando o tempo máximo de prisão previsto de 1 para 3 anos.

Merecem especial destaque aspectos da segurança de barragens da província de Quebec, regidas originariamente pelo *Dam Safety Act* - DSA, de 2000, e as *Dam Safety Regulations* - DSR, de 2002, unificadas em 2008. Para efeito de classificação, as barragens são divididas em dois grupos: alta capacidade e baixa capacidade. São consideradas barragens de alta capacidade:

- barragens de altura igual ou superior a 1,0 m, com capacidade maior do que 1.000.000 m³;
- barragens de altura igual ou superior a 2,5 m, com capacidade superior a 30.000 m³;
- barragens de 7,5 m ou mais de altura, independentemente da capacidade; e
- Independente da sua altura, barragens associadas ou anexas a uma barragem já classificada como de alta capacidade.

Cada barragem deve ser classificada em função do grau de risco (P) que representa para pessoas e bens, medido através da multiplicação do valor numérico de sua vulnerabilidade (V) pelo valor numérico das potenciais consequências de uma falha da barragem (C), conforme Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Classificação de Risco Canadense

P	Classe
$P > 120$	A
$70 < P < 120$	B
$25 < P < 70$	C
$P < 25$	D

As barragens poderão ainda enquadrar-se em uma quinta classe “E”, quando as consequências de uma falha forem muito baixas e $P < 70$.

A experiência canadense com grandes barragens tem sido bastante satisfatória, tendo em vista que estes estão livres de falhas que causaram perdas humanas ou danos extensivos. Atualmente o Canadá tem cerca de 10 mil barragens espalhadas por seu território, sendo mil dessas com mais de 15 m de altura, ou seja, consideradas grandes barragens pelos parâmetros regulatórios estabelecidos.

2.6.4 Estados Unidos

Nos Estados Unidos, embora a maior parte da infraestrutura pertença a entidades públicas, a maioria das barragens é da iniciativa privada. Segundo a *Federal Emergency*

Management Agency - FEMA (2005), os proprietários de barragens são responsáveis pela segurança, manutenção, melhoria e reparos de suas barragens.

De modo geral, as barragens são avaliadas necessariamente sob três perspectivas: do ponto de vista estrutural, do ponto de vista hidráulico-hidrológico e do ponto de vista sísmico. Em decorrência dos ataques terroristas de 11 de setembro de 2001, os Planos Emergenciais de Segurança de Barragens foram revistos e adaptados para lidar com ações de terrorismo e vandalismo.

Tais alterações preveem a repentina interrupção do suprimento de água e também a possibilidade de contaminação e encontram-se submetidos à fiscalização e acompanhamento de duas agências principalmente da *Environmental Protection Agency* - EPA e do FBI – *Federal Bureau of Investigation*. Além dos Estados Unidos, Austrália e Reino Unido também promoveram a revisão de seus planos.

Atualmente, um dos principais documentos para a classificação de barragens de acordo com o impacto potencial de uma ruptura é o *Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams*, elaborado pelo *Interagency Committee on Dam Safety* - ICODS e editado em 2004 pela FEMA.

Este documento apresenta os resultados de um estudo desenvolvido por um grupo de trabalho designado para compilar diferentes métodos de classificação de barragens por categoria de dano potencial associado, identificar ambiguidades de terminologia e propor um sistema novo. Após analisar os sistemas utilizados em diversos estados e instituições federais dos EUA e no Canadá, o grupo conclui pela adoção de simplesmente três níveis (baixo, significativo e elevado):

Tabela 2.9: Classificação de perigo potencial

Classificação de Risco Potencial (Hazard Potential Classification)	Perda de vidas humanas	Perdas econômicas, ambientais e sociais
Baixo	Não esperado	Baixa ou limitada a particulares
Significante	Não esperado	Sim
Elevado	Provável ou mais esperado	Sim

Fonte: FEMA, 2004.

As principais conclusões do trabalho são:

1. O sistema de classificação de dano potencial associado de barragens proposto é claro, simples, conciso e adaptável;
2. O sistema não reflete a situação atual da obra, somente as consequências incrementais de um possível evento adverso;
3. O sistema proposto deve ser adotado em substituição a sistemas numéricos e alfabéticos, pois é necessário eliminar confusões e educar o público sobre a importância da segurança de barragens;

4. O cenário utilizado para a estimativa de perda de vidas humanas deve ser razoável e realista, e não inventado, devendo ser excluídos os usuários eventuais nas áreas de montante e jusante;
5. Esse deve ser o sistema utilizado pelas diferentes agências reguladoras;
6. A classificação deve ser baseada no cenário de acidente (razoável, justificável e consistente) com as piores consequências possíveis;
7. As categorias de dano potencial servirão para definir os critérios de projeto.

Destaque para o uso de termos como “*perpetual liability*” ou “*perpetual maintenance*” nas legislações de âmbito federal e estadual.

2.6.5 França

Na França, segundo relatório do *ICOLD European Club* (2013), o Ministério da Ecologia, da Energia, do Desenvolvimento Sustentável e do Mar (MEEDDM) tem a responsabilidade pela segurança de barragens. A legislação é composta pelos decretos ministeriais: *Decree on Hydraulic Structures Safety* (11/12/2007), *Details on Owners’ Obligations* (29/02/2008), *Risk analysis (Etudes de Dangers - EDD)* (12/06/2008), *Incident Declaration - EISH* (21/05/2010) e *Certification for Engineering Offices* (18/02/2010 e 7/04/2011).

Estes decretos fixam as prescrições com respeito à segurança e seguridade das obras hidráulicas, definem detalhadamente as obrigações dos proprietários e os eventuais prazos para emissão de relatórios, fornecimento de documentos e de organização de inspeções técnicas periódicas.

O decreto de 2007 classifica as barragens em 4 classes de acordo com suas dimensões Tabela 2.10:

Tabela 2.10: Classificação das Barragens Francesas

Classe	Características
A	$H \geq 20$
B	Obra não classificada em A, para a qual $H^2 * \sqrt{V} \geq 200$ e $H \geq 10\text{m}$
C	Obra não classificada em A ou B, para a qual $H^2 * \sqrt{V} \geq 20$ e $H \geq 5\text{ m}$
D	Obra não classificada em A, B ou C e $H \geq 2\text{m}$

Métodos de Análise Quantitativa de Risco (*Quantitative Risk Analysis – QRA*) são utilizados. Os levantamentos por instrumentação têm alta prioridade no território francês.

2.6.6 Holanda e Países Baixos

A região dos Países Baixos tem um quarto de sua área abaixo do nível do mar, por isso é protegida por um sistema de diques. Sendo assim, a ideia de segurança do *risk assessment* está focada no risco de escoamentos em termos de probabilidade de vazões e consequências, onde o objetivo é considerar todos os fatores, inclusive, a integridade dos diques, para, então, determinar estratégias de redução do risco. Nestes países, técnicas de QRA são objeto de constante estudo e revisão, ao passo que padrões de segurança estritos foram inseridos na legislação através do *Flood Protection Act* [90].

O Programa Holandês de Proteção às Inundações é, simultaneamente, uma organização e uma metodologia. A organização é representada pela aliança e responsabilização conjunta entre as autoridades regionais de água e o Ministério de Infraestrutura e Desenvolvimento, cabendo às autoridades regionais a realização da maioria dos projetos de proteção contra inundações ao longo da costa, rios e lagos.

Em termos metodológicos o Programa estabelece uma série de padrões de proteção que tem por objetivo melhorar as estruturas de proteção contra inundações que não atendem aos padrões de segurança exigidos. Tais padrões, mediante contribuição de institutos científicos, consultoria e empresas de construção; tem por base a análise de custo-benefício e percepções recentes quanto à avaliação de risco de inundação e variação espacial do padrão de inundação. Nesse sentido levantamentos por instrumentação são de alta relevância.

As análises resultam em modelos de proteção contra inundações economicamente eficientes para diferentes partes do país. A otimização também considera a diferenciação de parâmetros por tipo de estrutura. O conceito de proteção multicamadas é aplicado, obedecendo a seguinte estruturação:

- Camada 1: medidas para evitar inundações (como diques, barragens e dunas, mas também criando mais espaço para os rios);
- Camada 2: neutralizar as consequências da inundação através do planejamento espacial;
- Camada 3: neutralizar as consequências das inundações através do gerenciamento de emergências.

2.6.7 Noruega

Os primeiros regulamentos para a segurança de barragens na Noruega foram emitidos em 1981, com foco em requisitos técnicos para construção. Na década de 1990, foram introduzidos requisitos de controle interno, classificação e qualificações para os proprietários de barragens.

Em 2001, o quadro jurídico para a segurança de barragens foi revisado e três novos regulamentos foram emitidos com base legal na Lei de Recursos Hídricos. Em janeiro de 2010, foi emitido um novo regulamento sobre segurança de barragens e outras estruturas hidráulicas, com base legal na Lei de Recursos Hídricos. Este regulamento substituiu os regulamentos anteriores emitidos em 2001, bem como os requisitos para proteção de barragens contra a guerra e as ações terroristas que tinham uma base legal na Lei de Energia e na Lei de Defesa Civil. Todas as exigências relativas à segurança de barragens foram, assim, reunidas em um único regulamento

Na Noruega, a maioria das barragens é de enrocamento, logo a maior parte dos incidentes são causados por infiltrações devido a erosão interna. O potencial da análise de risco probabilístico foi reconhecido a partir de 1995 quando de sua utilização por diversas empresas [92].

Cabe ao Diretório Norueguês de Recursos Hídricos e Energia - NVE administrar a regulação. As barragens são classificadas, de acordo com as consequências de uma eventual ruptura, em cinco classes e as exigências são dadas de acordo com a classe de consequência.

O proprietário da barragem é responsável por propor uma classe para cada barragem, e o NVE é responsável por controlar a documentação classificação e aprovar a classe. O proprietário da barragem deve avaliar as consequências diretas para a vida, a propriedade e ao meio ambiente, bem como quaisquer efeitos derivados da ruptura da barragem.

2.6.8 Portugal

Em Portugal, houve um grande número de barragens construídas na década de 90, portanto a legislação dá uma ênfase especial às barragens novas, porém contempla também barragens construídas anteriormente.

Atualmente, o principal documento normativo sobre segurança de barragens é o Regulamento Português para a Segurança de Barragens - RSB, emitido primeiramente em forma de Decreto-Lei, em 1990, e posteriormente revisto e reemitido em 2007.

Esse regulamento define critérios para o controle de segurança e estipula medidas de proteção civil para a população localizada a jusante de uma barragem. Esse mesmo decreto criou a Comissão de Segurança de Barragens - CSB, na qual estão presentes entidades e órgãos responsáveis pela regulamentação e controle de barragens, pelo planejamento de emergência e pela coordenação das ações de socorro. O regulamento se aplica:

- A todas as barragens de altura superior a 15m, medidas desde a parte mais baixa da fundação;
- Às barragens de altura inferior a 15m cujos reservatórios possuem capacidade maior que 100.000 m³; e

- A outras barragens com risco potencial elevado ou significativo.

Para as barragens menores, que não se enquadram no regulamento, existe o “Regulamento para Pequenas Barragens”.

O RSB publicado em outubro de 2007, pelo Decreto-Lei nº. 344/2007, define que as barragens devem agrupar-se em função dos danos potenciais a elas associados, sendo consideradas três classes de barragens definidas em função da ocupação humana, dos bens e do ambiente existentes.

- Classe I: residentes em número igual ou superior a 25;
- Classe II: residentes em número inferior a 25, ou infraestruturas e instalações importantes, ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis, ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas;
- Classe III: as barragens restantes.

O regulamento também estabelece um conjunto de disposições que visam a definição das formas de controle de segurança das barragens nas fases de projeto, construção, primeiro enchimento, exploração, abandono e demolição, contemplando observação e estabelecimento de medidas de proteção civil.

2.6.9 Reino Unido

Na Inglaterra, 80% das barragens tem altura inferior a 15 m, com idade média de 90 anos, construídas com um núcleo de vedação denominado *puddle-clay* (em virtude da técnica de compactação da argila, com elevado teor de umidade através do amassamento), sendo que a maioria não dispõe de registros sobre sua construção.

Devido ao desenvolvimento de vilas e cidades nas áreas de influência direta de jusante, o governo britânico vem implementando programas de avaliação da segurança dessas barragens, à luz do conhecimento técnico e ferramentas tecnológicas atuais.

Ainda em 1929, regulamentou-se a segurança de barragens no País. Este primeiro ato, garantiu que as ações de inspeção das barragens fossem necessariamente realizadas por um engenheiro especialista. Desde a introdução da legislação de segurança de reservatórios, nenhuma morte ocorreu como consequência de uma ruptura de barragem.

A Legislação Britânica foi redigida de tal forma a concentrar a sua aplicação na fiscalização da segurança dos empreendimentos existentes e na certificação de barragens finda a sua construção ou perante modificações executadas.

É aplicado o conceito ALARP - *As Low As Reasonably Practicable* ou tão baixo quanto possível. Trata-se de um princípio metodológico que estabelece que os riscos, inferiores

ao limite de tolerabilidade, só são toleráveis se a sua redução for impraticável ou se os custos associados a essa redução forem fortemente desproporcionais (dependendo do nível do risco) relativamente aos benefícios daí decorrentes. Em outras palavras, o dono da barragem tem de provar que as medições do risco apresentam uma grande desproporção entre o esforço para reduzir riscos adicionais (alto) e a redução do risco que seria realizada com este esforço (baixo).

A legislação, por sua vez não define o que exatamente deverá ser vistoriado pelo técnico, deixando os critérios a serem avaliados a encargo de instituições científicas renomadas como o *Institution of Civil Engineers* – Instituto de Engenheiros Cívicos -, *Building Research Establishment* – Fundação de Pesquisa da Construção -, entre outras.

Segundo McGrath [90], alguns donos de barragens usam FMEA, às vezes incluindo FMECA, esta entendida como tendo base semiquantitativa, sem a utilização de probabilidades de falha especificamente, isto pela dificuldade de avaliar probabilidades de falha confiáveis.

Todas as recomendações que visem o aumento da segurança são reconhecidas como lei e assim estabelece responsabilidade criminal individual do dono, nos casos de não cumprimento da legislação. São classificados como atos criminosos: não acatamento das instruções dadas pela autoridade responsável, prestação deliberada de informações falsas e falta de notificação da autoridade em casos que há obrigatoriedade da mesma, como, por exemplo, quando das modificações das características do empreendimento.

2.7 Legislação Nacional Relacionada à Segurança de Barragens

O marco regulatório para a segurança de barragens no Brasil é a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, aplicável a barragens que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

1. Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m;
2. Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m^3 (três milhões de metros cúbicos);
3. Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; e
4. Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.

A classificação das barragens é ato dos órgãos fiscalizadores. Para tal, estes podem fazer uso de informações enviadas pelos seus fiscalizados ou colher informações *in loco* para aferição desta classificação.

Objetivando diferenciar o universo das barragens, quanto à abrangência e frequência das ações de segurança, e funcionando como ferramenta de planejamento e gestão, foram criadas Matrizes de Risco e Dano Potencial Associado de maneira que as barragens sejam agrupadas em classes, conforme Figura 2.13.

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO ANM		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	B	C	D
Baixo	B	C	E

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO ANA		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	A	C	D
Baixo	A	D	D

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO ANEEL		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	B
Médio	B	C	C
Baixo	B	C	C

Figura 2.13: Tabelas de Classificação de Barragens utilizadas pelos principais Órgãos Fiscalizadores. Fonte: Autor.

A classificação dá-se por Categoria de Risco, por Dano Potencial Associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. Para CRI consideram-se os seguintes fatores:

I. Características técnicas:

- a. Altura do barramento;
- b. Comprimento do coroamento da barragem;
- c. Tipo de barragem quanto ao material de construção;

- d. Tipo de fundação da barragem;
- e. Idade da barragem;
- f. Tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro;

II. Estado de conservação da barragem:

- a. Confiabilidade das estruturas extravasoras;
- b. Confiabilidade das estruturas de adução;
- c. Eclusa;
- d. Percolação;
- e. Deformações e recalques;
- f. Deterioração dos taludes.

III. Plano de Segurança da Barragem:

- a. Existência de documentação de projeto da barragem;
- b. Estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem;
- c. Procedimentos de inspeções de segurança e de monitoramento;
- d. Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;
- e. Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação.

De acordo com o art. 5º da Resolução CNRH nº 143/2012, os critérios gerais a serem utilizados para classificação quanto ao dano potencial associado (DPA) na área afetada são:

- a. Existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;
- b. Existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários;
- c. Existência de infraestrutura ou serviços;
- d. Existência de equipamentos de serviços públicos essenciais;
- e. Existência de áreas protegidas definidas em legislação;

- f. Natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados;
- g. Volume

A Lei foi proativa em antever possibilidades que possam gerar risco as populações a jusante no caso de o empreendedor da barragem não puder ou não quiser “cuidar” de sua estrutura, estipulando, em seu art. 18, que caso uma barragem que não atenda aos requisitos de segurança nos termos da legislação pertinente está deverá ser recuperada ou desativada pelo seu empreendedor, que deverá comunicar ao órgão fiscalizador as providências adotadas.

Complementarmente, na eventualidade de omissão ou inação do empreendedor, o órgão fiscalizador poderá tomar medidas com vistas à minimização de riscos e de danos potenciais associados à segurança da barragem, devendo os custos dessa ação ser ressarcidos pelo empreendedor.

O modelo apresentado na Lei 12.334/2010 pode ser considerado um modelo multicriterial. Esse, no entanto, não tem o compromisso de auxílio à tomada de decisão e sim de propor a busca por um valor final que sirva de referência para a avaliação da segurança de barragens. Assim, metodologias específicas para avaliação e verificação das reais condições de classificação das barragens do setor elétrico devem ser perseguidas como forma de racionalizar o processo.

2.8 Considerações Finais sobre a Legislação e Regulamentação de Barragens

Em 2015, o Banco Mundial publicou um estudo comparativo entre países [91], vinculado ao tema Segurança de Barragens. Considerando as particularidades dos Sistemas Sócio-Político-Econômico de cada Estado, o trabalho adotou os seguintes critérios para seleção de países comparáveis ao Brasil:

1. Portfólio de barragens;
2. Idade média das barragens;
3. Países federativos.

Outrossim foi estabelecido que os países pertinentes deveriam ter em vigor:

1. Uma lei de segurança de barragens;
2. Um arcabouço técnico já estabelecido em relação à segurança de barragens; e

3. Uma classificação das barragens baseada em consequências.

A relação dos países analisados que preencheram essas condições pode ser visualizada na Tabela 2.11.

Tabela 2.11: Países estudados pelo Banco Mundial

País	Tipo de Estado	Ano de Início do Programa de Segurança de Barragens
EUA	Federação composta por 50 estados	1972
Austrália	Federação composta por seis estados e dois territórios	1991
Canadá	Comunidade de 10 províncias e três territórios	1998
África do Sul	Não federativo	1998
México	Federação composta por 31 estados	2000
Federação Russa	85 divisões federais	2003
Brasil	Federação composta por 27 estados	2010
Turquia	Não federativo	2011

Fonte: Bradlow, 2015 [91].

Em relação ao tempo de implementação dos programas, observa-se que Brasil e Turquia figuram entre os países mais jovens, com pouco mais de cinco anos de programa, enquanto os EUA possuem mais de 40 anos.

Em relação à legislação e regimes de fiscalização, o trabalho aponta uma grande divergência de abordagem entre os países, mesmo no caso de nações irmãs como os Estados Unidos e o Canadá. De modo semelhante, a mesma situação foi observada internamente entre os operadores de barragens e regiões administrativas de um mesmo país.

Como um dos exemplos é citado o caso do Canadá, país reconhecido por sua longa história de engenharia de barragens. Segundo análise, à exceção da província de Quebec, que possui uma lei de segurança de barragens, há poucas leis ou regulamentos na área de segurança de barragens no país. De forma mais expressiva apenas outras três províncias instituíram regulamentos similares. Nos Estados Unidos, onde a variabilidade regulatória é alta, os ocorrência de extremos materializa-se em estados como a Califórnia, dotada de arcabouço legal sólido, e o Alabama, onde inexistente regulamentação.

O estudo destaca que a comparação do progresso entre diferentes países foi prejudicada ao buscarem-se as avaliações dos reguladores nacionais e dos operadores de barragens, ante a diversidade de percepções e interpretações verificadas. Assim, pondera-se que a comparação entre os países deve estar limitada a aspectos gerais e objetivos, como a existência de uma lei de segurança de barragens, de um arcabouço técnico para implementar a lei e o tempo de existência da lei/programa de segurança de barragens.

Nesse contexto, a Figura 2.14, apresenta uma comparação entre os programas de segurança de barragens do Brasil e demais países “semelhantes” quanto ao Tempo Médio para desenvolvimento e implementação de um programa de segurança de barragens.

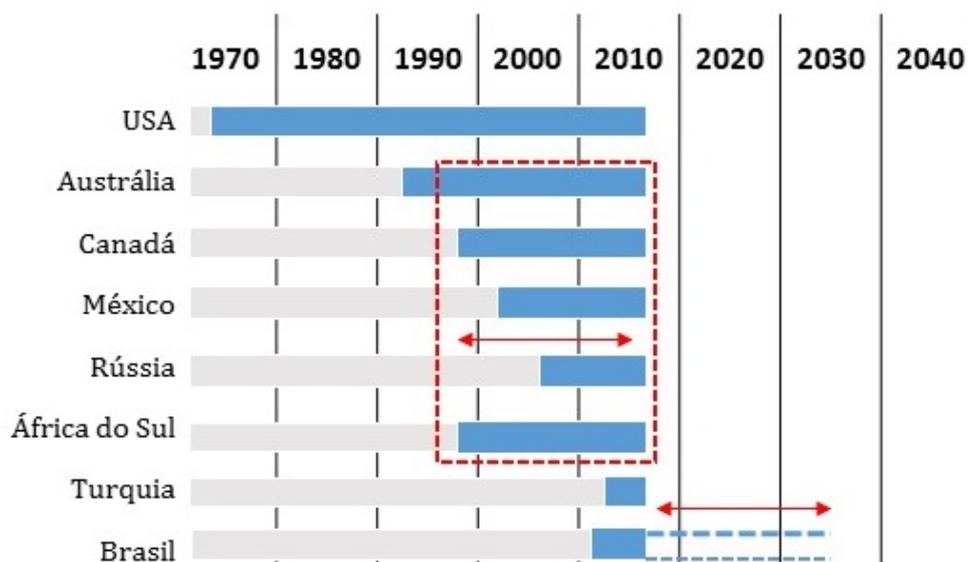


Figura 2.14: Comparação entre o tempo médio de implementação de programas de segurança de barragens. Fonte: Adaptado de Bradlow, 2015 [91].

Verifica-se que, à exceção dos EUA, os países listados possuem, em média, cerca de 20 anos de implementação de programas, enquanto o Brasil, menos de oito anos. Restringindo-se essa escala para o setor elétrico, falamos de um horizonte de pouco mais de 3 anos. Logo, qualquer tentativa de comparar ou relacionar o Brasil aos programas de segurança de barragens de outros países parece não fazer sentido antes de meados de 2030 – ou seja, 25 anos após a promulgação da Lei nº 12.334/2010. Sendo este avaliado como um prazo razoável para ter-se um bom entendimento quanto ao nível de progresso, amadurecimento e efeitos da política para dos padrões de segurança das barragens brasileiras.

2.9 Métodos de Priorização e a Tomada de Decisão

A tomada de decisão envolve a seleção de um curso de ação a partir de um rol de opções. Gomes [93] argumenta que a decisão pode ser classificada como simples ou complexa, específica ou estratégica, e que suas consequências podem ser imediatas, em curto e longo prazo, ou a combinação entre as formas anteriores e podendo, inclusive, ter reflexos bem diversos.

Conforme preconizam Moritz e Pereira [94], no moderno ambiente corporativo, as decisões devem ser tomadas com base em critérios racionais que garantam a otimização do

retorno esperado, apoiadas em informações de qualidade e estágios definidos, constituídos num modelo de apoio à tomada de decisão.

A tomada de decisão, portanto, deve ser mais técnica e menos intuitiva do que se supõe. Nesse sentido Métodos de Priorização são utilizados com a finalidade de direcionar, focalizar e priorizar os problemas a serem atacados de modo a evitar desperdício de energia e recursos.

Variados métodos são descritos na literatura. Por meio de revisão sistemática, Dutra [95] identificou 20 métodos distintos de priorização. Esses métodos foram distribuídos pelo autor em 3 categorias: qualitativos, quantitativos e híbridos. No grupo dos métodos híbridos, Dutra [95] identificou que os mais utilizados são Processo de Análise de Rede (ANP) e Processo Analítico Hierárquico (AHP). O método quantitativo de Programação Inteira foi apontado como o mais aplicado. Já, dentre os métodos qualitativos, identificou-se o Método de Pontuação como o atualmente mais utilizado.

Idealizado por Hall [96], tendo como premissa a construção de uma estratégia simplificada que permitisse a alocação sistemática e eficiente de recursos em projetos de P&D, o método consiste na definição de um conjunto de critérios para os quais são atribuídas notas a serem utilizadas na avaliação e projetos. Desenvolve-se por meio de processos iterativos, observando-se a seguinte sequência:

1. Define-se um conjunto de critérios;
2. Para cada critério indica-se uma escala de valores;
3. Avaliam-se os projetos em cada um dos critérios definidos;
4. Somam-se os pontos obtidos por cada projeto;
5. Selecionam-se os mais bem avaliados; e
6. Aplicam-se os recursos disponíveis, até o limite disponível.

O Método de Pontuação permite a atribuição de pesos aos critérios, representando a importância de um critério em comparação com os demais. Os pesos podem ser gerados através da opinião dos especialistas, tratadas por meio de metodologias de apoio à tomada de decisão multicritério como a AHP, ou qualquer outra técnica. Entretanto, a abordagem de atribuição de pesos aos critérios, a depender da situação avaliada, pode revelar-se de difícil aplicação, consistindo em um ponto fraco do método. Apesar disso, autores como Archer [97] sugerem a escolha do método de pontuação quando se tem muitos projetos a serem selecionados e priorizados.

Conforme discutido na seção 1.2, uma vez que um regulamento tem por princípios ser claro, preciso e ostensivo, o modelo de classificação de barragens estipulado pelas

Resoluções 143/2012 - CNRH e REN 696/2015 - ANEEL respaldou-se em princípios do Método de Pontuação para atingimento de seus objetivos.

2.10 O Processo Multicritério de Apoio à Decisão

Almeida [98, 99] ao estudar modelos de decisão multicritério, segmenta o processo decisório em cinco estágios, conforme Tabela 2.12.

Tabela 2.12: Estágios do processo decisório

Inteligência	Monitorar a organização e seu ambiente em busca de situações que requerem uma decisão (um problema de decisão).
Desenho	Construir o modelo de decisão para resolver o problema, incluindo a geração de alternativas.
Escolha	Avaliar as alternativas e resolver o problema conforme seja a problemática (seleção, ordenação, classificação etc.).
Revisão	Revisar as etapas anteriores, implicando também um processo de aprendizagem para a organização
Implementação	Aplicar no ambiente da organização a solução recomendada.

Fonte: Almeida, 2013 [99].

Belton e Stewart [100], de forma análoga, subdividem o processo de Apoio à Decisão Multicritério - AMD em um modelo de 5 estágios, com início na etapa de identificação do problema e conclusão na fase de desenvolvimento de um plano de ação com os resultados obtidos, conforme Figura 2.15.

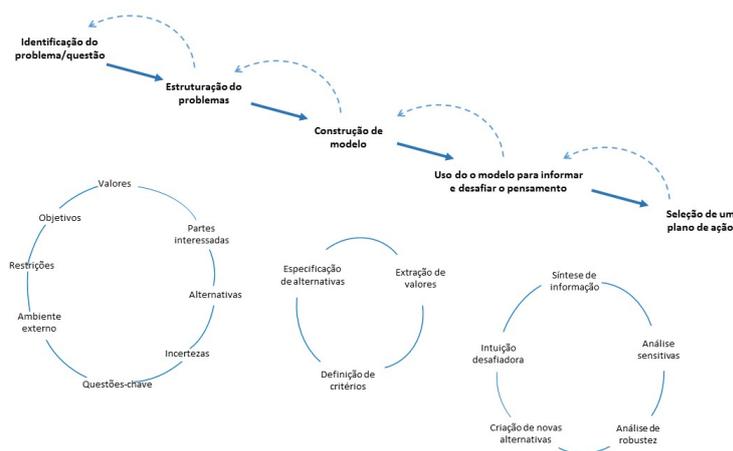


Figura 2.15: Processo de apoio multicritério à decisão. Fonte: Adaptado de Belton e Stewart, 2002 [100].

Nela são apresentadas as variáveis de processo dos três principais estágios do modelo. O primeiro desses, a estruturação do problema, tem como característica o pensamento

divergente em que se amplia a questão em estudo para investigar e comprovar o seu grau de complexidade. Já o segundo estágio, de construção do modelo, consiste em extrair a essência da questão por meio de uma representação complexa de forma a agregar maiores detalhes e informações mais precisas, constituindo uma modalidade na qual a forma de pensar é mais convergente. A terceira etapa, utilização do modelo para informação, realiza a síntese dos resultados obtidos, além de requerer a ponderação quanto a viabilidade das opções a serem implementadas.

Belton e Stewart destacam a inexistência de respostas certas em virtude da subjetividade das entradas. A subjetividade é inerente à escolha de critérios, à ponderação e à avaliação. A depender do *framework* escolhido, a subjetividade pode ser diferente, mesmo quando o objetivo final é comum e estabelecido de forma transparente [100, 101].

Nesse contexto, Tavana e Sodenkamp [102], esclarecem que o processo de decisão multicritério permite às partes interessadas a criação um quadro para o intercâmbio de informação e conhecimento, ao mesmo tempo que exploram seus sistemas de valores através da ponderação e estabelecimento de mecanismos de pontuação.

Ormerod [103] desenvolve este conceito ao afirmar que este conjunto de diferentes estruturas e mecanismos informa aos interessados as crenças sobre a relação entre as opções e os resultados.

2.11 Métodos Multicritério de Apoio à Decisão

Os modelos de apoio à decisão multicritério, conhecidos internacionalmente por *Multicriteria Decision Aid* (MCDA), surgiram na metade do século XX apresentando-se como um conjunto de técnicas que tem como objetivo auxiliar pessoas e empresas na resolução de problemas de decisão onde vários fatores, frequentemente conflitantes, precisam ser avaliados [93, 104].

Em uma decisão multicritério, os critérios geralmente são conflitantes entre si, existindo um complexo jogo entre perdas e ganhos entre eles. Nesse contexto o MCDA quantifica e formalmente incorpora esses fatores na análise do problema, acompanhando o formato como são desenhadas as preferências, compreendendo todo o processo como uma aprendizagem [105].

Informações existentes, dados coletados, modelos e julgamentos profissionais são usados para quantificar as probabilidades de variações de consequências, enquanto a teoria da utilidade é usada para quantificar preferências.

De acordo com Almeida *et al.* [64] em um processo decisório, dificilmente uma alternativa será capaz de maximizar seu desempenho em todos critérios dispostos. A diferenciação entre o AMD e as metodologias tradicionais de avaliação é a inserção dos valores

do decisor no modelo [106]. Segundo Yu [107], a estrutura de valores do decisor está associada aos critérios definidos. Este permite que as alternativas possam ser examinadas, avaliadas e, caso possível, até priorizadas.

Em síntese, o processo de decisão multicritério, sob certas condições, é um problema de otimização com diferentes funções objetivo simultâneas. Em geral são representados matematicamente pela Equação 2.1:

$$Max \{ g_1(a_i), g_2(a_i), g_3(a_i), \dots, g_j(a_i), \dots, g_k(a_i) | a_i \in A, j = 1, 2, 3, \dots, k \} \quad (2.1)$$

Onde $A = \{ a_1, a_2, a_3, \dots, a_n \}$ trata-se de um conjunto finito e enumerável de n possibilidades de ação, $G = \{ g_1, g_2, g_3, \dots, g_k \}$ um conjunto de k critérios de acordo com as alternativas a serem avaliada $g_j(a_i)$ ao desempenho da alternativa a_i no critério g_j .

Essencialmente encontra-se na literatura duas escolas que estudam o AMD [93]:

1. Escola Americana: Trata-se de uma abordagem que admite compensação, para uma determinada alternativa, de desempenhos menos adequados por outros mais desejáveis. Além disso assume que todas alternativas podem ser comparadas entre si.
2. Escola Francesa ou Europeia: Composta por métodos de sobreclassificação, prevalência ou subordinação. Diferente dos métodos compensatórios, sua análise não admite compensações ou *trade-offs*. Estes métodos poderão ser utilizados com a finalidade de selecionar um subconjunto finito de alternativas, classificando-as ou ordenando-as [108].

As duas escolas destacadas anteriormente têm aplicação para problemas onde o conjunto A de alternativas é discreto. Para problemas de decisão cujo caráter é contínuo, destacam-se técnicas de Programação Matemática, das quais a Programação Linear Multiobjetivo merece destaque [109].

De forma geral a abordagem multicritério considera os seguintes pontos [105]:

- Os processos decisórios são complexos e envolvem vários agentes que ressaltam os aspectos importantes do processo de tomada de decisão.
- Compreende os limiares da objetividade e por isso considera o juízo de valor (subjetividades) dos atores;
- Possui como pressuposto que o problema não está bem estruturado.

Para Gomes, *et al.* [93], a vantagem do uso AMD é pelo seu formato e ampla abrangência dos problemas, uma vez que torna possível modelar uma maior diversidade de fatores que residem no processo decisório.

2.11.1 Métodos de Sobreclassificação

Os métodos de sobreclassificação, conhecidos internacionalmente pelo termo *outranking*, baseiam-se na comparação par a par entre alternativas, com característica não compensatória, isto é, inexistente *trade-off* entre os critérios.

Ao contrário da escola americana, a escola francesa admite incomparabilidade entre alternativas, sendo assim mais flexível por não exigir do decisor uma classificação hierárquica das alternativas. Segundo Almeida [64] nestes métodos, a avaliação intercritério pode ser representada por pesos dos critérios que irão assumir o status de grau de importância. Este grau de importância entre os critérios pode ser compreendido como votos.

A escola francesa divide-se essencialmente em dois grupos, a saber:

- Família de métodos PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*); e
- Família de métodos ELECTRE (*Élimination et Choix Traduisant la Réalité*)

Abordados na seção 2.11.4.

2.11.2 Problemas e Tipos de Problemáticas

Os métodos multicritérios existem com a finalidade de esclarecer um problema relacionado à classificação, ordenação ou seleção de alternativas. De acordo com Roy [110], os problemas subdividem-se conforme diagrama da Figura 2.16:

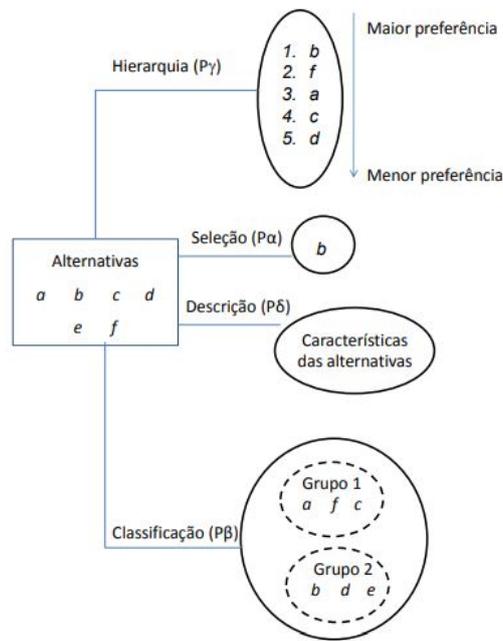


Figura 2.16: Tipos de Problemáticas. Fonte: Roy, 1986 [110].

Onde:

- Problemas do tipo $\alpha(P\alpha)$: finalidade de selecionar a melhor alternativa(s) dentro de um conjunto de alternativas;
- Problemas do tipo $\gamma(P\gamma)$: classifica as alternativas definidas a priori em função das regras estabelecidas;
- Problema do tipo $\beta(P\beta)$: têm a função de classificar as alternativas em categorias definidas a priori.
- Problema do tipo $\delta(P\delta)$: esclarece o processo de decisão por detalhar as alternativas para o decisor.

2.11.3 Família de Métodos PROMETHEE

O método PROMETHEE foi criado na década de 80 por Jean-Pierre Brans [111]. A eficácia do método é reconhecida face à diversidade de aplicações existentes associadas a problemas de natureza variada, publicadas como casos de sucesso.

A metodologia destaca-se pela forma como combina conceitos e parâmetros, assim como pela facilidade concedida ao decisor na interpretação dos dados, seja por meio de uma descrição econômica ou física do cenário analisado [112].

Conforme esclarecem Almeida e Costa [112], o tomador de decisão deve atribuir para cada critério um peso P_j que aumenta de acordo com a importância do critério. O método dispõe de seis formatos diferentes, por meio dos quais o decisor pode apresentar suas preferências, onde cada critério poderá possuir formato distinto dos demais, de modo a conferir a intensidade de preferências.

Ainda segundo os autores, conforme a preferência do decisor se eleva com a diferença entre a performance das alternativas para cada critério $[g_j(a) - g_j(b)]$, é possível determinar uma função $F(a, b)$ que irá assumir valores entre 0 e 1. Esses valores crescem à medida que a diferença de performance de uma alternativa em relação a outra se eleva e assumem valor igual a zero caso a performance de uma alternativa seja igual ou menor ao da outra.

1 – Critério usual não há parâmetro a ser definido	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$
2 – Quase-critério define-se o parâmetro q (limite de indiferença)	$g_j(a) - g_j(b) > q$ $g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$
3 – Limite de preferência define-se o parâmetro p (limite de preferência)	$g_j(a) - g_j(b) > p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = \frac{g_j(a) - g_j(b)}{p}$ $F(a,b) = 0$
4 – Pseudocritério definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência)	$ g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $ g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 1/2$ $F(a,b) = 0$
5 – Área de indiferença definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência)	$ g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $ g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = (g_j(a) - g_j(b) - q)/(p - q)$ $F(a,b) = 0$
6 – Critério Gaussiano O desvio-padrão deve ser fixado	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	<i>A preferência aumenta segundo uma distribuição normal</i> $F(a,b) = 0$

Figura 2.17: Preferência do decisor. Fonte: Almeida e Costa, 2002 [112].

Interpreta-se a Figura 2.17 da seguinte forma:

- q trata-se de um limite de indiferença, o maior valor para $[g_j(a) - g_j(b)]$, abaixo do qual existe uma indiferença.
- p trata-se do limite de preferência, o menor valor para $[g_j(a) - g_j(b)]$, acima do qual existe uma preferência estrita.

Conforme descreve Gomes [93], após estabelecerem-se as intensidades de preferência, é possível obter-se o grau de sobreclassificação (a, b) :

$$\pi(a, b) = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^n p_j F_j(a, b) \quad (2.2)$$

onde

$$P = \sum_{j=1}^n p_j \quad (2.3)$$

Por último, as alternativas podem ser arranjadas, de acordo com sua ordem, de modo crescente ou decrescente.

Conforme esclarecem Almeida e Costa [112], a família PROMETHEE, pode ser descrita por meio das implementações a seguir:

- PROMETHEE I – trata da intersecção entre os fluxos anteriores e promove uma relação de sobreclassificação parcial entre as alternativas.
- PROMETHEE II – Nesta implementação ela estabelece uma pré- ordem completa entre as alternativas.
- PROMETHEE III E IV – foram idealizadas para o tratamento de problemas de decisão mais complexos, com componente estocástico.
- PROMETHEE V – nesta implementação, é associada a metodologia do PROMETHEE II à introdução de restrições identificadas no problema para as alternativas sinalizadas.
- PROMETHEE VI – Usada quando o decisor não está preparado ou quando não deseja definir precisamente os pesos para os critérios. Nesse caso, através dessa implementação pode-se especificar intervalos de possíveis valores em lugar de um valor fixo para cada peso.

2.11.4 Família de Métodos ELECTRE

Um dos métodos de sobreclassificação mais difundidos é a família ELECTRE. O método foi criado por Roy (1968), consistindo em um importante instrumento para apoio e tomada de decisão. A família ELECTRE, até o momento, contempla os métodos: ELECTRE (Roy, 1968) [113], ELECTRE II (Roy; Bertier, 1971) [114], ELECTRE III (Roy,1978) [115], ELECTRE IV (Roy; Hugonnard, 1982) [116], ELECTRE IS (ROY; SKALKA, 1983) [117] e ELECTRE TRI (YU, 1992) [118] [107].

Gomes [93] caracteriza os métodos da família ELECTRE da seguinte forma:

- **Métodos ELECTRE I e IS.** Dividem o conjunto de alternativas em dois sub- conjuntos: i) alternativas não dominadas; ii) alternativas dominadas. O método ELECTRE I utiliza o conceito de critério verdadeiro, que possui concordância plena (em um critério genérico j) de que uma alternativa a é tão boa quanto uma outra

alternativa b se a performance de b for menor ao de a . O ELECTRE IS usa o conceito de pseudocritério, no qual existe uma concordância plena (em um critério genérico j) de que uma alternativa a é pelo menos tão boa quanto uma outra alternativa b mesmo que a performance de a seja um pouco menor (dentro de um dado limite q) do que o de b . De modo que se pode dizer que o pseudocritério considera a possibilidade de incerteza de um decisor ao afirmar que uma alternativa é, de fato, pelo menos tão boa quanto uma outra.

- **Métodos ELECTRE II, III e IV.** Ordenam as alternativas existentes no conjunto de alternativas viáveis. O método ELECTRE II utiliza o conceito de critério verdadeiro para indicar as relações de sobreclassificação, porém utiliza-se de uma estrutura de relaxamento para obter a ordenação das alternativas. Nesta estrutura compreende-se a construção de dois grafos: Grafo Forte; e Grafo Fraco. Os métodos ELECTRE III e IV utilizam o conceito de pseudocritério para estabelecer uma relação de confiabilidade, a partir do qual ordenam as alternativas através de um processo de "destilação". O método ELECTRE IV é utilizado em problemas de ordenação quando não é possível ou desejável atribuir pesos aos critérios.
- **Método ELECTRE TRI.** A metodologia destina-se a dissolver problemas de classificação ordenada. Neste tipo de situação procura-se classificar as alternativas dispostas no conjunto de alternativas viáveis em classes que possuem uma relação de preferência entre si. Este modelo faz uso do conceito de pseudocritério para construir as relações de sobreclassificação.

Conforme visto, cada método da família ELECTRE possui uma destinação distinta, que se adéqua de acordo com o problema que se deseja solucionar. Guarnieri [119] destaca que a escolha das abordagens depende da racionalidade do decisor ao demonstrar suas preferências. Neste trabalho convencionou-se a utilização do método ELECTRE TRI, identificado como o mais adequado às características do problema de tomada de decisão proposto. As próximas seções têm por propósito detalhar a metodologia ELECTRE TRI, apresentando sua formulação matemática.

2.12 Método ELECTRE TRI

O ELECTRE TRI, concebido por Bernard Roy e colaboradores [120], em 1992, é um dos métodos mais recentes da família ELECTRE [93]. Foi dimensionado com o propósito de dar suporte ao tratamento de problemas em que se deseja designar um conjunto de alternativas a um conjunto ordenado de categorias preestabelecidas, configuradas com base em múltiplos critérios [93].

Para resolver os problemas de classificação, o método agrupa alternativas de um grupo A em categorias pré-estabelecidas C Figura 2.18. Todas alternativas são comparadas a categorias chamadas de referência, normalmente definidas como b_n onde $n = \{ 0, 1, 2, \dots, k \}$ e k o número de alternativas de referência. Sendo as alternativas de referência, fictícias, uma vez que seu objetivo é criar padrões para alocar as alternativas potenciais nas categorias C [93]. Para n categorias, deverão existir $n - 1$ perfis de referência. De modo que C_n será delimitada por seu limite inferior b_{n-1} , com exceção da categoria C_1 que será delimitada pelo limite superior b_1 .

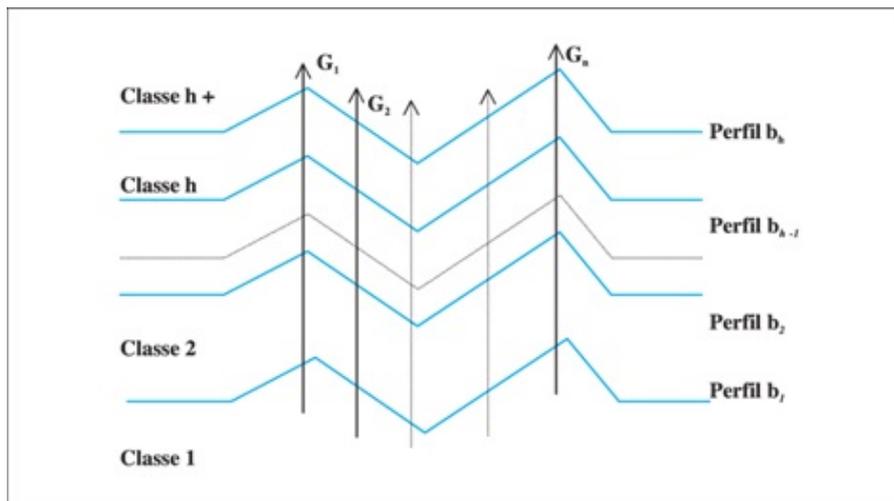


Figura 2.18: Categorias e limites no método ELECTRE TRI. Fonte: Costa *et al.*, 2007 [34].

A metodologia ELECTRE TRI vem sendo aplicada em um rol significativo de pesquisas envolvendo problemáticas diversas, tais como: seleção de sistemas de informação [112], avaliação de programas de pós-graduação [121], mensuração de riscos em gasodutos [122], classificação de riscos industriais [34], dentre outras.

2.12.1 A Problemática de Classificação

Como o próprio nome aponta, ELECTRE “TRI” (classificação em francês), tem por objetivo separar as alternativas potenciais em classes ou categorias previamente definidas. Dado isto, a problemática da classificação repousa em definir fronteiras superiores e inferiores destas classes e efetuar a comparação de cada alternativa a tais limites para assim definir onde cada alternativa deve ser alocada. Cada alternativa deverá ser avaliada independente das demais, quando alocadas para as suas respectivas classes [123].

Em problemas com apenas um critério, a classificação é bastante simplificada, bastando saber o desempenho da alternativa no critério e, em seguida, em que categoria essa

se encaixa. Nos problemas multicritérios, a complexidade reside uma vez que tanto as categorias, quanto as alternativas serão qualificadas por diversos valores [109].

O método ELECTRE TRI é um modelo desenvolvido para problemas do tipo $P.\beta$, isto é, de classificação. Por compreender a proposta do trabalho que é de classificar os contratos comerciais de uma empresa de terceirização em categorias de risco, é que o mesmo foi adotado para desenvolver o modelo de decisão.

2.12.2 Modelagem de Preferências

O método ELECTRE TRI baseia-se na relação de hierarquia entre duas alternativas, a e b , para alocar uma alternativa a , dado um critério i , em conformidade com sua performance $g(a)$. Essa relação é representada por aSb_n , o fator condicionante para que ela exista é a utilização do modelo de pseudocritério (YU e ROY, 1992 *apud* GOMES, 2009) [93].

Logo é possível concluir que o ELECTRE TRI aceita a imprecisão, incerteza e a má determinação dos dados. Para tanto adota faixas que determinam situações de indiferença ou de preferência. O limite da indiferença determina o limite da diferença de performance de duas alternativas pelo qual ainda é aceita a indiferença entre as alternativas. O limite da preferência, foi desenvolvido para bloquear uma passagem brusca de um cenário de preferência estrita para a indiferença. Com esse modelo surge uma nova preferência, a preferência fraca (Q), uma situação de dúvida entre a indiferença (I) e a preferência estrita (P).

Formalmente, se supormos que $g(a) \geq g(b)$, no modelo pseudocritério têm-se:

$$aPb \leftrightarrow g(a) - g(b) > p(g(b)) \quad (2.4)$$

$$aQb \leftrightarrow q(g(b)) < g(a) - g(b) \leq p(g(b)) \quad (2.5)$$

$$aIb \leftrightarrow g(a) - g(b) \leq q(g(b)) \quad (2.6)$$

Para se determinar a relação acima descrita, são realizados cálculos com base nos limites descritos, passando para a etapa a seguir:

- Realizar cálculo dos índices de concordância parciais $c_j(a, b_h)$ e $c_j(b_h, a)$;
- Realizar cálculo dos índices de concordância globais $C_j(a, b_h)$ e $C_j(b_h, a)$;
- Realizar cálculo dos índices de discordância parciais $d_j(a, b_h)$ e $d_j(b_h, a)$;
- Realizar cálculo do PAMC (Procedimento de Agregação Multicritério) com base nos índices de credibilidade $\sigma(a, b_h)$;
- Determinar um nível de corte (λ) considerado razoável para o PAMC;

- Realizar o processo de alocação das alternativas a em uma das categorias C a partir dos procedimentos pessimista e otimista.

Cujo esquema geral deste método é mostrado na Figura 2.19.

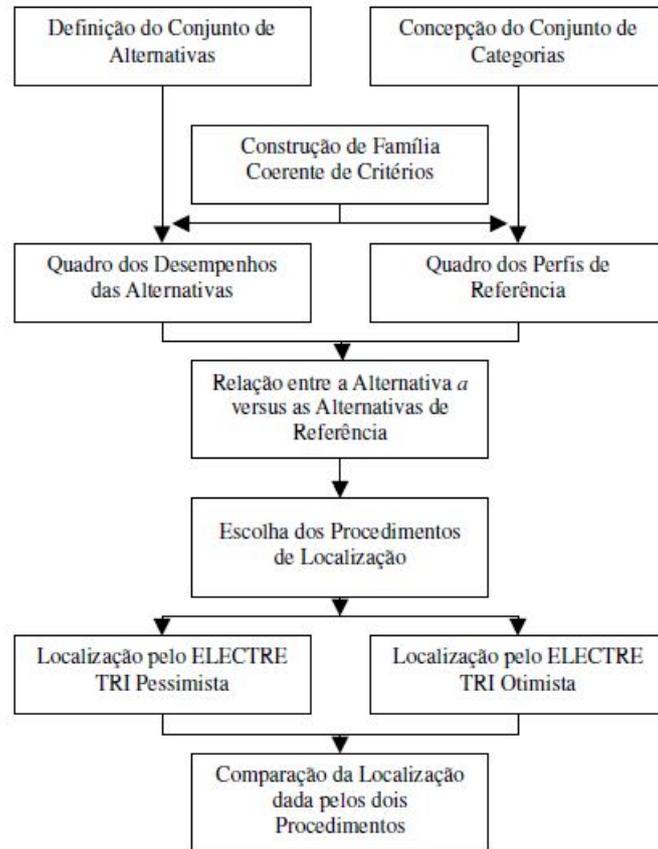


Figura 2.19: Diagrama de utilização do ELECTRE TRI. Fonte: Costa *et al.*, 2007 [34].

2.12.3 Procedimento de Agregação

O procedimento de agregação (PAMC) no método ELECTRE TRI dá-se pela comparação entre as alternativas potenciais a e os perfis de referência b_n . Uma vez que o procedimento de agregação multicritério está pautado na problemática de classificação e que os perfis de referência são limites para as categorias.

O método é alicerçado na relação de superação, por essa razão o PAMC aceita a incomparabilidade entre as alternativas e não estima a transitividade [93]. Ao acatar incomparabilidade a metodologia evita julgamentos errôneos que poderiam distorcer as relações entre as afirmativas, de modo a influenciar o PAMC [124].

O PAMC funciona em um sistema de preferências (S,R) de modo que:

- aSb se $w[C(aSb)] / w[F]$, sendo $0 \leq s \leq 1$
- e $g_j(b) - g_j(a) \leq v_j, \forall g_j \in F$
- aRb se não(aSb) e não(bSa)

Nesse caso em que o valor de s for equivalente a 1, significa que existe unanimidade dos critérios para a afirmativa aSb. Nessa hipótese, o efeito de veto não terá utilidade [109].

2.12.4 Procedimentos e Condições a Serem Observadas

Para funcionamento correto do modelo, alguns fatores devem ser observados como condicionantes para estabelecimento da relação de superação entre uma alternativa a e os perfis de referência b_n (YU e ROY, 1992 *apud* GOMES, 2009) [93]:

- A família de critérios é uma família de pseudocritérios;
- A tabela de desempenho das alternativas foi construída;
- Para cada alternativa de referência b_n , são conhecidos os limites de preferência p , limites de indiferença q e de veto v , para cada critério;
- Os pesos dos critérios são definidos como w para cada alternativa de referência b_n , em que $w_i > 0$, para todo e qualquer i ;
- Para o procedimento de alocação, deve ser definido um valor situado entre 0.5 e 1, denominado nível de corte (δ). Esse é o menor valor do grau de credibilidade (λ) para o qual pode-se afirmar que a supera b . Ou seja, se $(a, b) \delta \geq \lambda$, então aSb.

Além disso, para poder avaliar a relação de superação devem ser estabelecidos os índices abaixo:

- Concordância por critério $c_i(a, b)$ e $c_i(b, a)$;
- Concordância global $C(a, b)$ e $C(b, a)$;
- Discordância por critério $d_i(a, b)$ e $d_i(b, a)$;
- Discordância global $D(a, b)$ e $D(b, a)$;
- Credibilidade $\delta(a, b)$.

2.12.5 Índices de Concordância Parcial e Global

Para validar a sentença $aSbn$, uma quantidade suficiente de critérios deverá ser favorável à afirmação. Constata-se a condição de concordância dos critérios, calculando-se o índice de concordância parcial [110]. O índice oscila entre 0 e 1, mensurando o quanto se aceita que uma alternativa A supera uma alternativa B em determinado critério.

De acordo com os índices parciais, são encontrados os índices de concordância global $C(a, b)$ e $C(b, a)$ que demonstram o quanto a avaliação das relações entre A supera b_n para $C(a, b_n)$ e b_n supera A para $C(b_n, a)$.

A seguir demonstra-se como é calculado o índice de concordância $c_i(a, b)$ quando os critérios tiverem um sentido de preferência crescentes:

- Se $g_i(a) \leq g_i(b) - p_i$, então $c_i(a, b) = 0$
- Se $g_i(a) > g_i(b) - q_i$, então $c_i(a, b) = 1$
- Se $g_i(b) - p_i < g_i(a) \leq g_i(b) - q_i$, então $0 < c_i(a, b) < 1$ e $c_i(a, b)$ é calculado por meio de interpolação linear, de acordo com a expressão numérica:

$$c(a, b) = \frac{p_i - [g_i(b) - g_i(a)]}{p_i - q_i} \quad (2.7)$$

O cálculo do índice de concordância $c_i(b, a)$ pode ser obtido de forma semelhante, bastando inverter as letras das alternativas.

A seguir é demonstrado como se calcula o índice de concordância parcial quando os critérios tiverem um sentido de preferência decrescente:

- Se $g_i(a) \geq g_i(b) + p_i$, então $c_i(a, b) = 0$
- Se $g_i(a) < g_i(b) + q_i$, então $c_i(a, b) = 1$
- Se $g_i(b) + q_i < g_i(a) \leq g_i(b) + p_i$, então $0 < c_i(a, b) < 1$ e $c_i(a, b)$ é calculado por meio de interpolação linear, de acordo com a expressão numérica:

$$c(a, b) = \frac{p_i + [g_i(b) - g_i(a)]}{p_i - q_i} \quad (2.8)$$

Analisando-se as formulações apresentadas para a determinação do índice concordância parcial c_j , observa-se que nos casos em que os valores de p e q são iguais a zero (critério puro) ou iguais entre si, o valor de c_j será sempre igual a zero (0) ou um (1). Caso isso não ocorresse, haveria uma indeterminação no cálculo de c_j , pois o denominador da equação apresentada seria igual a zero.

O modelo definido como “critério puro” ou “critério verdadeiro” corresponde ao caso em que $p = q = 0$. O modelo geral, em que $q \geq 0$ e $p \geq 0$, é denominado “pseudocritério”. Os dois outros casos possíveis são aqueles conhecidos como “semicritério”, em que $p = q$, e o “pré-critério”, em que $q = 0$ [125].

Os índices concordância global $C(a, b)$ dizem respeito, respectivamente às afirmativas, “a supera b” e “b supera a”, as quais são verdadeiras em todos critérios. Esses índices são obtidos por meio da Equação 2.9:

$$c(a, b) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i c_i(a, b)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2.9)$$

2.12.6 Índice de Discordância

Os índices de discordância $d_i(a, b)$ e $d_i(b, a)$ dizem respeito ao quanto se opõe respectivamente as afirmativas “a supera b” e “b supera a”, em cada critério. Para tal, é definido um limite chamado de veto, que uma vez excedido, rejeita a hipótese descrita.

O cálculo do índice de discordância $d_i(a, b)$ pode ser obtido da seguinte forma:

- Se $g_i(a) > g_i(b) - p_i$, então $d_i(a, b) = 0$
- Se $g_i(a) \leq g_i(b) - v_i$, então $d_i(a, b) = 1$
- Se $g_i(b) - v_i < g_i(a) \leq g_i(b) - p_i$, então $0 < d_i(a, b) < 1$ e $d_i(a, b)$ é calculado por meio de interpolação linear, de acordo com a expressão numérica:

$$d(a, b) = \frac{[g_i(b) - g_i(a)] - p_i}{v_i - p_i} \quad (2.10)$$

Os índices de discordância de critérios com sentido decrescente de preferência, são obtidas por meio das fórmulas:

- Se $g_i(a) \leq g_i(b) + p_i$, então $d_i(a, b) = 0$
- Se $g_i(a) > g_i(b) + v_i$, então $d_i(a, b) = 1$
- Se $g_i(b) + p_i < g_i(a) \leq g_i(b) + v_i$, então $0 < d_i(a, b) < 1$ e $d_i(a, b)$ é calculado por meio de interpolação linear, de acordo com a expressão numérica:

$$d(a, b) = \frac{[g_i(b) - g_i(a)] - p_i}{v_i - p_i} \quad (2.11)$$

2.12.7 Índice de Credibilidade

O índice de credibilidade é resultado do quanto uma alternativa a supera uma alternativa b de acordo com os índices de concordância global $C(a, b_n)$ e de discordância $d_j(a, b_n)$. Ele é representado por $\delta_j(a, b_n)$; e, de forma semelhante, $\delta_j(b_n, a)$.

Para Figueira *et al.* [123] sempre que uma alternativa for comparada a um perfil de referência b_n , a alternativa a será destinada à categoria onde aSb_n obtiver credibilidade. O índice de credibilidade define o PAMC do método ELECTRE TRI.

Caso não existam critérios discordantes, o índice de credibilidade $\delta(b_n, a)$ será idêntico ao índice de concordância global $C(a, b_n)$. Se um critério for discordante, o índice de credibilidade será nulo, significando que a hipótese aSb_n não é verdadeira.

Na ocasião do conjunto de critérios cujo índice $d_i(a, b_n)$ supera o índice $C(a, b_n)$, o índice de credibilidade $\delta(b_n, a)$ é obtido por meio da Equação 2.12:

$$\delta(a, b_n) = C(a, b_n) \times \prod \frac{1 - d_i(a, b_n)}{1 - C(a, b_n)} \quad (2.12)$$

2.12.8 Nível de Corte

Após definido o índice de credibilidade deve-se ser incluído um modelo de nível de corte. De acordo com Figueira *et al.* [123] esse modelo traduz o menor valor que o índice de credibilidade $\delta(a, b_n)$ pode assumir para afirmar aSb_n . Sua relação de preferência será obtida por meio da comparação δ e λ , onde o valor assumido deve estar entre 0,5 e 1. A Figura 2.20 detalha as relações de preferência descritas:

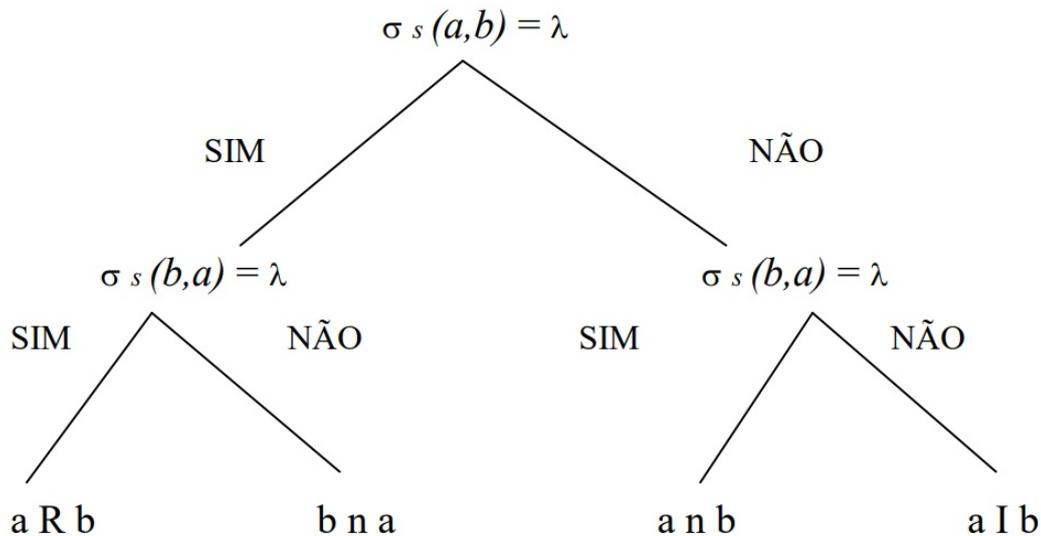


Figura 2.20: Relações entre δ e λ . Fonte: Gomes, 2009 [93].

Realizadas as relações de preferência, de indiferença e de incomparabilidade, as alternativas a e os perfis de referência b_n podem se relacionar da seguinte forma [123]:

- $aIb \leftrightarrow aSb$ e bSa
- $a>b \leftrightarrow aSb$ e não bSa
- $b>a \leftrightarrow$ não aSb e bSa
- $aRb \leftrightarrow$ não aSb e não bSa

Ao utilizar um valor elevado de α para diminuir as incertezas, aumenta-se a ocorrência de incomparabilidade. Isto porque aumentam-se os índices de credibilidade $\delta(a, b_n)$ e $\delta(b_n, a)$ superando com menor frequência o nível de corte. No entanto, optando por diminuir o valor de α e reduzindo a exigência com as incertezas, elevam-se as ocorrências de indiferenças.

2.12.9 Procedimentos de Alocação

No método ELECTRE TRI, a forma de realizar a alocação é composta por dois processos: o pessimista e o otimista. A alocação é realizada de modo a traçar um comparativo entre a alternativa a àquelas de referência b_n para concluir a alocação a uma categoria.

Para o processo otimista, também chamado disjuntivo, realiza-se a comparação da alternativa a ao pior perfil de referência b_n . Depois para o próximo perfil até que se encontre um perfil b com índice de credibilidade superior ao nível de corte. Nesse instante, a alternativa a é alocada a uma categoria superior sugerida pelo perfil de referência b [109].

Já no processo pessimista, também chamado conjuntivo, realiza-se a comparação da alternativa a aos perfis de referência, iniciando pela melhor alternativa. Depois para o próximo perfil de referência de b_n até que o índice de credibilidade seja superior ao nível de corte. Nesse instante é alocada a à uma categoria inferior sugerida por esse perfil de referência [109].

De acordo com Scharli [109] é intuitivo que o procedimento pessimista seja mais exigente. Isso deve-se ao procedimento, uma vez que ele aloca a alternativa na categoria inferior a delimitada pelo perfil. Logo, podemos compreender o procedimento otimista como menos rigoroso, uma vez que aloca as alternativas em categorias superiores. De modo que é natural usar do procedimento pessimista quando necessário tomar decisões mais conservadoras e lançar mão do procedimento otimista quando desejar explicitar as ações por suas qualidades [109].

É pertinente, ainda, frisar a importância do papel do nível de corte na categorização das alternativas, dado que se um valor for elevado, as alternativas serão destinadas a categorias mais baixas no procedimento pessimista e ao contrário no otimista.

É prudente portanto que o tomador de decisão compare ambos os procedimentos de alocação afim de escolher por aquele que terá menor chances de incorrer em falhas de categorização.

2.13 Abordagem Fuzzy MCDA

O objetivo de um processo de análise de decisão multicritério (MCDA) é estruturar e simplificar a tarefa de tomar uma decisão complexa, tão bem e tão facilmente quanto a natureza da decisão permitir [100]. A abordagem MCDA pressupõe que o apelo de uma alternativa depende da probabilidade das possíveis consequências a esta associadas, assim como com as preferências relativas às possíveis consequências.

A abordagem usual ou tradicional do MCDA exige valores únicos ou precisos para as diferentes entradas de modelo, ou seja, para os pesos, bem como para os desempenhos das alternativas em termos dos critérios identificados. No entanto, quando os dados disponíveis para a avaliação de riscos envolvem incertezas massivas, subjetividades, comparações imprecisas e incompletas ou, simplesmente, não existem, a adoção de uma abordagem menos exigente que não prescindia a efetividade e, ao mesmo tempo, mitigue conflitos cognitivos entre os decisores faz-se necessária. Nesse contexto, a utilização de números fuzzy permite lidar com a ambiguidade do processo de avaliação.

2.13.1 Teoria dos Conjuntos e Lógica Fuzzy

A Teoria dos Conjuntos Fuzzy (nebulosos ou difusos) manipula a incerteza e representa aspectos qualitativos por meios de palavras ou sentenças em uma linguagem natural, como por exemplo, probabilidade de falha alta, consequência baixa, risco médio, dentre outros permitindo a avaliação de conceitos não-quantificáveis.

A Lógica Fuzzy, que tem por base a Teoria de Conjuntos Fuzzy, foi desenvolvida a partir dos conceitos já estabelecidos da lógica clássica aristotélica. Tem como precursor o lógico polonês Jan Lukasiewicz (1878-1956), que, em 1920, apresentou as primeiras noções da lógica dos conceitos "vagos" mediante a introdução de conjuntos com graus de pertinência sendo 0, $\frac{1}{2}$ e 1, expandindo posteriormente este conjunto para um número infinito de valores compreendidos no intervalo entre 0 e 1.

Sua inserção no meio científico deu-se em 1965 por Lofti Asker Zadeh, professor de Ciências da Computação da Universidade da Califórnia, por meio da publicação do artigo *Fuzzy Sets* no *Journal of Information and Control* [126]. Nele, Zadeh combinava os conceitos da lógica clássica e os conjuntos de Lukasiewicz, formalizando conceitos e definindo de forma mais concreta os graus de pertinência.

Devido ao desenvolvimento e as inúmeras possibilidades práticas de suas aplicações, a Lógica Fuzzy é considerada hoje uma técnica *standard* com ampla aceitação em várias áreas, desde a teoria do controle à inteligência artificial, apresentando bons resultados na modelagem de risco qualitativo [127, 128, 129, 130].

2.13.1.1 Conjuntos Nebulosos

Na teoria clássica (desenvolvida por Aristóteles), os conjuntos são denominados *crisp* e um dado elemento do universo em discurso pertence ou não pertence ao referido conjunto. Já na teoria dos conjuntos nebulosos existe um grau de pertinência de cada elemento a um determinado conjunto, conforme ilustra a Figura 2.21.



Figura 2.21: Comparativo entre a Lógica Clássica e a Lógica *Fuzzy*. Fonte: Adaptado de Silva Júnior, 2015 [131].

Em outras palavras, a teoria dos conjuntos *fuzzy*, segundo Simões e Shaw [132], é baseada no fato de que os conjuntos existentes no mundo real não possuem limites precisos. De acordo com Belchior [133] um número *fuzzy* deve capturar a concepção intuitiva de números ou intervalos aproximados, tal como “valores que estão próximos de certo número real”, ou “valores que estão em torno de um dado intervalo de números reais”, a partir das variáveis linguísticas.

Com os conjuntos nebulosos podemos definir critérios e graus de pertinência para tais situações. A função característica (*crisp sets*) pode ser generalizada de modo que os valores designados aos elementos do conjunto universo U pertençam ao intervalo de números reais de 0 a 1 inclusive, isto é $[0,1]$.

$$\mu_A : U \mapsto [0, 1] \tag{2.13}$$

Estes valores indicam o *Grau de Pertinência* dos elementos do conjunto U em relação ao conjunto A , isto é, quanto é possível para um elemento x de U pertencer ao conjunto A .

A função definida na Equação 2.13 é chamada de *Função de Pertinência* e o conjunto A é definido como *Conjunto Nebuloso*.

2.13.1.2 Operações com Conjuntos Nebulosos

Segundo Simões [132], Moré [134], Abar [135] e Boente [136], as operações com conjuntos *fuzzy* ou nebulosos podem ser assim apresentadas:

- O conjunto *fuzzy* A é um subconjunto de um conjunto *fuzzy* B se o grau de pertinência de cada elemento do conjunto universo U no conjunto A é menor ou igual que seu grau de pertinência no conjunto B ; ou seja, para todo $x \in U$, $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ e indicamos $A \subseteq B$;
- Os conjuntos *fuzzy* A e B são iguais se $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ para todo elemento $x \in U$ e indicamos $A = B$;
- Os conjuntos *fuzzy* A e B são diferentes se $\mu_A(x) \neq \mu_B(x)$ para no mínimo um $x \in U$ e indicamos $A \neq B$;
- O conjunto *fuzzy* A é um subconjunto próprio do conjunto *fuzzy* B quando A é um subconjunto de B e $A \neq B$, isto é, $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ para todo $x \in U$ e $\mu_A(x) < \mu_B(x)$ para no mínimo um $x \in U$ e indicamos $A \subset B$ se e somente se $A \subseteq B$ e $A \neq B$;
- O complemento de um conjunto *fuzzy* A em relação ao conjunto universo U é indicado por A' e a função de pertinência é definida como $\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$ para todo $x \in U$;
- A união de dois conjuntos *fuzzy* A e B é um conjunto *fuzzy* $A \cup B$ tal que para todo $x \in U$ $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$;
- A intersecção de dois conjuntos *fuzzy* A e B é um conjunto *fuzzy* $A \cap B$ tal que para todo $x \in U$ $\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$.

Para Moré [134] e Boente [136], a teoria dos conjuntos *crisp* contém três operações básicas: complemento, intersecção e união; sendo baseada nos conceitos de pertinência, ou não, de um elemento aos conjuntos. Conforme estudo, as operações *fuzzy* (complemento, intersecção e união) constituem uma estrutura bastante consistente da teoria dos conjuntos nebulosos, para a extensão de conjuntos nítidos onde, a partir dessas operações padrões, são utilizados os operadores min (mínimo) e max (máximo) para a intersecção e a união de conjuntos *fuzzy*, respectivamente.

2.13.1.3 Agregação de Conjuntos Nebulosos

A ideia principal do processo de agregação é obter-se um grau de consenso entre as informações disponíveis, calculando-se um valor final. Se estes dados forem extraídos de especialistas, então ter-se-á a taxa de aceitação ou rejeição entre eles, isto é, o grau pelo qual especialistas concordam em suas estimativas, tornando possível a elaboração de classificações das avaliações realizadas [136].

2.13.1.4 Números Fuzzy

O número *fuzzy* é um caso especial de conjunto *fuzzy* que define um intervalo *fuzzy* nos números reais, \mathbf{R} . Para um número real cujo valor preciso não é conhecido com exatidão, este número é definido através de um intervalo *fuzzy*.

Moré [134] e Boente [136] afirmam que os números *fuzzy*, são utilizados para quantificar atributos físicos da realidade que estão associados à imprecisão ou mesmo a conceitos humanos vagos. Em princípio um número *fuzzy* \tilde{N} representa um conjunto *fuzzy* convexo e normalizado definido no conjunto dos números reais \mathbf{R} , tal que sua função de pertinência tem a forma $\mu_A : \mathbf{R} \mapsto [0, 1]$.

Neste viés, a qualificação de um número *fuzzy*, um conjunto *fuzzy* \tilde{A} em \mathbf{R} deve ao menos possuir as seguintes propriedades [133]:

- \tilde{A} deve ser um conjunto fuzzy normalizado;
- \tilde{A}_α deve ser um intervalo fechado para todo $\alpha \in (0, 1)$, isto é, todo número fuzzy é convexo;
- O suporte de \tilde{A} deve ser limitado.

Um número triangular *fuzzy* ou número *fuzzy* triangular, ilustrado na Figura 2.22, é dado a partir do número central onde se encontra o seu antecedente e seu conseqüente tomando como base o processo de discretização *fuzzy* [136].

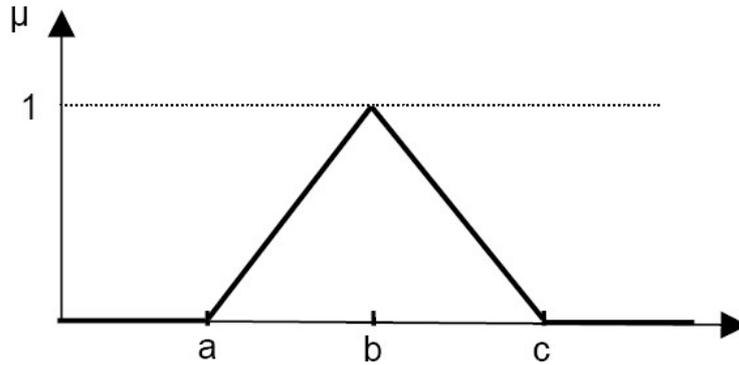


Figura 2.22: Representação de um número *fuzzy* triangular. Fonte: Boente, 2013 [136].

2.13.1.5 Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Sua principal função é fornecer uma maneira sistemática de aproximação de fenômenos complexos ou mal definidos [137]. De acordo com Boente [136] a partir das variáveis linguísticas, consideradas variáveis qualitativas, com o uso da lógica *fuzzy*, pode-se transformar valores não mensuráveis matematicamente em variáveis quantitativas para que se possa realizar cálculos a fim de mensurar certa aplicação.

Em sua argumentação Boente [136] esclarece que por meio da representação matemática de um conjunto ordenado de conceitos da linguagem natural através de conjuntos *fuzzy*, a discretização *fuzzy* A_1, A_2, \dots, A_n do universo U tal que $\forall x \in U, \exists A_i, \mu_{A_i}(x) \neq 0$ pode gerar a Figura 2.23, que apresenta um exemplo de discretização *fuzzy* para o caso de uma variável dividida em cinco conjuntos nebulosos.

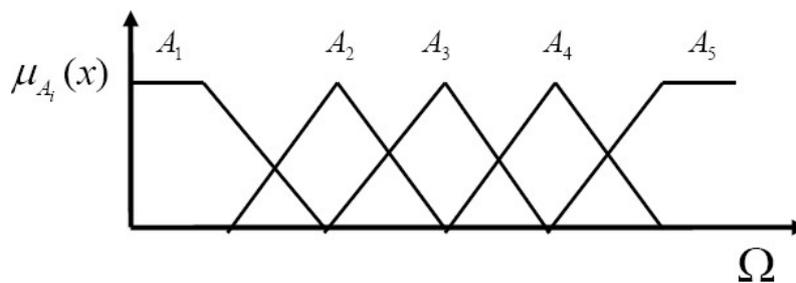


Figura 2.23: Discretização *fuzzy* para uma variável dividida em cinco conjuntos *fuzzy*. Fonte: Boente, 2013 [136].

Conclui o autor que a representação da informação em diversos níveis de generalização é permitida por meio de diferentes discretizações do universo. Portanto, quanto maior o número de conjuntos nebulosos, maior será a precisão encontrada.

2.13.1.6 Sistemas Fuzzy

Um sistema *fuzzy* pode ser descrito como um conjunto de regras de lógica *fuzzy*, ou como um conjunto de equações relacionais *fuzzy* [132].

Segundo Boente [136], um sistema *fuzzy* típico é composto de entrada, fuzzificação, base de regras, procedimentos de inferência, defuzzificação e saída. Para um sistema *fuzzy* uma entrada tanto pode ser um valor preciso quanto um conjunto *fuzzy*. Quando a entrada provém de um observador humano ou de uma base de dados (questionário) é frequentemente considerada como um conjunto *fuzzy*. Já a entrada derivada de um processo de medição é normalmente utilizada como um valor numérico com erros intrínsecos [138]. A Figura 2.24 ilustra a arquitetura funcional genérica de um sistema de inferência *fuzzy*.

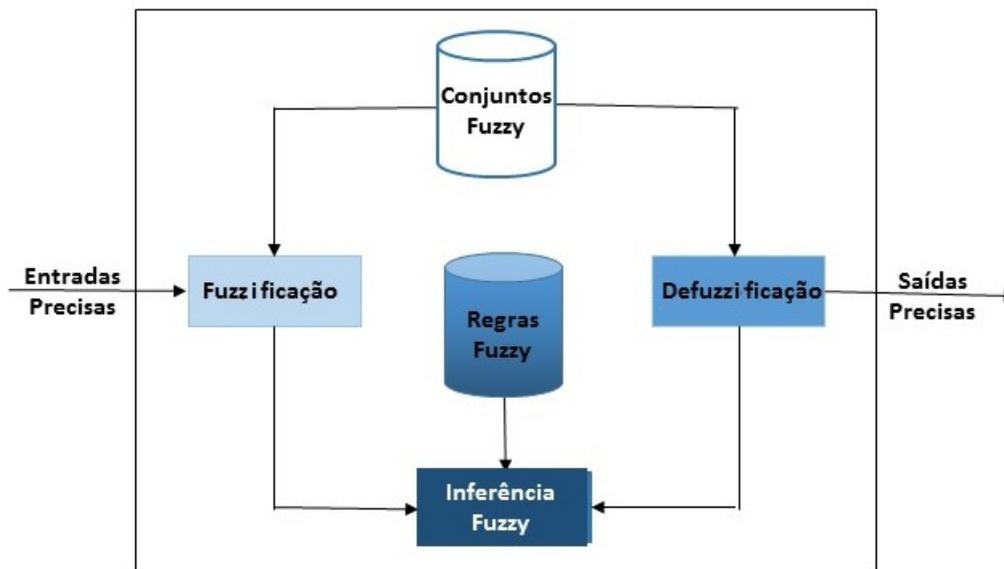


Figura 2.24: Arquitetura Funcional Genérica de um Sistema de Inferência *Fuzzy*. Fonte: Adaptado de Boente, 2013 [136].

Na fuzzificação, o vetor de pertinências de entrada é calculado a partir do valor numérico de entrada e da discretização *fuzzy* de entrada. A partir do processo de fuzzificação um número *fuzzy* é gerado, independentemente de sua estrutura, se triangular, gaussiano, cauchiano, sigmóide, trapezoidal, dentre outros, por exemplo, onde através do qual o vetor de pertinências é calculado a partir do valor numérico de entrada e da discretização *fuzzy* [139].

A inferência é realizada mapeando-se valores linguísticos de entrada em valores linguísticos de saída com o uso da base de regras. Após o processo de fuzzificação deve-se fazer o processo de defuzzificação, que pode ser definido como uma função que associa, a cada conjunto *fuzzy*, um elemento (do conjunto abrupto subjacente) que o represente

[138]. A defuzzificação não é exatamente o processo inverso da fuzzificação, conforme se pode constatar a partir de sua definição.

No processo de defuzzificação, segundo Simões e Shaw [132], o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy* é traduzido num valor discreto, o qual será identificado como valor *crisp*.

O valor *crisp*, portanto é o resultado do processo de defuzzificação onde, com o qual, pode-se realizar operações matemáticas reais, obedecendo seu valor limite, considerado o valor máximo adquirido por uma representação *fuzzy*, ou seja, altura um [139].

2.13.2 Exemplos de Aplicações do Fuzzy MCDA Considerando o Fator de Risco

Como visto, há um vasto rol de problemas onde a avaliação das alternativas, por meio de uma variável quantitativa exata, é uma tarefa difícil para o decisor, mesmo com a utilização e adaptação de métodos de decisão multicritério. Nesse contexto a teoria dos conjuntos *fuzzy* pode ser utilizada como forma de incorporar as incertezas relacionadas às avaliações subjetivas e a estruturação de problemas de caráter ambíguo.

Independentemente da origem da imprecisão, a análise *fuzzy* não necessita de avaliações quantitativas das alternativas [140]. Suas performances, em cada critério, assim como os pesos dos critérios, podem ser mensuradas por termos linguísticos. Sua utilização tem sido bastante difundida, sendo desenvolvidas diversas abordagens para diferentes contextos.

Dentre as diversas abordagens *fuzzy* encontradas na literatura, pode-se citar o problema estudado por Czyzak & Slowinski, em 1996, [141] que utilizou a abordagem de sobreclassificação *fuzzy* para solução do problema de ordenação.

Em 2000, Belacel [142] propôs um método multicritério de classificação *fuzzy*, chamado PROAFTN, aplicado em estudos clínicos para identificação de diversos subtipos de leucemias agudas.

Também em 2000, Goumas e Lygerou [143] utilizaram o método F-PROMETHEE, uma extensão *fuzzy* do PROMETHEE convencional, para a seleção de projetos de exploração de recursos energéticos.

Huang *et al.* [144], no ano de 2008, realizaram um estudo de aplicação do método *fuzzy* AHP para a escolha de projetos de pesquisa e desenvolvimento em Taiwan.

Chen e Wang [145] realizaram em 2009 um estudo para a estimativa de riscos em projetos internacionais de construção de companhias chinesas. Inicialmente os riscos foram classificados hierarquicamente e posteriormente um modelo de índice de riscos foi definido

para estimar os efeitos de fontes de riscos e incertezas em projetos de construção. Para estimar o peso de cada risco, foi escolhido o método *fuzzy* AHP.

Amiri [146] propôs, em 2010, a utilização combinada dos métodos AHP e *fuzzy* TOPSIS para efetuar a seleção de projetos. O método AHP foi usado para analisar a estrutura do problema de seleção de projeto e para determinar os pesos dos critérios, sendo o método *fuzzy* TOPSIS usado para obtenção do ranking final.

Hatami-Marbini & Tavana [147] propuseram um método de sobreclassificação *fuzzy* alternativo, estendendo o método ELECTRE I (utilizando o método da distância de Hamming para comparar ações) a fim de incorporar o caráter vago e impreciso de avaliações linguísticas.

Recentemente, em 2014, Taylan *et al.* [148] estudaram os fatores-chave de risco associados a projetos de construção em uma universidade da Arábia Saudita e avaliaram os projetos da instituição de acordo com seus riscos. Para realizar essa tarefa, foi utilizada a integração dos métodos *fuzzy* AHP, *fuzzy* TOPSIS e a regra max-min de inferência.

Capítulo 3

Procedimentos e Métodos

Um conhecimento é classificado como científico quando repousa em bases sólidas e seguras, capazes de assegurar certezas e verdades indubitáveis [149].

O conhecimento científico é factual, privilegia o pensamento crítico e analítico. Tem como base a verificabilidade, exigindo demonstração das operações mentais e técnicas que possibilitam a sua comprovação, ou seja, o método que possibilitou a produção do conhecimento [150, p. 8].

Dependendo da existência de uma base de dados, a avaliação do risco pode ser realizada mediante métodos quantitativos ou qualitativos [130]. Em uma avaliação de risco quantitativo, a probabilidade de ocorrência de um evento (neste caso, não desejado) é avaliada por meio da submissão da informação disponível na base de dados a um modelo analítico que a quantifica. No entanto, conforme esclarece Alvino [130], na maioria dos casos, obter o modelo analítico torna-se complicado devido à complexidade na modelagem, às incertezas existentes, à falta de conhecimento, dentre outros.

No caso de uma análise de risco qualitativa a medição da probabilidade é avaliada de forma subjetiva, valendo-se da opinião de um especialista. Neste caso, explica Alvino, o especialista, para reduzir a incerteza da sua avaliação, consulta operadores, revisa a documentação disponível, a literatura sobre casos similares, assim por diante.

A avaliação do risco qualitativo requer pouca informação se comparada à forma quantitativa [130]. Além disso, o tempo investido para obter os resultados é muito menor. Geralmente a avaliação do risco qualitativo é considerada como risco relativo. Isto significa que sua avaliação somente tem sentido se comparada com outras avaliações feitas de maneira similar.

Com os resultados da avaliação do risco qualitativo pode-se ordenar os eventos, para conhecer-se o evento mais crítico, e então, realiza-se para este evento uma avaliação de risco quantitativo.

Ao explicar os aspectos que diferenciam a abordagem qualitativa da quantitativa, Bauer e Gaskell [151], destacam que muitos esforços foram despendidos na tentativa de justapor tais tratamentos como paradigmas competitivos, o que, na visão desses não é possível, uma vez que não há quantificação sem qualificação, bem como não há análise estatística sem interpretação.

Portanto, por oferecerem recursos metodológicos com diferentes perspectivas para a realização de estudos, abordagens qualitativas e quantitativas não necessariamente são excludentes ou representam pólos opostos, devendo ser utilizadas de forma independente ou complementar quando da necessidade de entender e mensurar fatos.

Surge então uma terceira abordagem para avaliação do risco, a semiquantitativa ¹, que aproveita as vantagens das duas metodologias que a originaram. Nela, as variáveis mantêm sua natureza durante sua avaliação. Se a variável é do tipo quantitativo será avaliada mediante a forma quantitativa e se for do tipo qualitativo será avaliada mediante a forma qualitativa.

Sendo essa abordagem, como consequência da estruturação da REN 696/2015 - ANEEL, identificada como a mais adequada para atingimento dos objetivos propostos. Nela os fatores do tipo quantitativo ou qualitativo, serão representados mediante a forma aproximada ou subjetiva, dependendo das informações e dados disponíveis, em diferentes níveis de refinamento.

A seguir apresentam-se as atividades que foram realizadas em cada etapa da pesquisa para atingimento dos objetivos propostos, tendo como referência o Processo Multicritério de Apoio à Decisão proposto na Seção 2.10, na página 56 deste estudo.

1. Identificação do problema

- a. Identificação da atual conjuntura das barragens objeto de estudo em termos de Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) com base nos regulamentos vigentes;
- b. Realização de conversas / entrevistas com pessoas chaves (especialistas) relacionadas ao problema para determinação de limites e fontes de dados para formulação do modelo; e
- c. Coleta de dados.

2. Estruturação do problema

¹Em análises semiquantitativas, atribui-se valores às escalas qualitativas. Não é necessário que o número atribuído a cada descrição corresponda exatamente à magnitude real das consequências ou probabilidade. Os números podem ser combinados de acordo com qualquer série de fórmulas, desde que o sistema utilizado para a priorização se ajuste ao sistema escolhido para atribuir números e combiná-los. O objetivo dessa análise é produzir uma priorização mais detalhada do que aquela normalmente obtida em uma análise qualitativa, e não sugerir valores absolutos como se pretende com a análise quantitativa.

- a. Realização de revisão bibliográfica e documental sobre Gestão de Risco em Segurança de Barragens no Sistema Elétrico Brasileiro e também em outros contextos, com o objetivo de conhecer a metodologia de tratamento dos dados;
- b. Identificação de fatores de risco ou condições claras, precisas e ostensivas que permitissem a elaboração de eventos de referência para a avaliação da segurança de barragens condizentes com o cenário previamente identificado; e
- c. Identificação com base em revisão bibliográfica do Método de Apoio à Decisão de melhor aplicabilidade ao problema estudado.

3. Construção do modelo

- a. Especificação da estrutura do modelo, regras de decisão;
- b. Seleção das alternativas a serem avaliadas; e
- c. Definição dos critérios, perfis de categorias e de desempenho quanto ao risco associado.

4. Análise de resultados

- a. Análise das restrições e ajustes no modelo de classificação;
- b. Verificação da consistência do modelo com a realidade observada, com apoio dos especialistas; e
- c. Validação os fatores de risco selecionados por meio de entrevistas com demais técnicos do setor.

5. Desenvolvimento de estratégias ou planos de ação

- a. Projeto e análise de cenários por evento de referência;
- b. Construção de Matriz de Classificação dos Riscos; e
- c. Envolvimento das partes interessadas na identificação de novas regras e estratégias de decisão a serem aplicadas no mundo real.

Dessa forma, pode-se inferir que a lógica de pesquisa é mista, dotada de natureza indutiva em sua etapa de estruturação, onde são utilizadas as premissas contidas no arcabouço legislativo vigente e os dados coletados pelos agentes, a partir de observações e avaliação da realidade. Já na fase de avaliação, a lógica é empregada é de natureza dedutiva, onde, a partir do modelo construído, buscam-se estabelecer conclusões particulares.

3.1 Finalidade da Pesquisa

Primeiramente, cabe diferenciar a pesquisa pura da pesquisa aplicada. A pesquisa pura tem por objetivo o progresso da ciência e o desenvolvimento dos conhecimentos científicos sem a preocupação direta com suas aplicações e consequências prática. Propósito esse diferente da pesquisa aplicada que, apesar de apresentar características de uma pesquisa pura, tem como característica fundamental a sua aplicabilidade [150, p. 26-27]. Estabelecida esta diferenciação, esclarece-se que a pesquisa aqui desenvolvida se insere, em termos de finalidade, no âmbito das pesquisas aplicadas.

Sob o ponto de vista da formulação de políticas públicas baseadas em evidências, este trabalho dedica-se à estruturação de um processo de inteligência analítica que possibilite maior eficácia e eficiência na tomada de decisão, ante a necessidade de priorização de ações e otimização de recursos.

3.2 Tipo de Pesquisa

No que diz respeito à natureza, a pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso exploratório, que tem por objetivo aumentar a experiência em torno da análise de risco relacionada ao tema segurança de barragens, propondo soluções adequadas para o aperfeiçoamento desse.

Nesse contexto, a despeito de sua abordagem semiquantitativa, enquanto sistemática de investigação qualitativa, destaca-se a condição do pesquisador como observador participante, dada a sua condição de especialista responsável pela estruturação do processo de monitoramento e fiscalização de empreendimentos hidrelétricos em termos de segurança e condições de operação e manutenção. Sendo este responsável de forma ativa pela coleta e guarda dos dados utilizados neste trabalho.

De acordo com Evertson [152] e Vogt [153] o Método da Observação Participante é especialmente apropriado para estudos exploratórios, estudos descritivos e estudos que visam a generalização de teorias interpretativas. Habitualmente recorre-se à Observação Participante com o propósito de elaborar, após cada sessão de observação, descrições “qualitativas”, de tipo “narrativo”, que permitem obter informação relevante para a investigação em causa, seja essa, conforme exemplificam Monico *et al.* [154] uma formulação de hipóteses de investigação, um auxílio à elaboração ou adaptação de teorias explanatórias, ou concepção de escalas de medida dos constructos em análise.

Assim dada a natureza do estudo e da atividade desenvolvida pelo pesquisador (fiscalizatória/regulatória), a nota de campo surge como ferramenta importante na observação participante evidenciando a documentação escrita produzida por esse [155].

Considerando o objetivo 3, que trata da validação dos valores de risco pelos agentes detentores de barragens, reconhece-se, também, uma componente descritiva, a qual mediante a identificação de situações, eventos, atitudes ou opiniões de certa população, descreve a distribuição de algum fenômeno na população ou entre os subgrupos que a compõem.

Portanto conclui-se ser esta pesquisa um estudo de caso exploratório descritivo com abordagem semiquantitativa.

3.3 Caracterização do Objeto de Estudo e Delimitação do Universo de Pesquisa

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabeleceu 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. A regulamentação da referida lei com as especificidades do setor elétrico, cuja competência recai sobre a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, deu-se por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 696 – REN 696/2015, de 15 de dezembro de 2015.

A REN 696/2015 - ANEEL definiu os critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança, Inspeção Regular, Inspeção de Segurança Especial e Revisão Periódica de Segurança dos barramentos, assim como delimitou quais são as barragens de aproveitamentos hidrelétricos enquadradas pelas disposições regulatórias da Agência.

Considerando essas premissas, identifica-se como objeto de estudo as barragens enquadradas pelas disposições regulatórias da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, avaliadas e classificadas quanto à segurança conforme critérios estabelecidos na Resolução Normativa nº 696, de 15 de dezembro de 2015. Isto é, arranjos outorgados que, conforme discutido na página 49, Seção 2.7, apresentem pelo menos uma das seguintes características:

1. Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m;
2. Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m^3 (três milhões de metros cúbicos); e
3. Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

O que abrange, de acordo com o registro de resultados referente ao ciclo avaliativo 2017-2018 [156], um conjunto de 890 estruturas de barramento, cuja distribuição quanto à classificação de risco pode ser observada na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Classificação Quanto ao Risco - REN 696/2015

Região Geográfica	Classificação			
	A	B	C	NE
Centro-Oeste	2	66	26	54
Nordeste	-	29	3	11
Norte	-	96	9	21
Sudeste	3	232	21	83
Sul	4	87	38	105
Total	9	510	97	274

Fonte: Autor

Dessas, 7 (sete) barragens receberam classificação A por não envio de informações. A Classificação NE representa a condição de Não Enquadramento nos requisitos da REN 696/2015, condição que isenta o empreendimento do cumprimento de um conjunto de obrigações e disposições regulamentares.

Considerando o grau intrínseco de subjetividade inerente aos modelos de análise multicritério e objetivando garantir um bom nível de sensibilidade ao modelo, o universo de pesquisa foi delimitado considerando os empreendimentos que foram objeto de ação de fiscalização presencial. Essa abordagem permitiu a confrontação das respostas obtidas com os comportamentos observados em campo, bem como simplificou o processo de análise crítica dos resultados pelos técnicos e especialistas consultados, possibilitando um maior número de contribuições.

A delimitação do universo de pesquisa também foi ponderada quanto a diferenciação conjuntural existente entre as diversas tecnologias construtivas empregadas nas centrais hidrelétricas (concreto, enrocamento, terra) e as diferentes categorias de geradores (serviço público, autoprodutor ou produtor independente).

Cada estrutura de barragem e seu sítio geotécnico, tem uma impressão digital [12]. Barragens semelhantes passam por processos construtivos diversos. Em termos de porte ², a Resolução Normativa ANEEL nº 745, de 22 de Novembro de 2016, estratifica as usinas hidrelétricas em três categorias: pequeno, médio e grande, associadas ao seu tamanho e capacidade de geração, obedecendo as seguintes características:

²Os aproveitamentos de potencial hidrelétrico são classificados com base em um conjunto de variáveis interdependentes: altura da queda d'água, vazão, capacidade ou potência instalada, tipo de turbina empregada, localização, tipo de barragem e reservatório, sendo esses fatores interdependentes. A altura da queda d'água e a vazão dependem do local de construção e determinarão qual será a capacidade instalada, que, por sua vez, determinará o tipo de turbina, barragem e reservatório.

- **Central Geradora Hidrelétrica - CGH:** Usinas com potência instalada³ de até 5 MW;
- **Pequena Central Hidrelétrica - PCH:** Usinas com potência instalada entre 5 MW e 30 MW e com área de reservatório de até $13km^2$; e
- **Usina Hidrelétrica - UHE:** Usinas com potência instalada superior a 30 MW.

Assim, considerando o porte e a tecnologia construtiva, o portfólio de empreendimentos selecionados para o aprimoramento de técnicas e ferramentas do processo de monitoramento de barragens obedeceu a distribuição apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Distribuição das Barragens Selecionadas para Avaliação

		Região Geográfica					
		N	NE	CO	SE	S	Total
CGH	Ter/Enr	0	0	0	0	0	0
	Concreto	0	1	0	0	0	1
PCH	Ter/Enr	4	2	0	0	2	8
	Concreto	1	1	0	2	3	7
UHE	Ter/Enr	7	3	11	3	2	26
	Concreto	1	1	1	3	2	8
Total		13	8	12	8	9	50

Fonte: Autor

³Leia-se potência instalada como a quantidade de energia gerada por hora de funcionamento com a hidrelétrica operando na sua capacidade máxima.

A qual é visualizada no mapa da Figura 3.1:

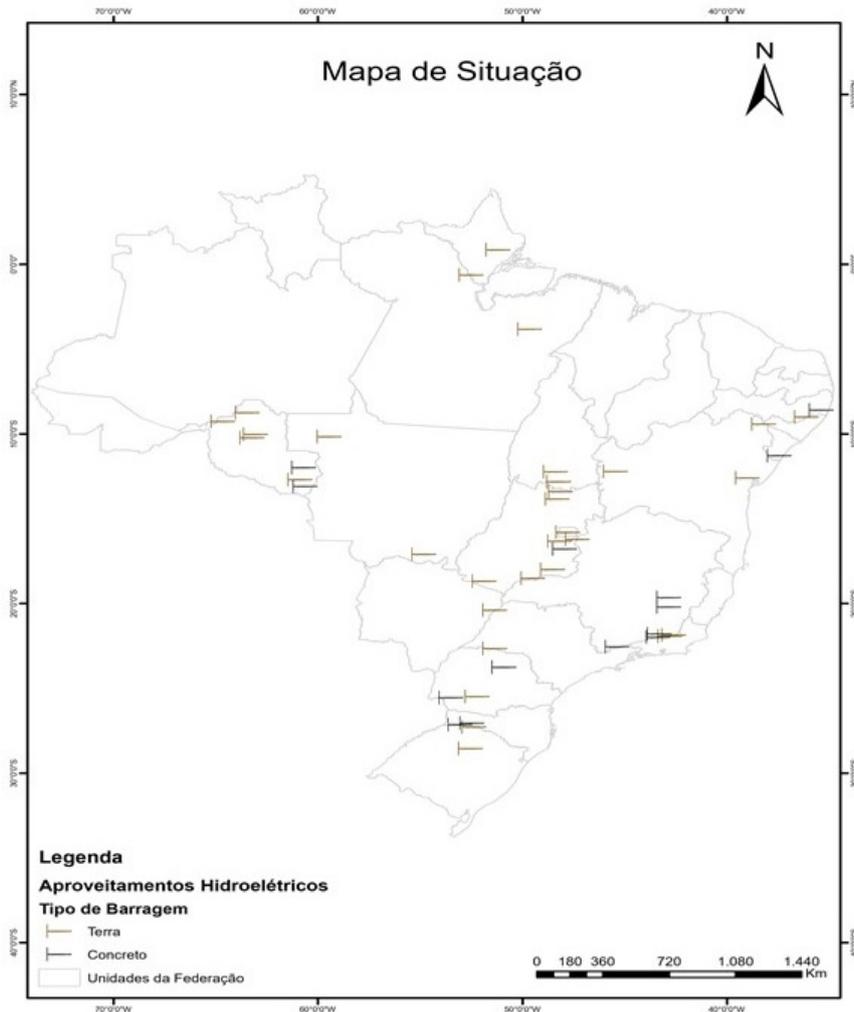


Figura 3.1: Distribuição Geográfica das Barragens Seleccionadas. Fonte: Autor.

Das 890 barragens inicialmente mapeadas 460 estão associadas a PCH's, 392 a UHE's e 38 a CGH's. Comparando-se as duas distribuições, atribuindo-se um valor específico por categoria para cada tipo de estrutura (1- PCH, 2 - UHE e 3 - CGH) e aplicando-se o Teste t presumindo variâncias equivalentes, obtém-se o valor de 2.18023, com um *p-valor* de 0.04736, considerado significativo para $p < 0.05$, conforme demonstrado na Figura 3.2.

Barragens				Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
Categoria	Descrição	Objeto	Seleção		Universe	Seleção
1	PCH	460	15	Média	452.6666667	28.66666667
2	UHE	784	68	Variância	112265.3333	1196.333333
3	CGH	114	3	Observações	3	3
				Variância agrupada	56730.83333	
				Hipótese da diferença de média	0	
				gl	4	
				Stat t	2.180227958	
				P(T<=t) uni-caudal	0.047360184	
				t crítico uni-caudal	2.131846786	
				P(T<=t) bi-caudal	0.094720368	
				t crítico bi-caudal	2.776445105	

Figura 3.2: Resultados para o Teste T de Student. Fonte: Autor

A relação de usinas selecionadas, identificadas pelo seu Código dos Empreendimentos de Geração - CEG pode ser visualizada no Anexo I deste documento. Os empreendimentos selecionados sujeitam-se a práticas de gestão operação e manutenção diferenciadas, decorrentes da cultura organizacional das empresas e regimes de outorga aos quais estão submetidas.

3.4 Fontes de Informações e Dados

Para atendimento aos objetivos da REN 696/2015, a Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Geração – SFG, da ANEEL, desenvolveu o Formulário de Segurança de Barragens – FSB. Esse formulário coleta informações encaminhadas pelos agentes acerca das características que definem a classificação das barragens em termos de Categoria Risco e de Dano Potencial Associado, conforme Anexo II da REN 696/2015 - ANEEL.

As informações recebidas compõem uma base de dados destinada a dar suporte ao processo de Monitoramento da Campanha de Fiscalização de Segurança de Barragens. O tratamento dessas determina obrigações acessórias que devem ser observadas pelos agentes de geração, notadamente aquelas associadas à elaboração do Plano de Segurança, Inspeção de Segurança Regular e Plano de Ação de Emergência e respectivos prazos.

Os contornos gerais desta pesquisa e respectivas áreas em que se divide, uma relativa categorização das barragens quanto a natureza do risco, outra que objetiva a validação dos fatores de risco associados às barragens por intermédio da realização de um estudo de opinião, obriga a adoção de procedimentos distintos, que atendam as especificidades de cada caso, conforme detalhado a seguir.

3.4.1 Quanto à Classificação das Barragens

A natureza dos dados utilizados no estudo de classificação das barragens é primária, sendo estes oriundos do modelo dimensional ⁴ desenvolvido para armazenar e tratar as respostas obtidas por meio da aplicação dos Formulários de Segurança de Barragens - FSB aos agentes de geração hidrelétrica. O FSB consiste em questionário elaborado pela ANEEL, de acordo com as informações das matrizes de classificação definidas pela REN 696/2015 - ANEEL⁵, que tem por objetivo facilitar o recebimento e a organização dos dados de autotranscrição das barragens.

Mediante utilização de técnicas de ETL (do inglês, *Extract, Transform and Load*) os dados foram movimentados do Banco de Dados Dimensional para uma planilha eletrônica, de modo que pudessem ser tratados e analisados através da aplicação da teoria dos conjuntos *fuzzy*. Quando da verificação de inconsistências, os dados foram complementados por informações extraídas dos registros documentais das ações de fiscalização remotas e presenciais realizadas pela Agência.

A partir destas informações avaliou-se o grau de risco dos empreendimentos selecionados, bem como o nível de concordância dos agentes de geração quanto aos fatores de risco propostos pela atual legislação.

3.4.2 Quanto à Validação dos Fatores de Risco com Técnicos do Setor

Com base em levantamento realizado nos FSB's foram identificados 155 técnicos/especialistas diretamente associados a pelo menos uma das 890 estruturas de barramento mapeadas, na condição de responsável pela elaboração dos planos de segurança e de contingência para atendimento às situações emergenciais. Para esses foi encaminhado um questionário (ver Anexo IV), contendo 9 questões, que teve por objetivo de avaliar o grau de concordância desses especialistas com os fatores de risco estabelecidos pela Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012.

A pesquisa teve a duração de 45 dias. Do universo de 155 questionários encaminhados, 57 foram devolvidos respondidos, sendo 35 (trinta e cinco) em sua totalidade. Considerando os parâmetros de determinação do tamanho da amostra para variáveis qualitativas em populações finitas, dado pela fórmula:

⁴ De acordo com Ralph Kimball [157, p. 22], modelagem dimensional é uma técnica de design de banco de dados projetada para suportar consultas de *end-users* em um *Data Warehouse*. Para sistemas de processamento analítico, o grande volume de dados necessários para consultas de planejamento tático e estratégico devem ser processados de forma rápida.

⁵Disponível para consulta no Centro de Documentação da Agência Nacional de Energia Elétrica, ou por meio do endereço: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca>

$$e = z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p} \cdot \hat{q}}{n}} \cdot fc \quad (3.1)$$

onde:

- e = valor da margem de erro;
- $N = 155$, correspondente ao tamanho da população;
- $n = 35$, tamanho da amostra, considerando-se apenas os formulários totalmente respondidos;
- $z = 1,28$, correspondente ao nível de confiança de 80% padronizado pelo desvio padrão;
- \hat{p} , a proporção amostral, que estima a verdadeira proporção populacional p ;
- \hat{q} , o complemento da proporção de uma amostra; e
- fc , o fator de correção para populações finitas dado por $\sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$.

Considerando-se $\hat{p} \cdot \hat{q} = 0,25$, tem-se uma amostra com erro estimado de 9,52% para um nível de confiança de 80%,

3.5 Ferramentas Computacionais Aplicadas

Posteriormente às etapas de levantamento documental, realização das entrevistas e coleta de dados, utilizou-se o software *Excel* da Microsoft, versão 365, para o manuseio, tratamento, limpeza, remoção de valores distorcidos e correção de inconsistências identificadas. Para construção do modelo de análise e classificação multicriterial com aplicação de teoria de conjuntos *fuzzy* utilizou-se a linguagem *Python* na versão 3.7.0 e como ambiente de desenvolvimento o editor *Sublime Text 3*. Em termos de bibliotecas de processamento foram utilizados os pacotes *xlrd 1.2.0*, *xlwt 1.3.0* e *NumPy 1.16.0*. Demais módulos são de desenvolvimento próprio. Os algoritmos do modelo são apresentados nos Apêndices A e B deste trabalho.

O *Python* é uma linguagem de programação modular de altíssimo nível (VHLL - *Very High Level Language*), orientada a objetos caracterizada por sua sintaxe simples e de fácil utilização. Possui suporte à orientação a objetos e uma aritmética com arranjos multidimensionais. Devido às suas características, é principalmente utilizada para processamento de textos, dados científicos e criação de CGI's para páginas dinâmicas para a *web*, adequando-se assim, às necessidades de integração à realidade corporativa a qual este pesquisador está inserido.

3.6 Limitações e Restrições do Estudo

Os seguintes aspectos, com suas respectivas justificativas, não foram realizados nessa pesquisa. Não sendo, portanto, escopo deste trabalho:

- Definição de Políticas para Mitigação, redução ou eliminação do Risco, tendo em vista já estarem essas estabelecidas nos normativos legais vigentes;
- Avaliar os impactos monetários dos riscos nos empreendimentos; e
- Elaboração de estratégias para a mitigação dos riscos e planos contingenciais. A pesquisa limitou-se a fornecer um instrumento para a identificação e classificação de riscos, e não executar o processo de gestão de risco nas estruturas avaliadas;

Diferentemente dos dados colhidos para validação dos Fatores de Risco, os dados utilizados para a Classificação das Barragens foram extraídos do repositório de dados da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, construído a partir das informações coletadas mediante a aplicação de formulários autodeclaratórios a toda sua base de agentes fiscalizados. A técnica de coleta empregada pela Agência, entretanto, impõem algumas restrições ou limitações quanto a sua qualidade.

Isso porque informações de natureza autodeclaratória, mesmo devidamente tratadas, podem incorrer em erros de seleção adversa e risco moral⁶. Tais limitações, eventualmente podem resultar em falsos-positivos e falsos-negativos que somente serão equacionados mediante estressamento do modelo.

⁶Em teoria econômica e dos contratos, caracteriza-se a ocorrência de assimetria de informação quando as duas partes de um negócio não possuem as mesmas informações sobre o objeto da negociação. Essa assimetria cria um desequilíbrio de poder nas transações, sendo o risco moral e a seleção adversa duas das possíveis consequências dessa condição. A seleção adversa verifica-se quando os compradores "selecionam" de maneira incorreta determinados bens e serviços no mercado, em virtude da assimetria informacional existente. Já o risco moral ocorre quando um agente econômico assume uma posição mais arriscada do que deveria, porque uma possível consequência negativa de sua decisão será arcada por um outro agente.

Capítulo 4

Modelo Proposto

A análise de decisão consiste no desenvolvimento e na aplicação de metodologias e técnicas estabelecidas com base em sólida fundamentação teórica, para ajudar a melhorar a tomada de decisões em situações que envolvem problemas complexos, estabelecendo prioridades em contextos diversos, quais sejam: avaliação de alternativas, alocação de recursos, negociação de objetivos múltiplos, incerteza, risco. Este capítulo apresenta e discute o modelo para avaliação de riscos em segurança de barragens, como também apresenta a síntese dos resultados obtidos através da pesquisa de campo, documental e do referencial teórico, organizado em seções referenciadas aos objetivos específicos da pesquisa.

4.1 Descrição do Modelo Proposto

Acidentes com barragens, apresentam com frequência consequências de diversas dimensões, implicando em riscos que devem ser estimados e para os quais medidas atenuantes devem ser empregadas. Nesse contexto, de modo preventivo, assumem importância metodologias para avaliação, qualificação e, em especial, de quantificação desse risco.

Entretanto, conforme visto na Seção 2.2, além de ambiguidade existente nos conceitos de risco, observa-se nesses casos uma limitação inerente a essas metodologias tanto no que diz respeito à consideração das múltiplas dimensões que os impactos de acidentes com barragens podem assumir, como no apoio a processos decisórios envolvendo planejamento, prevenção, supervisão e manutenção de atividades mitigadoras de risco.

Dessa forma, para um tratamento adequado do problema, faz-se necessário o uso de uma abordagem objetiva que seja capaz de tratar estas múltiplas dimensões, classificando-as segundo níveis hierárquicos de risco. Dentre as abordagens que se propõem a tratar deste tipo de problema, destacam-se os métodos para o tratamento da problemática de classificação pertencentes à família ELECTRE, como o ELECTRE TRI.

Por fazer uso de uma lógica não compensatória, O ELECTRE TRI permite, para o problema em questão, uma abordagem que evita suposições rígidas. Além disso, a partir do estudo de relações de sobreclassificação entre alternativas e perfis de referência, explora noções de concordância e discordância entre critérios de forma a tornar possível a comparação e classificação dessas alternativas em categorias de risco pré-definidas pelo decisor.

Tal abordagem possibilita um tratamento mais detalhado e uma maior riqueza de informações do que a dicotomia aceitável-não aceitável dos métodos de avaliação tradicionais.

A Tabela 4.1 apresenta um quadro comparativo entre a problemática da classificação de riscos e os problemas de decisão contemplados pelo ELECTRE TRI.

Tabela 4.1: ELECTRE TRI *vs* Riscos

	ELECTRE TRI	Riscos
Objetivo	Classificação de alternativas	Classificação de eventos
Tipos de variáveis	Subjetivas	Subjetivas
Elemento que julga	Decisor	Especialistas

Fonte: Costa *et al.*, 2007 [158]

Onde se verifica o estabelecimento de correspondência entre as duas abordagens. Ambas tem por princípio o alcance de uma classificação. A classificação dos eventos, no entanto, tem sua complexidade amplificada face a indisponibilidade de dados estatísticos. Em seu lugar são utilizadas variáveis de natureza subjetivas, uma vez que o risco de segurança associado às barragens é mensurado em termos de fatores causadores de falha estabelecidos em lei, que são julgados por um especialista ou decisor.

Essa aproximação foi adotada por Freitas e Costa [159], H. G. Costa *et al.* [158] e Queiroz [109]. A primeira investigou a integração do AMD a qualidade dos serviços, a segunda a integração do AMD a riscos industriais, enquanto a terceira, via AMD, analisou os principais contratos comerciais de uma empresa do ramo de terceirização, com o objetivo de classificá-los quanto ao grau de risco associado.

A análise dos diversos aspectos da Lei nº 12.334/2010 desenvolvida no decorrer deste trabalho, conduz à conclusão de que os critérios estabelecidos por essa têm por base aspectos de representação imprecisos, compostos, em sua maioria, por conceitos subjetivos, inconsistentes, vagos e de avaliação não trivial.

Assim, previamente à aplicação do método ELECTRE TRI, de modo a promover uma maior assertividade ao modelo, utilizou-se da teoria dos conjuntos *fuzzy*, partindo-se da premissa que por meio desses é possível definir construtos que mensurem apropriadamente o universo de barragens previamente estabelecido, no que diz respeito aos seus aspectos de segurança, conforme diagrama da Figura 4.1.

A Figura 4.1 apresenta o modelo de decisão proposto, o qual associa regras *fuzzy* ao método de decisão multicritério ELECTRE TRI para o problema de avaliação e classificação de barragens de aproveitamento hidrelétrico em termos dos riscos de segurança a elas impostos.

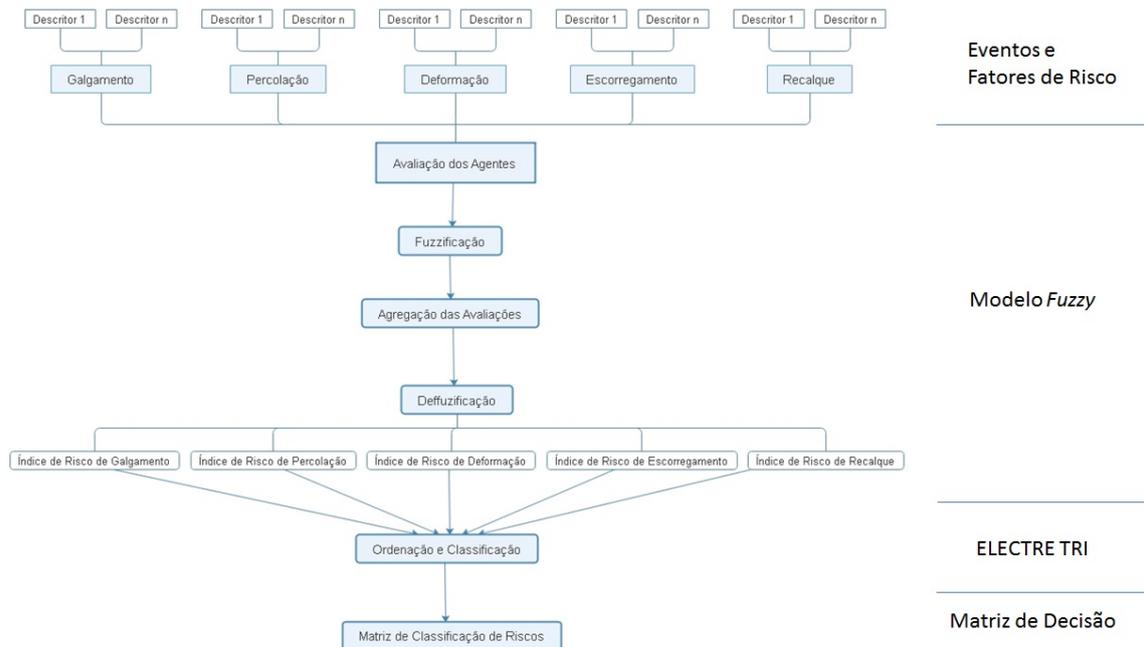


Figura 4.1: Modelo de Avaliação Proposto. Fonte: Autor.

Uma vez definidos os principais eventos de risco em barragens, associam-se a esses os fatores de risco (descritores) correspondentes, observando-se os requisitos regulamentarmente pré-estabelecidos (Seção 4.2.1). Em seguida inicia-se a aplicação do Modelo *Fuzzy*, no qual, por barragem, cada fator de risco é avaliado quanto a sua criticidade com base em uma escala de importância. Concluídas as avaliações, a imprecisão e subjetividade dessas é traduzida em conjuntos *fuzzy* ((Seção 4.3.2.1 a Seção 4.3.2.4). A agregação das avaliações ocorre, no processo de fuzzificação, mediante utilização de média *fuzzy* (Seção 4.3.2.5). O valor representativo (número real quantificável) por cada conjunto *fuzzy* é obtido durante o processo de defuzzificação (Seção 4.3.2.5), no qual obtém-se os índices de risco por tipo de evento que servem de entrada para etapa seguinte, de aplicação do método ELECTRE TRI (Seção 4.3.3), onde as barragens são ordenadas e classificadas quanto ao risco de segurança, dando origem a uma Matriz de Decisão (Seção 4.3.5).

Sendo este modelo adaptado do tratamento adotado por Boente [136] na avaliação de satisfação de usuário do Produto de *Software* AVA utilizado pelo IST-Rio. A modelagem do problema deu-se tendo como elementos-chave os seguintes atores: decisor, analista e especialista, sobre os quais, na definição de Almeida [64], atribuem-se os seguintes papéis:

- **Decisor:** É o responsável pela decisão e possui poder sobre a medida adotada, correspondente, para o caso em análise, ao superintendente de área.
- **Analista:** Responsável por fornecer suporte metodológico ao processo decisório. Exercendo na maioria das vezes o papel de trabalhar a compreensão dos atores da decisão, representado na pessoa deste pesquisador.
- **Especialista:** Trata-se do profissional que reconhece no sistema o seu: comportamento, mecanismo ou variáveis relacionadas ao problema capaz de influenciar a decisão em estudo. Sendo, para essa condição, identificados três profissionais diretamente envolvidos nas ações de avaliação das condições de segurança dos barramentos.

4.2 Objetivo Específico 1: Identificar os Fatores de Risco Associados aos Padrões de Segurança Regulatoriamente Reconhecidos e às Anomalias Observadas em Barragens

Uma legislação voltada à segurança de barragens tem por objetivo criar mecanismos legais que favoreçam o aumento das condições de segurança dessas estruturas, independentemente de sua utilização. A consulta à legislação internacional permite constatar que, as classificações comumente englobam critérios como:

- Altura (com relação ao nível da terra ou da fundação);
- Nível de água;
- Volume do reservatório;
- Comprimento da crista; e
- Mapa de inundação.

Esse último não é aplicado no Brasil. Os critérios são utilizados para definir o escopo e âmbito de aplicação das legislações podendo, posteriormente, serem complementadas pela classificação por perigo. De modo geral, as classificações baseadas no risco estudadas nesta pesquisa mostraram-se apropriadas para graduar o nível das exigências quanto ao controle de segurança e medidas de proteção civil a serem impostas pelas regulamentações de segurança de barragens.

Entretanto deve-se destacar que, para que haja cultura de segurança de barragens a existência de legislação por si não é suficiente. Conforme observado na legislação internacional, faz-se necessário que entidades fiscalizadoras hajam com independência, tenham recursos adequados, sejam dotadas de corpo técnico capacitado e em número compatível com o universo de barragens a ser fiscalizado dentro de suas atribuições.

Nesse contexto o papel dos reguladores é de extrema importância para efeito de pacificação e definição de práticas seguras de gerenciamento ao:

- Estabelecer uma base de dados sobre todas as barragens;
- Manter avaliação independente da performance dos dados dos proprietários e dos projetistas de barragens;
- Viabilizar a pesquisa e o desenvolvimento entre os proprietários detentores desses empreendimentos; e
- Revogar legislações que são incompatíveis com as boas práticas.

De modo que estas sejam adotadas e seguidas pela sociedade.

4.2.1 Definição dos Eventos e Fatores de Risco

O processo de identificação e definição dos eventos de risco deu-se sob supervisão dos especialistas, tendo como fundamento as pesquisas sobre os principais modos de ruptura (eventos) em barragens de terra/enrocamento (Tabela 2.4, Tabela 2.5) e concreto (Tabela 2.6), cujas principais estatísticas foram apresentadas na Seção 2.5, na página 34 deste estudo.

Para as barragens de Terra / Enrocamento foram escolhidos três modos (tipos) de ruptura: *galgamento*, *percolação* e *deformação*. Para as barragens de concreto foram identificados como modos de ruptura principais os eventos resultantes de *escorregamento* e *recalque*, sendo este último também considerado relevante para barragens de Terra / Enrocamento.

A Tabela 4.2 apresenta, os eventos selecionados para avaliação de risco em barragens e sua respectiva descrição.

Tabela 4.2: Eventos Selecionados para Avaliação do Risco da Barragem

Código do Critério	Evento/Critério	Modo de Ruptura Principal	Definição
1	Galgamento	Barragem de Terra / Enrocamento	O galgamento ou <i>overtopping</i> é o transbordar da água por cima da barragem. Pode ser analisado como um fenômeno hidrológico. Ocorre quando o vertedouro não tem capacidade suficiente para dar vazão de forma segura ao volume excedente de água para um tempo de recorrência predefinido. Na prática da engenharia da barragem não é aceito em nenhuma condição que as barragens de terra sofram o galgamento.
2	Percolação	Barragem de Terra / Enrocamento	Também conhecido como <i>piping</i> ou erosão regressiva. Consiste em processo de erosão interna ocasionado devido a saída de partículas finas do solo sob o efeito das forças de fluxo. Difere da erosão superficial onde se consegue observar o carreamento do solo. Uma das principais causas da percolação reside na inadequação da compactação das camadas do maciço associada à inadequação do material utilizado. As barragens não são obras destinadas a impedir totalmente a passagem de água por suas fundações ou pelos aterros. A percolação de certa quantidade de água é inevitável e, até certo ponto, desejável. [86]
3	Deformação	Barragem de Terra / Enrocamento	Corresponde a uma mudança dimensional que se verifica na barragem em função da carga extrema (solicitação) aplicada. A deformação resulta na variação da forma ou das dimensões potencializando os efeitos de recalque e o risco de galgamento. Sua ocorrência é extremamente sensível em barragens de terra que, por sua flexibilidade, sujeitam-se a maiores deformações. A análise da fundação nas barragens de enrocamento, por exemplo, é fundamental para determinação das deformações que podem ocorrer no enrocamento e na face impermeabilizante, pois elas podem recalcar e acentuar as deformações do maciço.
4	Escorregamento	Barragem de Concreto	Escorregamentos, deslizamentos, rastejos e quedas, são alguns dos termos utilizados para descrever movimentos de massa que ocorrem em encostas de solos e/ou rochas sob a ação da gravidade e geralmente potencializado pela ação da água. Ocorre quando as tensões cisalhantes ultrapassam a resistência ao cisalhamento dos materiais componentes do aterro ou do terreno natural.
5	Recalque	Barragem de Concreto / Terra / Enrocamento	Diz respeito ao fenômeno de movimentação vertical do maciço, sendo uma das principais causas de trincas e rachaduras na estrutura de barragem, principalmente quando ocorre o recalque diferencial (ou assentamento). Tal termo descreve o fenômeno que ocorre quando uma parte da obra rebaixa mais que outra gerando esforços estruturais não previstos, aumentando a ocorrência de trincas. A movimentação em si é normalmente considerada normal, até certo valor, o qual pode-se prever em estudos na fase de projeto. A partir daí, podem ocorrer deslocamentos de camadas ou em encontros de estruturas e materiais diferentes, o que poderá representar perigo para a Segurança da Barragem.

Fonte: Autor.

Em termos de caracterização dos eventos, buscou-se, com base nos requisitos estabelecidos na Lei nº 12.334/2010 e na REN 696/2015 - ANEEL, identificar os fatores de risco vinculados às principais anomalias percebidas quando do processo de ruptura de uma

barragem. Apesar de não exaustivos, os fatores de risco elencados foram considerados suficientes para construção de um perfil adequado em termos de avaliação.

A Tabela 4.3 apresenta, os eventos selecionados associados aos seus respectivos critérios de avaliação (fatores de risco), identificados pela codificação estabelecida na REN 696/2015 - ANEEL.

Tabela 4.3: Fatores de Risco Associados aos Eventos

Evento	Fator de Risco	Descritor REN 696/2015 - ANEEL
Galgamento	Confiabilidade das Estruturas Extravasoras	H
	Vazão de Projeto	F
	Regra Operacional dos Dispositivos de Descarga	Q
	Deformações e Recalques	K
	Tipo de Fundação	D
Percolação	Tipo de Fundação	D
	Altura	A
	Percolação	J
	Relatórios de Inspeção	R
	Documentação de Projeto	N
Deformação	Tipo de Fundação	D
	Altura	A
	Tipo de Barragem	C
	Deterioração de Taludes	L
	Idade da Barragem	E
Escorregamento	Deterioração de Taludes	L
	Deformações e Recalques	K
	Percolação	J
	Documentação de Projeto	N
	Confiabilidade das Estruturas Extravasoras	H
Recalque	Tipo de Fundação	D
	Altura	A
	Tipo de Barragem	C
	Deformações e Recalques	K
	Idade da Barragem	E

Fonte: Autor.

Cuja influência varia conforme tipo de evento analisado. Sendo esta composição definida posteriormente, na etapa de estabelecimento das variáveis linguísticas integrantes do modelo (Seção 4.3.2.1, página 99)

4.3 Objetivo Específico 2: Categorizar Quanto à Natureza do Risco, Barragens Seleccionadas por Equipe Especialista, Mediante Associação de Método de Apoio Multicritério à Decisão

4.3.1 Aplicação do Modelo

A Figura 4.2 apresenta o fluxograma do processo contendo os passos necessários para consolidação do modelo *fuzzy* proposto e sua integração enquanto MCDA para análise dos riscos envolvidos.

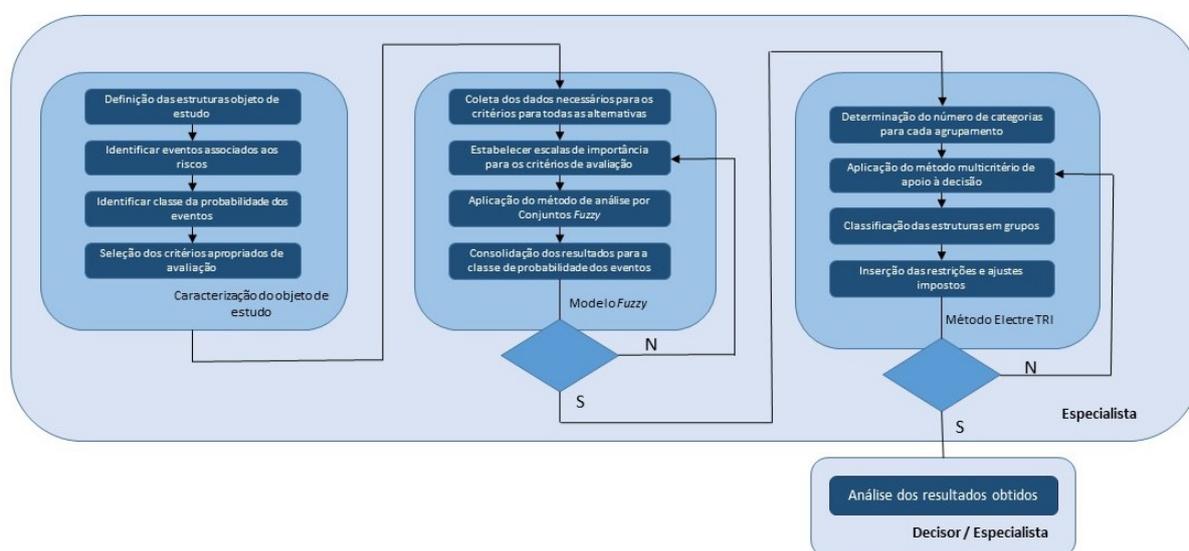


Figura 4.2: Fluxograma de estruturação para Classificação de Barragens quanto ao Risco. Fonte: Autor.

4.3.2 Aplicação do Modelo Fuzzy

O modelo *fuzzy* ilustrado na Figura 4.1 envolve construtos referentes aos eventos elencados na seção 4.2.1. Sua aplicação desenvolveu-se ao longo de cinco etapas, detalhadas a seguir:

4.3.2.1 Primeira etapa: Determinação das variáveis linguísticas do modelo

Para definição das variáveis linguísticas (fatores de risco), consideraram-se os levantamentos estatísticos e a revisão de legislação apresentadas nas seções 2.5 e 2.6 desta pesquisa. Também se consideraram de modo recorrente as opiniões dos especialistas da Agência que elaboraram os FSB's ou atuaram em campanhas de fiscalização relacionadas ao tema de

estudo. Ao todo foram selecionados 12 fatores de risco associados aos eventos (anomalias) escolhidos, conforme discriminado anteriormente na Tabela 4.2.

Para determinação dos parâmetros de ponderação desses, considerou-se a opinião particular dos especialistas. Os fatores de risco tiveram seu percentual de importância alocado, por evento, de modo obter somatório igual a 1, supondo-se a não-nulidade para cada fator.

Dada a característica amodal observada na maioria das respostas, bem como sua uniformidade em termos de distribuição, os resultados foram agregados mediante aplicação de média simples, conforme exposto na Tabela 4.4. A utilização de média ponderada como métrica do nível de importância dos especialistas envolvidos foi afastada, tendo em vista o fato do nível de conhecimento desses quanto ao tema pesquisado ser similar.

Tabela 4.4: Determinação do Coeficiente de Importância das Variáveis Linguísticas

Evento	Variável Linguística / Fator de Risco	Descr. REN 696/2015	Especialista			
			E01	E02	E03	Média
Galgamento	Confiabilidade das Estruturas Extravasoras	H	0,30	0,25	0,35	0,30
	Vazão de Projeto	F	0,30	0,40	0,20	0,30
	Regra Operacional dos Dispositivos de Descarga	Q	0,20	0,25	0,15	0,20
	Deformações e Recalques	K	0,10	0,05	0,15	0,10
	Tipo de Fundação	D	0,10	0,05	0,15	0,10
Percolação	Tipo de Fundação	D	0,35	0,30	0,25	0,30
	Altura	A	0,25	0,15	0,20	0,20
	Percolação	J	0,25	0,25	0,25	0,25
	Relatórios de Inspeção	R	0,10	0,20	0,15	0,15
	Documentação de Projeto	N	0,05	0,10	0,15	0,10
Deformação	Tipo de Fundação	D	0,40	0,30	0,20	0,30
	Altura	A	0,20	0,20	0,20	0,20
	Tipo de Barragem	C	0,10	0,15	0,05	0,10
	Deformações e Recalques	L	0,25	0,30	0,35	0,30
	Idade da Barragem	E	0,05	0,05	0,20	0,10
Escorregamento	Deterioração de Taludes	L	0,40	0,30	0,35	0,35
	Deformações e Recalques	K	0,25	0,30	0,20	0,25
	Percolação	J	0,10	0,20	0,15	0,15
	Documentação de Projeto	N	0,15	0,10	0,20	0,15
	Confiabilidade das Estruturas Extravasoras	H	0,10	0,10	0,10	0,10

Fonte: Autor.

Considerando as particularidades do evento recalque, descritas na Tabela 4.2, foi decidido pelos especialistas que este deveria ser tratado de forma a distinta dos demais eventos, atribuindo-se ponderação diferenciada às suas variáveis linguísticas, de acordo com a natureza do barramento avaliado, segundo registrado na Tabela 4.5:

Tabela 4.5: Determinação do Coeficiente de Importância das Variáveis Linguísticas de Recalque

Evento	Barramento	Variável Linguística / Fator de Risco	Descr. REN 696/2015	Especialista			
				E01	E02	E03	Média
Recalque	Terra / Enrocamento	Tipo de Fundação	D	0,25	0,25	0,25	0,25
		Altura	A	0,30	0,30	0,15	0,25
		Tipo de Barragem	C	0,05	0,10	0,15	0,10
		Deformações e Recalques	K	0,35	0,30	0,25	0,30
		Idade da Barragem	E	0,05	0,05	0,20	0,10
	Concreto	Tipo de Fundação	D	0,35	0,35	0,20	0,30
		Altura	A	0,20	0,30	0,25	0,25
		Tipo de Barragem	C	0,20	0,20	0,20	0,20
		Deformações e Recalques	K	0,20	0,05	0,20	0,15
		Idade da Barragem	E	0,05	0,10	0,15	0,10

Fonte: Autor.

A consolidação dessas avaliações é exibida na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Variáveis Linguísticas do Modelo

Efeito	Variável Linguística / Fator de Risco	Média	
		Terra / Enrocamento	Concreto
Galgamento	Confiabilidade das Estruturas Extravasoras	0,30	
	Vazão de Projeto	0,30	
	Regra Operacional dos Dispositivos de Descarga	0,20	
	Deformações e Recalques	0,10	
	Tipo de Fundação	0,10	
Percolação	Tipo de Fundação	0,30	
	Altura	0,20	
	Percolação	0,25	
	Relatórios de Inspeção	0,15	
	Documentação de Projeto	0,10	
Deformação	Tipo de Fundação	0,30	
	Altura	0,20	
	Tipo de Barragem	0,10	
	Deterioração de Taludes	0,30	
	Idade da Barragem	0,10	
Escorregamento	Deterioração de Taludes	0,35	
	Deformações e Recalques	0,25	
	Percolação	0,15	
	Documentação de Projeto	0,15	
	Confiabilidade das Estruturas Extravasoras	0,10	
Recalque	Tipo de Fundação	0,25	0,30
	Altura	0,25	0,25
	Tipo de Barragem	0,10	0,20
	Deformações e Recalques	0,30	0,15
	Idade da Barragem	0,10	0,10

Fonte: Autor.

4.3.2.2 Segunda etapa: Escolha dos termos linguísticos a serem utilizados

No que diz respeito à construção de uma gradação acessível de importância de critérios, Miller [160] explana que o julgamento subjetivo representado por uma escala simples de cinco níveis, que sejam capazes de emitir as preferências de um decisor, é entendido

como razoável. Como exemplo sugere uma representação escalar que parta de um nível importância desprezível (0) e progrida até um grau de importância extrema (4).

Em consonância com a argumentação de Miller, buscando delimitar o quão presente estão os fatores de risco, para avaliação do grau de presença das variáveis linguísticas selecionadas, foram adotados cinco termos linguísticos. A Tabela 4.7 relaciona esses termos e a sua importância no contexto do modelo.

Tabela 4.7: Graus de presença dos fatores de risco relacionados à Segurança de Barragens

Equivalência	Descrição
Trivial	Indica um grau de presença tolerável do fator de risco avaliado. Apesar de não ser necessária qualquer ação específica, devem ser consideradas medidas preventivas não muito dispendiosas para evitar que o risco se agrave.
Baixa presença	Indica um grau de presença moderada do fator de risco avaliado. Não é necessário melhorar a ação preventiva. No entanto, são necessárias verificações periódicas para assegurar a eficiência das medidas de controle.
Moderadamente presente	Indica um grau de presença moderada do fator de risco avaliado. Deve-se fazer esforços na redução do risco. As medidas para redução desse devem ser implementadas num período determinado. Quando o risco moderado está associado a consequências extremamente prejudiciais, será necessário estabelecer medidas para controlar esse risco.
Altamente presente	Indica um alto grau de presença do fator de risco avaliado, mas não de forma plena. Os esforços para redução devem ser intensificados, objetivando a remediação do problema num período de tempo inferior ao dos riscos moderados.
Totalmente presente	Indica que não há dúvidas de que o critério está totalmente presente. Esta situação equivale à exposição a um risco grave e iminente.

Fonte: Autor.

As matrizes de avaliação estabelecidas pela REN 696/2015 - ANEEL, reproduzidas no Anexo II deste documento, constituem a base metodológica fundamental para a determinação da categoria de risco das barragens de acumulação de água utilizadas em processos de geração de energia elétrica.

Conforme pode ser observado no Anexo, as pontuações definidas na Resolução, de forma geral, têm sua gradação distribuída em escalas ordinais, crescentes, com 5 níveis classificação e intervalos variáveis. Nesse contexto, utilizou-se a escala de termos linguísticos para padronizar os escores atribuídos aos barramentos por seus respectivos detentores.

Assim, para cada fator de risco e sua respectiva escala, adotou-se o menor grau de importância para o menor escore possível, promovendo-se a evolução do grau de importância de modo gradativo mediante aumento da pontuação obtida por fator de risco. Em harmonia com a Tabela 4.7, foi adotado como fator inicial de escala a representação 1 (um), subentendendo-se a noção de existência de fator de risco residual, não nulo (zero).

4.3.2.3 Terceira Etapa: Criação das funções de pertinências para os termos *fuzzy* apresentados

Para representar de maneira objetiva as incertezas das avaliações linguísticas presentes nas opiniões dos detentores de barragens, atenuando seus efeitos e considerando sua eficiência em termos de processamento computacional [161], foram adotados números *fuzzy* triangulares.

Números *fuzzy* triangulares constituem conjuntos que capturam as concepções intuitivas de números ou intervalos aproximados [162], [163]. Assim, são utilizados quando o parâmetro em análise possui uma faixa de variação e um número dentro desta faixa possui uma possibilidade de ocorrência num único pico maior do que os outros [162]. Ao se considerar, por exemplo, uma escala de 1 a 5, um atributo de uma heurística quando avaliado como importante vai assumir valores próximos de 2, então o conjunto *fuzzy* relevante pode ser representado no intervalo [1,3]. Nesse intervalo, os valores 1 e 3 possuem pertinência mínima ao triângulo *fuzzy* enquanto o valor 2 terá pertinência máxima ao triângulo.

A Figura 4.3 exibe a representação gráfica das funções de pertinência correspondentes aos conjuntos *fuzzy* escolhidos. Já a Tabela 4.8 apresenta os números triangulares *fuzzy* associados a esses conjuntos.

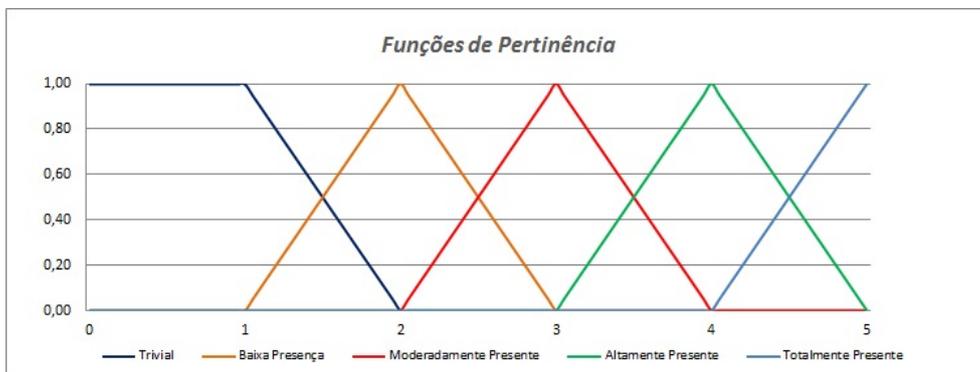


Figura 4.3: Conjuntos *fuzzy* dos termos relacionados aos graus de presença dos fatores de risco relacionados à Segurança de Barragens. Fonte: Autor.

Tabela 4.8: Conjuntos *Fuzzy* escolhidos e seus Números Triangulares *Fuzzy* correspondentes

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Nº Triangular <i>Fuzzy</i>	Grau de Presença
A	(1, 1, 2)	Trivial
B	(1, 2, 3)	Baixa Presença
C	(2, 3, 4)	Moderada Presença
D	(3, 4, 5)	Alta Presença
E	(4, 5, 5)	Total Presença

Fonte: Autor.

4.3.2.4 Quarta etapa: Aplicação dos conjuntos *fuzzy* na amostra definida

Nesta fase os conjuntos *fuzzy* definidos na etapa anterior foram aplicados à amostra selecionada. A Tabela 4.9 e a Tabela 4.10 apresentam, por natureza da barragem, os dados coletados e tabulados após aplicação dos conjuntos *fuzzy*.

Tabela 4.9: Resultados da Amostra Padronizada pelos Conjuntos *fuzzy* - Barragens de Terra / Enrocamento

Usinas	Galgamento				Percolação					Deformação					Escorregamento					Recalque					
	H	F	Q	K	D	D	A	J	R	N	D	A	C	L	E	L	K	J	N	H	D	A	C	K	E
528	A	A	A	B	E	E	D	B	A	B	E	D	C	B	D	B	B	B	B	A	E	D	C	B	D
630	A	A	A	A	B	B	D	A	A	A	B	D	C	A	B	A	A	A	A	A	B	D	C	A	B
657	A	A	A	B	B	B	C	B	A	B	B	C	C	A	A	A	B	B	B	A	B	C	C	B	A
783	B	A	A	B	E	E	C	A	B	C	E	C	C	B	A	B	B	A	C	B	E	C	C	B	A
866	A	A	A	A	A	A	D	A	A	B	A	D	C	A	B	A	A	A	B	A	A	D	C	A	B
898	A	A	A	A	C	C	B	A	A	A	C	B	C	B	C	B	A	A	A	A	C	B	C	A	C
908	A	A	A	A	A	A	C	A	A	B	A	C	C	A	B	A	A	A	B	A	A	C	C	A	B
1113	C	A	A	C	C	C	B	A	A	B	C	B	A	B	D	B	C	A	B	C	C	B	A	C	D
1120	A	A	A	B	B	B	D	B	A	B	B	D	C	B	A	B	B	B	B	A	B	D	C	B	A
1152	A	A	A	B	B	B	D	A	A	A	B	D	C	A	B	A	B	A	A	A	B	D	C	B	B
1510	B	A	A	B	B	B	B	A	A	C	B	B	C	A	A	A	B	A	C	B	B	B	C	B	A
1975	A	B	A	B	A	A	C	A	A	D	A	C	C	B	D	B	B	A	D	A	A	C	C	B	D
2176	A	A	A	B	D	D	D	C	A	A	D	D	C	B	B	B	B	C	A	A	D	D	C	B	B
2687	B	A	A	B	E	E	C	B	B	B	E	C	C	B	B	B	B	B	B	E	C	C	B	B	
2731	A	A	A	A	A	A	D	A	A	A	A	D	C	A	B	A	A	A	A	A	D	C	A	B	
2889	A	A	A	B	E	E	D	B	B	B	E	D	C	B	A	B	B	B	B	A	E	D	C	B	A
26701	A	A	A	A	C	C	A	A	C	D	C	A	C	A	B	A	A	A	D	A	C	A	C	A	B
26792	A	A	A	A	B	B	A	A	A	B	B	A	C	A	D	A	A	A	B	A	B	A	C	A	D
27050	A	A	A	B	B	B	C	B	A	B	B	C	C	A	A	A	B	B	B	A	B	C	C	B	A
27244	A	B	A	A	D	D	A	A	A	B	D	A	C	B	B	B	A	A	B	A	D	A	C	A	B
27795	A	A	A	A	D	D	D	A	A	A	D	D	C	A	B	A	A	A	A	A	D	D	C	A	B
28353	A	A	A	B	E	E	D	A	A	A	E	D	C	B	B	B	B	A	A	A	E	D	C	B	B
28557	A	D	A	A	A	A	B	A	A	B	A	B	C	A	D	A	A	A	B	A	A	B	C	A	D
28565	A	A	A	B	B	B	D	B	A	B	B	D	C	B	A	B	B	B	B	A	B	D	C	B	A
28567	A	A	A	B	C	C	C	A	A	A	C	C	C	A	C	A	B	A	A	A	C	C	C	B	C
29373	A	A	A	A	B	B	B	A	C	B	B	B	C	A	C	A	A	A	B	A	B	B	C	A	C
29434	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	A	A	C	B	D	B	A	B	B	A	A	A	C	A	D
29435	A	A	A	A	A	A	B	B	B	A	A	B	C	B	D	B	A	B	A	A	A	B	C	A	D
29436	A	A	A	A	A	A	B	B	B	A	A	B	C	B	D	B	A	B	A	A	A	B	C	A	D
29458	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	C	B	A	D	A	A	A	A	A	A	C	B	A	D
29597	B	A	A	A	E	E	B	B	A	B	E	B	C	B	C	B	A	B	B	B	E	B	C	A	C
29736	A	A	A	A	E	E	C	B	A	A	A	E	C	C	A	A	A	A	A	A	E	C	C	A	C
30385	A	A	A	B	C	C	B	A	A	B	C	B	C	B	D	B	B	B	B	A	C	B	C	B	D
30458	A	B	A	B	A	A	B	A	A	A	A	B	C	B	C	B	B	A	A	A	A	B	C	B	C

Fonte: Autor.

Tabela 4.10: Resultados da Amostra Padronizada pelos Conjuntos *fuzzy* - Barragens de Concreto

Usinas	Galgamento					Percolação					Deformação					Escorregamento					Recalque				
	H	F	Q	K	D	D	A	J	R	N	D	A	C	L	E	L	K	J	N	H	D	A	C	K	E
122	A	D	A	B	A	A	A	B	A	B	A	A	B	B	D	B	B	B	B	A	A	A	B	B	D
641	A	A	A	B	B	B	C	B	A	A	B	C	B	B	B	B	B	B	A	A	B	C	B	B	B
729	A	D	A	B	A	A	A	B	A	D	A	A	A	B	D	B	B	B	D	A	A	A	A	B	D
1420	C	D	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	B	B	D	B	A	A	B	C	A	A	B	A	D
2008	A	D	A	A	A	A	A	A	B	E	A	A	A	A	D	A	A	A	E	A	A	A	A	A	D
2070	A	A	A	A	A	A	C	A	B	C	A	C	B	A	D	A	A	A	C	A	A	C	B	A	D
2563	A	B	A	B	A	A	A	A	A	C	A	A	A	B	D	B	B	A	C	A	A	A	A	B	D
2591	A	A	A	B	A	A	D	B	A	B	A	D	B	B	B	B	B	B	B	A	A	D	B	B	B
2757	A	A	A	A	B	B	A	A	A	A	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A	B	A	A	A	B
27049	B	A	A	B	A	A	B	A	A	D	A	B	A	A	D	A	B	A	D	B	A	B	A	B	D
27114	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	A	A	A	A	D	A	A	A	C	A	A	A	A	A	D
27448	A	A	A	A	A	A	B	A	A	B	A	B	B	A	C	A	A	A	B	A	A	B	B	A	C
27963	A	D	A	A	A	A	A	B	C	C	A	A	B	C	B	C	A	B	C	A	A	A	B	A	B
28352	A	A	A	C	C	C	C	B	A	A	C	C	C	B	C	B	C	B	A	A	C	C	C	C	C
28354	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	C	C	A	C	A	A	A	A	A	C	C	C	A	C
28755	C	A	A	A	C	C	C	B	A	B	C	C	B	B	C	B	A	B	B	C	C	C	B	A	C

Fonte: Autor.

4.3.2.5 Quinta etapa: Tratamento dos dados

A agregação das avaliações *fuzzy* foi obtida através da fórmula da média *fuzzy*, implementada por meio de algoritmo implementado em linguagem *Python*, cujo código é apresentado no Apêndice A deste trabalho. Neste caso, considerou-se a avaliação *fuzzy* para cada fator de risco avaliado $(Aval)_{crit}$, ponderada pelo coeficiente de importância de cada um desses (w_{crit}) . Obtém-se assim os triângulos *fuzzy* agregados $(a, m, b)_{agreg}$, correspondentes ao Número *fuzzy* Triangular, calculados a partir da Equação 4.1:

$$(a, m, b)_{agreg} = \sum_{i=1}^{50} \sum_{j=1}^5 w_{crit} * (Aval)_{crit} \quad (4.1)$$

E exibidos na Tabela 4.11 e na Tabela 4.12.

Os três valores que formam cada triângulo *fuzzy* têm diferentes significados: o valor do extremo esquerdo representa o menor valor com a menor possibilidade de pertencer ao conjunto *fuzzy*; o valor central é o valor com maior possibilidade de pertencer ao conjunto *fuzzy* e o valor da extrema direita representa o maior valor com a menor possibilidade de pertencer ao conjunto *fuzzy*.

A partir da tabulação dos dados e cálculos dos seus respectivos números triangulares *fuzzy*, conforme apresentado na etapa anterior, faz-se necessário obter um valor preciso ou *crisp* representativo por cada conjunto *fuzzy*. Esse processo é conhecido tecnicamente conhecido como *defuzzificação*, ou seja, um único valor numérico discreto que melhor represente o valor *crisp* inferido das variáveis linguísticas. A realização da *defuzzificação* deu-se mediante aplicação da Equação 4.2:

$$V_{crisp} = \frac{(a, m, b)_{agreg}}{4} \quad (4.2)$$

Onde a , m e b correspondem aos valores do triângulo *fuzzy* obtido a partir da agregação das avaliações dos agentes de geração. Na Tabela 4.11 e na Tabela 4.12, os valores *crisp* são apresentados em coluna de mesmo nome.

Tabela 4.11: Números Fuzzy Triangulares *fuzzy* - Barragens de Terra / Enrocamento

Usinas	Galgamento			Percolação			Deformação			Recalque			Escorregamento							
	a	m	b	a	m	b	a	m	b	a	m	b	a	m	b					
528	1.30	1.50	2.40	1.68	2.30	3.15	3.85	3.11	2.60	3.60	4.30	3.53	2.60	3.60	4.35	3.54	1.00	1.90	2.90	1.93
630	1.00	1.10	2.10	1.33	1.40	1.90	2.90	2.03	1.50	2.20	3.20	2.28	1.55	2.25	3.25	2.33	1.00	1.00	2.00	1.25
657	1.00	1.20	2.20	1.40	1.20	2.05	3.05	2.09	1.30	1.90	2.90	2.00	1.30	2.15	3.15	2.19	1.00	1.55	2.55	1.66
783	1.30	1.80	2.70	1.90	2.20	2.95	3.65	2.94	2.20	3.10	3.80	3.05	2.05	2.90	3.65	2.88	1.15	2.00	3.00	2.04
866	1.00	1.00	2.00	1.25	1.40	1.70	2.70	1.88	1.50	1.90	2.90	2.05	1.55	2.00	3.00	2.14	1.00	1.15	2.15	1.36
898	1.10	1.20	2.20	1.43	1.30	1.80	2.80	1.93	1.50	2.50	3.50	2.50	1.45	2.15	3.15	2.23	1.00	1.35	2.35	1.51
908	1.00	1.00	2.00	1.25	1.20	1.50	2.50	1.68	1.30	1.70	2.70	1.85	1.30	1.75	2.75	1.89	1.00	1.15	2.15	1.36
1113	1.50	2.00	3.00	2.13	1.30	1.90	2.90	2.00	1.50	2.40	3.40	2.43	1.85	2.80	3.80	2.81	1.35	2.20	3.20	2.24
1120	1.00	1.20	2.20	1.40	1.40	2.25	3.25	2.29	1.50	2.40	3.40	2.43	1.55	2.40	3.40	2.44	1.00	1.90	2.90	1.93
1152	1.00	1.20	2.20	1.40	1.40	1.90	2.90	2.03	1.50	2.20	3.20	2.28	1.55	2.55	3.55	2.55	1.00	1.25	2.25	1.44
1510	1.00	1.50	2.50	1.63	1.10	1.70	2.70	1.80	1.10	1.70	2.70	1.80	1.05	1.90	2.90	1.94	1.15	1.65	2.65	1.78
1975	1.00	1.40	2.40	1.55	1.40	1.70	2.70	1.88	1.50	2.20	3.20	2.28	1.60	2.35	3.35	2.41	1.30	2.05	3.05	2.11
2176	1.20	1.40	2.40	1.60	2.25	3.00	4.00	3.06	2.10	3.10	4.10	3.10	2.05	3.05	4.05	3.05	1.15	1.90	2.90	1.96
2687	1.30	1.80	2.70	1.90	2.10	3.10	3.80	3.03	2.20	3.20	3.90	3.13	2.05	3.05	3.80	2.99	1.00	2.00	3.00	2.00
2731	1.00	1.00	2.00	1.25	1.40	1.60	2.60	1.80	1.50	1.90	2.90	2.05	1.55	2.00	3.00	2.14	1.00	1.00	2.00	1.25
2889	1.30	1.50	2.40	1.68	2.30	3.30	4.00	3.23	2.40	3.30	4.00	3.25	2.30	3.15	3.90	3.13	1.00	1.90	2.90	1.93
26701	1.10	1.20	2.20	1.43	1.65	2.20	3.20	2.31	1.40	1.90	2.90	2.03	1.30	1.75	2.75	1.89	1.30	1.45	2.45	1.66
26792	1.00	1.10	2.10	1.33	1.00	1.40	2.40	1.55	1.30	1.80	2.80	1.93	1.35	1.80	2.80	1.94	1.00	1.15	2.15	1.36
27050	1.00	1.20	2.20	1.40	1.20	2.05	3.05	2.09	1.30	1.90	2.90	2.00	1.30	2.15	3.15	2.19	1.00	1.55	2.55	1.66
27244	1.20	1.60	2.60	1.75	1.60	2.00	3.00	2.15	1.70	2.50	3.50	2.55	1.55	2.00	3.00	2.14	1.00	1.50	2.50	1.63
27795	1.20	1.30	2.30	1.53	2.00	2.50	3.50	2.63	2.10	2.80	3.80	2.88	2.05	2.75	3.75	2.83	1.00	1.00	2.00	1.25
28353	1.30	1.50	2.40	1.68	2.30	2.80	3.50	2.85	2.40	3.40	4.10	3.33	2.30	3.30	4.05	3.24	1.00	1.60	2.60	1.70
28557	1.60	1.90	2.90	2.08	1.00	1.30	2.30	1.48	1.30	1.70	2.70	1.85	1.35	1.80	2.80	1.94	1.00	1.15	2.15	1.36
28565	1.00	1.20	2.20	1.40	1.40	2.25	3.25	2.29	1.50	2.40	3.40	2.43	1.55	2.40	3.40	2.44	1.00	1.90	2.90	1.93
28567	1.10	1.30	2.30	1.50	1.50	2.00	3.00	2.13	1.70	2.40	3.40	2.48	1.70	2.70	3.70	2.70	1.00	1.25	2.25	1.44
29373	1.00	1.10	2.10	1.33	1.15	1.90	2.90	1.96	1.20	1.90	2.90	1.98	1.20	1.90	2.90	1.98	1.00	1.15	2.15	1.36
29434	1.00	1.00	2.00	1.25	1.00	1.50	2.50	1.63	1.30	1.80	2.80	1.93	1.35	1.55	2.55	1.75	1.00	1.65	2.65	1.74
29435	1.00	1.00	2.00	1.25	1.00	1.60	2.60	1.70	1.30	2.00	3.00	2.08	1.35	1.80	2.80	1.94	1.00	1.50	2.50	1.63
29436	1.00	1.00	2.00	1.25	1.00	1.60	2.60	1.70	1.30	2.00	3.00	2.08	1.35	1.80	2.80	1.94	1.00	1.50	2.50	1.63
29458	1.00	1.00	2.00	1.25	1.20	1.40	2.40	1.60	1.40	1.80	2.80	1.95	1.55	2.00	3.00	2.14	1.00	1.00	2.00	1.25
29597	1.30	1.70	2.60	1.83	1.90	2.75	3.45	2.71	2.10	3.10	3.80	3.03	1.95	2.65	3.40	2.66	1.00	1.75	2.75	1.81
29736	1.30	1.40	2.30	1.60	2.10	2.60	3.30	2.65	2.30	3.00	3.70	3.00	2.20	2.90	3.65	2.91	1.00	1.00	2.00	1.25
30385	1.10	1.30	2.30	1.50	1.30	2.15	3.15	2.19	1.60	2.60	3.60	2.60	1.60	2.60	3.60	2.60	1.00	1.90	2.90	1.93
30458	1.00	1.40	2.40	1.55	1.00	1.20	2.20	1.40	1.20	1.90	2.90	1.98	1.20	1.95	2.95	2.01	1.00	1.60	2.60	1.70

Tabela 4.12: Números Fuzzy Triangulares *fuzzy* - Barragens de Concreto

Usinas	Galgamento			Percolação			Deformação			Recalque			Escorregamento							
	a	m	b	<i>crisp</i>	a	m	b	<i>crisp</i>	a	m	b	<i>crisp</i>	a	m	b	<i>crisp</i>				
122	1,60	2,00	3,00	2,15	1,00	1,35	2,35	1,51	1,20	1,70	2,70	1,83	1,20	1,65	2,65	1,79	1,00	1,90	2,90	1,93
641	1,00	1,20	2,20	1,40	1,20	1,95	2,95	2,01	1,20	2,20	3,20	2,20	1,25	2,25	3,25	2,25	1,00	1,75	2,75	1,81
729	1,60	2,00	3,00	2,15	1,20	1,55	2,55	1,71	1,20	1,60	2,60	1,75	1,20	1,45	2,45	1,64	1,30	2,20	3,20	2,23
1420	1,90	2,50	3,50	2,60	1,00	1,10	2,10	1,33	1,20	1,70	2,70	1,83	1,20	1,50	2,50	1,68	1,10	1,70	2,70	1,80
2008	1,60	1,90	2,90	2,08	1,30	1,55	2,45	1,71	1,20	1,30	2,30	1,53	1,20	1,30	2,30	1,53	1,45	1,60	2,45	1,78
2070	1,00	1,00	2,00	1,25	1,30	1,75	2,75	1,89	1,40	1,80	2,80	1,95	1,45	2,00	3,00	2,11	1,15	1,30	2,30	1,51
2563	1,00	1,40	2,40	1,55	1,10	1,20	2,20	1,43	1,20	1,60	2,60	1,75	1,20	1,45	2,45	1,64	1,15	1,90	2,90	1,96
2591	1,00	1,10	2,10	1,33	1,40	1,95	2,95	2,06	1,40	2,10	3,10	2,18	1,50	2,20	3,20	2,28	1,00	1,90	2,90	1,93
2757	1,00	1,10	2,10	1,33	1,00	1,30	2,30	1,48	1,00	1,40	2,40	1,55	1,00	1,40	2,40	1,55	1,00	1,00	2,00	1,25
27049	1,00	1,40	2,40	1,55	1,20	1,50	2,50	1,68	1,20	1,50	2,50	1,68	1,20	1,70	2,70	1,83	1,30	1,80	2,80	1,93
27114	1,00	1,00	2,00	1,25	1,25	1,50	2,50	1,69	1,20	1,30	2,30	1,53	1,20	1,30	2,30	1,53	1,15	1,30	2,30	1,51
27448	1,00	1,00	2,00	1,25	1,00	1,30	2,30	1,48	1,10	1,50	2,50	1,65	1,10	1,65	2,65	1,76	1,00	1,15	2,15	1,36
27963	1,60	1,90	2,90	2,08	1,25	1,75	2,75	1,88	1,30	1,80	2,80	1,93	1,00	1,30	2,30	1,48	1,50	2,15	3,15	2,24
28352	1,20	1,40	2,40	1,60	1,50	2,25	3,25	2,31	1,70	2,70	3,70	2,70	2,00	3,00	4,00	3,00	1,25	2,00	3,00	2,06
28354	1,00	1,00	2,00	1,25	1,20	1,40	2,40	1,60	1,40	1,80	2,80	1,95	1,55	2,10	3,10	2,21	1,00	1,00	2,00	1,25
28755	1,40	1,80	2,80	1,95	1,50	2,35	3,35	2,39	1,60	2,60	3,60	2,60	1,65	2,50	3,50	2,54	1,10	1,85	2,85	1,91

A necessidade de harmonizar escalas pode ser suprida através da normalização dos valores dos atributos. Para tanto, cada valor *crisp* obtido foi normalizado, mediante sua divisão pelo valor máximo encontrado entre todos os valores *crisp* calculados, conforme descrito na Equação 4.3.

$$V_{norm} = \frac{V_{crisp}}{V_{máx}} \quad (4.3)$$

Cujos resultados, por tipo de barragem, podem ser visualizados na Tabela 4.13 e na Tabela 4.14.

Tabela 4.13: Valores Normalizados *fuzzy* - Barragens de Terra / Enrocamento

Usinas	Galgamento	Percolação	Deformação	Recalque	Escorregamento
528	0.79	0.97	1.00	1.00	0.86
630	0.62	0.63	0.65	0.66	0.56
657	0.66	0.65	0.57	0.62	0.74
783	0.89	0.91	0.87	0.81	0.91
866	0.59	0.58	0.58	0.60	0.61
898	0.67	0.60	0.71	0.63	0.68
908	0.59	0.52	0.52	0.53	0.61
1113	1.00	0.62	0.69	0.80	1.00
1120	0.66	0.71	0.69	0.69	0.86
1152	0.66	0.63	0.65	0.72	0.64
1510	0.76	0.56	0.51	0.55	0.79
1975	0.73	0.58	0.65	0.68	0.94
2176	0.75	0.95	0.88	0.86	0.88
2687	0.89	0.94	0.89	0.84	0.89
2731	0.59	0.56	0.58	0.60	0.56
2889	0.79	1.00	0.92	0.88	0.86
26701	0.67	0.72	0.57	0.53	0.74
26792	0.62	0.48	0.55	0.55	0.61
27050	0.66	0.65	0.57	0.62	0.74
27244	0.82	0.67	0.72	0.60	0.73
27795	0.72	0.81	0.82	0.80	0.56
28353	0.79	0.88	0.94	0.92	0.76
28557	0.98	0.46	0.52	0.55	0.61
28565	0.66	0.71	0.69	0.69	0.86
28567	0.71	0.66	0.70	0.76	0.64
29373	0.62	0.61	0.56	0.56	0.61
29434	0.59	0.50	0.55	0.49	0.78
29435	0.59	0.53	0.59	0.55	0.73
29436	0.59	0.53	0.59	0.55	0.73
29458	0.59	0.50	0.55	0.60	0.56
29597	0.86	0.84	0.86	0.75	0.81
29736	0.75	0.82	0.85	0.82	0.56
30385	0.71	0.68	0.74	0.73	0.86
30458	0.73	0.43	0.56	0.57	0.76

Tabela 4.14: Valores Normalizados *fuzzy* - Barragens de Concreto

Usinas	Galgamento	Percolação	Deformação	Recalque	Escorregamento
122	0.83	0.63	0.68	0.60	0.86
641	0.54	0.84	0.81	0.75	0.81
729	0.83	0.72	0.65	0.55	0.99
1420	1.00	0.55	0.68	0.56	0.80
2008	0.80	0.72	0.56	0.51	0.79
2070	0.48	0.79	0.72	0.70	0.68
2563	0.60	0.60	0.65	0.55	0.88
2591	0.51	0.86	0.81	0.76	0.86
2757	0.51	0.62	0.57	0.52	0.56
27049	0.60	0.70	0.62	0.61	0.86
27114	0.48	0.71	0.56	0.51	0.68
27448	0.48	0.62	0.61	0.59	0.61
27963	0.80	0.79	0.71	0.49	1.00
28352	0.62	0.97	1.00	1.00	0.92
28354	0.48	0.67	0.72	0.74	0.56
28755	0.75	1.00	0.96	0.85	0.85

A partir dessa avaliação, de posse dos valores normalizados, é possível relacionar os procedimentos do método multicritério ELECTRE TRI para obtenção da solução de classificação das alternativas para as barragens em estudo.

4.3.3 Aplicação do Método ELECTRE TRI

4.3.3.1 Definição dos Critérios e Categorias

A aplicação do Método ELECTRE TRI tem por objetivo classificar as barragens em cinco categorias distintas, em função da necessidade de melhor gerenciamento do portfólio de empreendimentos existentes, selecionando e priorizando esses mediante padrões de segurança regulatoriamente reconhecidos, considerando as necessidades de fiscalização, a escassez de recursos e as dimensões de risco envolvidas.

Para tanto a definição dos critérios discriminantes é fator fundamental para a construção do modelo. Nesse sentido, foram considerados os seguintes eventos: *galgamento*, *percolação*, *deformação*, *escorregamento* e *recalque*; conforme discussão desenvolvida na Seção 4.2.1. Tais eventos foram considerados pela equipe de especialistas como importantes para alocação das barragens em suas categorias de risco.

Observa-se que, conforme necessidade, os critérios considerados podem ser reavaliados para representar melhor o problema. A descrição desses é apresentada na Tabela 4.2.

As categorias foram definidas em consenso com o grupo de especialistas responsáveis pelo processo de fiscalização de barragens quanto a segurança e obedecem a seguinte gradação:

- **C1 - Categoria 1:** Para barragens que apresentam categoria de risco baixo com anomalias não identificadas ou em estágio inicial, cuja existência é de fácil reversão e não compromete a segurança da barragem.
- **C2 - Categoria 2:** Abrange barragens que apresentam categoria de risco baixo para as quais as anomalias existentes não comprometem a segurança da barragem.
- **C3 - Categoria 3:** Destinada a barragens que apresentam categoria de risco médio, para as quais as anomalias devem ser controladas e monitoradas. As intervenções podem ser implementadas a médio prazo para manutenção das condições de segurança.
- **C4 - Categoria 4:** Esta classe envolve barragens que apresentam categoria de risco médio-alto cujas anomalias necessitam intervenção de curto a médio prazo para manutenção das condições de segurança.
- **C5 - Categoria 5:** Corresponde a barragens que apresentam categoria de risco alto, cujas anomalias necessitam intervenção de curto prazo para manutenção das condições de segurança, não significando, em todos os casos, risco imediato de ruptura.

As categorias também foram definidas e orientadas em consonância com as perspectivas do Modelo de Fiscalização em 3 níveis [38], apresentado e discutido na página 15, o qual norteia e conduz o processo de Fiscalização de Segurança de Barragens na ANEEL. Nesse contexto, observa-se, conforme Figura 4.4 a seguinte equivalência:

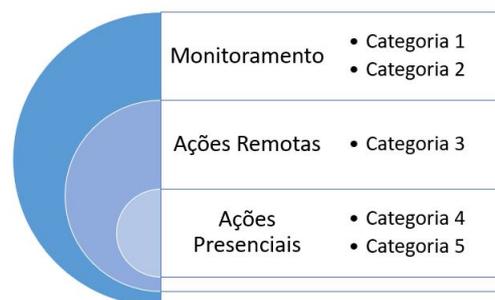


Figura 4.4: Equivalência entre categorias do Método ELECTRE e o Modelo de Fiscalização em 3 Níveis. Fonte: Autor.

4.3.3.2 Definição do Desempenho das Alternativas por Critério

Conforme discutido a seleção das alternativas deu-se por conveniência entre um rol de usinas objeto de ação presencial. O desempenho dessas foi mensurado mediante processo

de autoavaliação realizado via aplicação dos FSB's. Uma vez estabelecidas as pontuações estas foram tratadas e tabuladas por intermédio de teoria de conjuntos *fuzzy* (4.3.2).

Considerando que os critérios têm impactos e relevância diferenciada de acordo com a natureza da estrutura a ser avaliada, as barragens foram divididas em duas famílias: (1) Terra / Enrocamento; e (2) Concreto. A Tabela 4.13 e a Tabela 4.14 apresentam, por família de barragem, o desempenho das alternativas para cada um dos critérios de classificação.

4.3.3.3 Definição dos Perfis das Categorias

Uma vez determinado o desempenho das alternativas para cada um dos critérios estipulados, passa-se à definição dos perfis das categorias de risco. Esses foram definidos, considerando-se o evento de risco e seus efeitos físicos sobre a estrutura. A ocorrência de galgamento em barragens de terra, por exemplo, não é aceita, em decorrência da sua alta suscetibilidade à erosão. Em barragens de material rígido, como concreto, a baixa permeabilidade dos materiais, permite que elas sejam mais resistentes à erosão [2]. Dessa forma, de modo a indicar a intolerância a esse evento, o espaçamento entre as categorias reduz-se gradualmente.

Analogamente, para barragens de terra homogênea, a incidência de *piping* é muito maior do que em barragens dotadas de filtro ou constituídas de material rígido. Isso se deve ao fato de que, nessas, quase não se tem controle sobre a percolação. Assim, a depender de sua constituição, uma barragem pode percolar eternamente, sem que esta anomalia comprometa a sua integridade.

Efeitos de deformação e recalque são mais acentuados e críticos em estruturas mais rígidas, como barragens de concreto e em enrocamento, do que em barragens de terra, notadamente mais flexíveis.

Considerando que independente do volume da massa movimentado, a ocorrência de escorregamentos compromete de forma sensível a estabilidade de uma barragem, os espaçamentos entre as categorias foram mantidos baixos, de forma a atingir-se rapidamente uma classificação de risco elevada.

Os perfis das classes, considerados ideais com base no julgamento dos especialistas, podem ser visualizados na Tabela 4.15.

Como tecnologia de referência foi escolhida a barragem de concreto, que, assim como na Tabela 4.14, apresenta estatística e historicamente índices de risco menores que os das barragens de terra e de enrocamento, imputando a essas últimas um rigor maior em termos de categorização e classificação.

Tabela 4.15: Perfis das Categorias

Perfil	Critério				
	Galgamento	Percolação	Deformação	Recalque	Escorregamento
b1	0.25	0.20	0.20	0.20	0.20
b2	0.45	0.30	0.30	0.30	0.30
b3	0.60	0.35	0.45	0.40	0.40
b4	0.70	0.40	0.60	0.55	0.55

Fonte: Autor.

Observa-se que o estabelecimento dos perfis, embora fundamentado no conhecimento técnico e na experiência dos especialistas, dá-se de forma espontânea, incorrendo-se no risco de enviesamento do resultado de classificação final das estruturas.

Segundo Costa *et al.* [34], não existe um consenso na literatura para a determinação desses limites, quando se considera avaliação conjunta de múltiplos avaliadores, pois os métodos da família ELECTRE tratam de decisões que envolva uma única unidade de decisão.

Todavia, conforme discutido ao longo deste trabalho, o decisor deve ter preferências claras, isto é, deve especificar uma categoria para a alternativa, considerando suas avaliações em todos os critérios. Assim, em alguns casos pode ser importante a realização de um estudo estatístico preliminar.

Um método alternativo para obtenção de valores de referência (e suas incertezas) é o método dos percentis, o qual não exige qualquer suposição sobre a forma da distribuição, sendo utilizado para a situação em que os dados estão ou não agrupados. A ideia é determinar uma faixa que concentre um determinado percentual da população. Por exemplo, se fixarmos um percentual de 95%, a construção da faixa de referência consistiria em determinar o percentil de ordem 2,5 e 97,5.

Dessa forma, de acordo com sua natureza construtiva, os conjuntos de respostas foram ordenados e subdivididos em cinco partes iguais, gerando os seguintes perfis de classe exibidos na Tabela 4.16 e na Tabela 4.17.

Tabela 4.16: Perfis das Categorias Ajustado para Barragens de Terra / Enrocamento

Perfil	Critério				
	Galgamento	Percolação	Deformação	Recalque	Escorregamento
b1	0.59	0.53	0.56	0.55	0.61
b2	0.66	0.61	0.59	0.60	0.73
b3	0.73	0.67	0.69	0.69	0.76
b4	0.79	0.84	0.86	0.81	0.86

Fonte: Autor.

Consistindo em uma alternativa estatística ao conjunto de perfis inicialmente estabelecidos. Outras possibilidades podem ser testadas como o método da curva de Gauss, o

Tabela 4.17: Perfis das Categorias Ajustado para Barragens de Concreto

Perfil	Critério				
	Galgamento	Percolação	Deformação	Recalque	Escorregamento
b1	0.48	0.62	0.59	0.51	0.64
b2	0.52	0.69	0.65	0.55	0.80
b3	0.68	0.75	0.72	0.66	0.86
b4	0.81	0.85	0.81	0.75	0.90

Fonte: Autor.

qual pressupõe que a(s) variável(eis) de interesse possui(em) distribuição Gaussiana. Silva [64] *et al.* utilizaram o Critério de Chauvenet para eventualmente identificar e eliminar julgamentos considerados *outliers* no conjunto de dados. Mousseau & Slowinski [164] propuseram um modelo de inferir os parâmetros do ELECTRE TRI com uma análise de exemplos atribuídos pelo decisor, isto é, dos julgamentos holísticos. Já Dias [165] utilizou problemas de otimização para a inferência de alguns parâmetros do ELECTRE TRI.

4.3.3.4 Definição dos Limites de Preferência (p), Indiferença (q) e Veto (v)

A definição dos limites de preferência (p) e indiferença (q) para cada critério, na utilização do método ELECTRE TRI, é necessária, uma vez que tais limites buscam considerar a hesitação ou incerteza associada ao julgamento humano. Os limiares de preferência $p_j[g(b_h)]$, indiferença $q_j[g(b_h)]$ e de veto $v_j[g(b_h)]$ são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Limiares do Modelo

Perfil	Critério				
	Galgamento	Percolação	Deformação	Recalque	Escorregamento
pj[g(b1)]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
pj[g(b2)]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
pj[g(b3)]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
pj[g(b4)]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
qj[g(b1)]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
qj[g(b2)]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
qj[g(b3)]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
qj[g(b4)]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
vj[g(b1)]	0	0	0	0	0
vj[g(b2)]	0	0	0	0	0
vj[g(b3)]	0	0	0	0	0
vj[g(b4)]	0	0	0	0	0

Fonte: Autor.

Considerando as dificuldades encontradas pelos decisores em quantificar suas preferências, bem como entender de forma qualitativa a avaliação que se fez sobre as categorias, os limiares de preferência e de indiferença foram considerados iguais para todos os critérios, admitindo-se um nível de incerteza mínimo.

O uso do limite de veto no ELECTRE TRI, induz uma tendência a se classificar uma alternativa em uma classe mais baixa. Após explicação apresentada aos especialistas sobre esse efeito do limite de veto, decidiu-se por não utilizar esse limite. Foi observado que os critérios adotados tinham direção inversa. Ou seja: quanto maior o valor do julgamento, pior é a situação. Nesse caso, vetar a classificação de um evento em uma classe mais alta, poderia “mascarar” a classificação de desse evento induzindo a classificação final do mesmo em uma classe que requeira menor atenção.

Matematicamente, a não habilitação do conceito de veto presente no ELECTRE TRI implica em usar um limite de veto extremamente grande, anulando o efeito da discordância e igualando a credibilidade à concordância [109].

4.3.3.5 Definição do Grau de Influência dos Critérios e do Grau de Sobreclassificação

O grau de influência (w_j), ou peso dos critérios, foi inicialmente definido por meio de elicitação direta com os especialistas, obtendo-se assim 3 (três) cenários. Neste momento, por se tratar de um processo de maior simplicidade em relação ao da definição dos Limites de Preferência (p), Indiferença (q) e Veto (v), buscou-se um maior nível de diferenciação dos critérios por tecnologia construtiva como forma de compensar as dificuldades encontradas na etapa anterior. Os valores elicitados para os pesos podem ser visualizados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Influência dos critérios

Cenário	Critério					
	Tipo Barragem	Galgamento	Percolação	Deformação	Recalque	Escorregamento
A	Terra / Enrocamento	0.30	0.25	0.20	0.10	0.15
	Concreto	0.10	0.25	0.25	0.25	0.15
B	Terra / Enrocamento	0.35	0.20	0.25	0.10	0.10
	Concreto	0.15	0.30	0.20	0.20	0.15
C	Terra / Enrocamento	0.40	0.15	0.20	0.15	0.10
	Concreto	0.10	0.20	0.30	0.20	0.20

Fonte: Autor.

Definidos os pesos, é estabelecido o limite admitido para o grau de sobreclassificação, representado pelo nível de corte λ , que indica quantos dos critérios têm de ser cumpridos, a fim de que se possa atribuir uma categoria específica a uma alternativa.

Como parâmetro para análise inicial, foi estabelecido o valor, $\lambda = 0,76$, sendo permitida a variação desse índice entre 0,5 e 1, conforme discutido na Seção 2.12.2. Segundo Neves e Costa [166], este valor tem sido um valor frequentemente adotado para o parâmetro λ , entretanto, não se encontra na literatura uma discussão aprofundada sobre a escolha do mesmo [167].

4.3.3.6 Execução do Algoritmo de Classificação ELECTRE TRI

O algoritmo de classificação do ELECTRE TRI foi codificado em linguagem *Python* (ver Apêndice B) e aplicado a todos os cenários e tipos de barragem previamente definidos. Para cada um desses casos foram geradas listas com as classificações otimistas e pessimistas permitidas pelo método. Os resultados obtidos foram confrontados com resultados gerados pelos *softwares* ELECTRE TRI e IRIS 2.0, não sendo observada divergência de respostas, atestando a confiabilidade do código.

A Figura 4.5, exibe os resultados das classificações pessimista e otimista para os três cenários avaliados, tendo como referência os perfis de categoria estabelecidos pelos especialistas na Tabela 4.15.

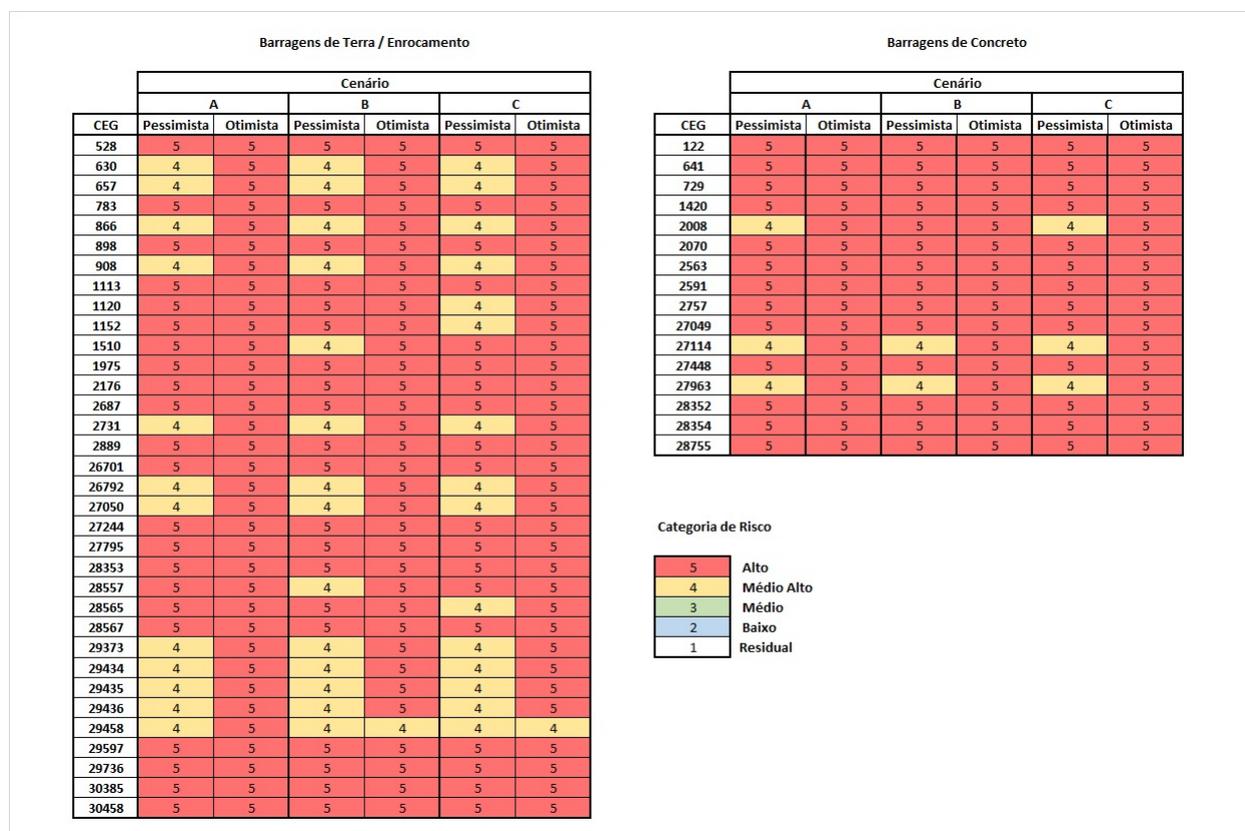


Figura 4.5: Resultados da Classificação para $\lambda = 0,76$. Fonte: Autor.

Considerados por demais rigorosos, estando distantes da realidade observada nas ações presenciais e da classificação realizada com base nos quesitos da REN 696/2015 - ANEEL. A Figura 4.6, traz os resultados das classificações pessimista e otimista para os três cenários avaliados, tendo como referência os perfis de categoria ajustados pelos quintis, determinados com base na Tabela 4.16 e Tabela 4.17.

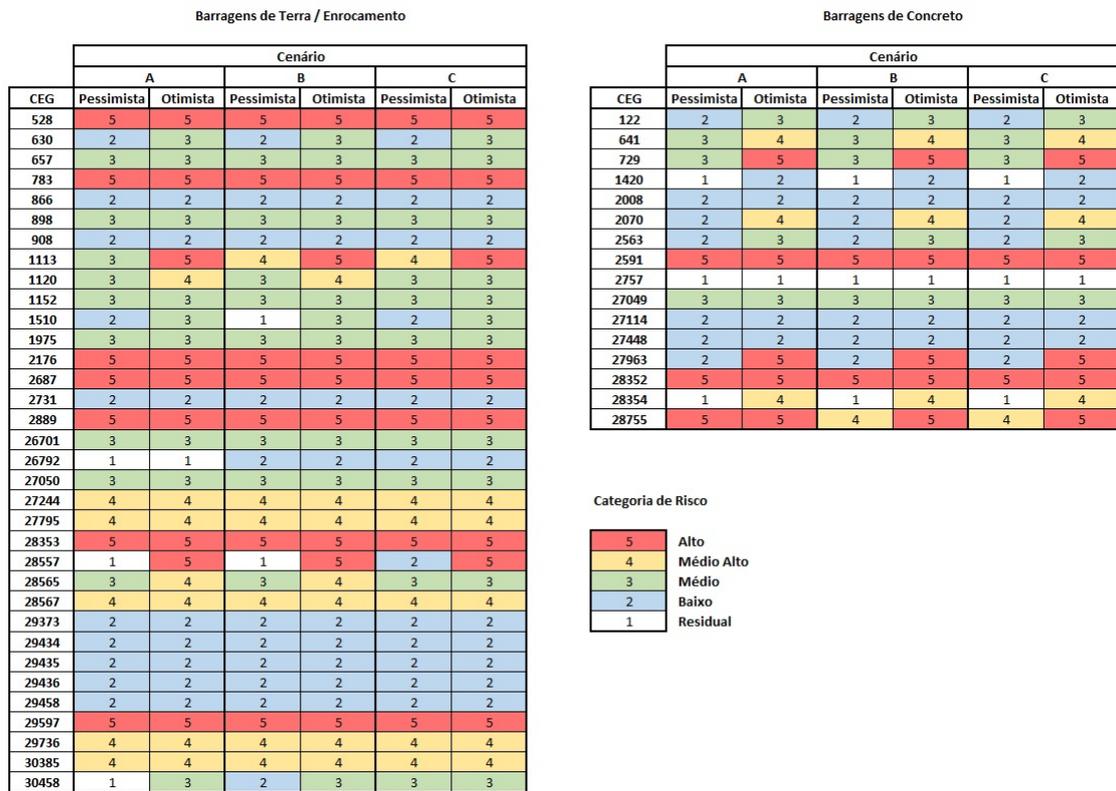


Figura 4.6: Resultados da Classificação Ajustados pelos Quintis para $\lambda = 0,76$. Fonte: Autor.

Os valores calculados demonstraram maior coerência com a realidade observada, além de alinhar-se aos objetivos deste estudo no sentido de possibilitar a classificação equilibrada dos barramentos para efeito de priorização de ações.

Os resultados exibidos na Figura 4.6, sugerem a possibilidade de aplicação de um modelo híbrido, no qual os perfis de categoria obtidos dos quintis dos valores *fuzzy* calculados na Seção 4.3.2.5, estejam proporcionalmente ajustados aos perfis de categoria estabelecidos pelos especialistas na Tabela 4.15. Entende-se que, com a devida maturação do modelo, os resultados a serem obtidos sejam suficientemente satisfatórios.

Por se tratar da segurança de uma infraestrutura considerada crítica, com alto potencial de dano associado, é recomendada a adoção de uma classificação que opere no sentido favorável a maior segurança. Ou seja: a classificação ‘otimista’, que, neste caso em que os critérios têm direção inversa, classifica os riscos na classe mais alta [158].

Assumindo essa política, as classificações otimistas foram então descartadas, restringindo-se a análise ao estudo dos cenários exibidos na Figura 4.7.

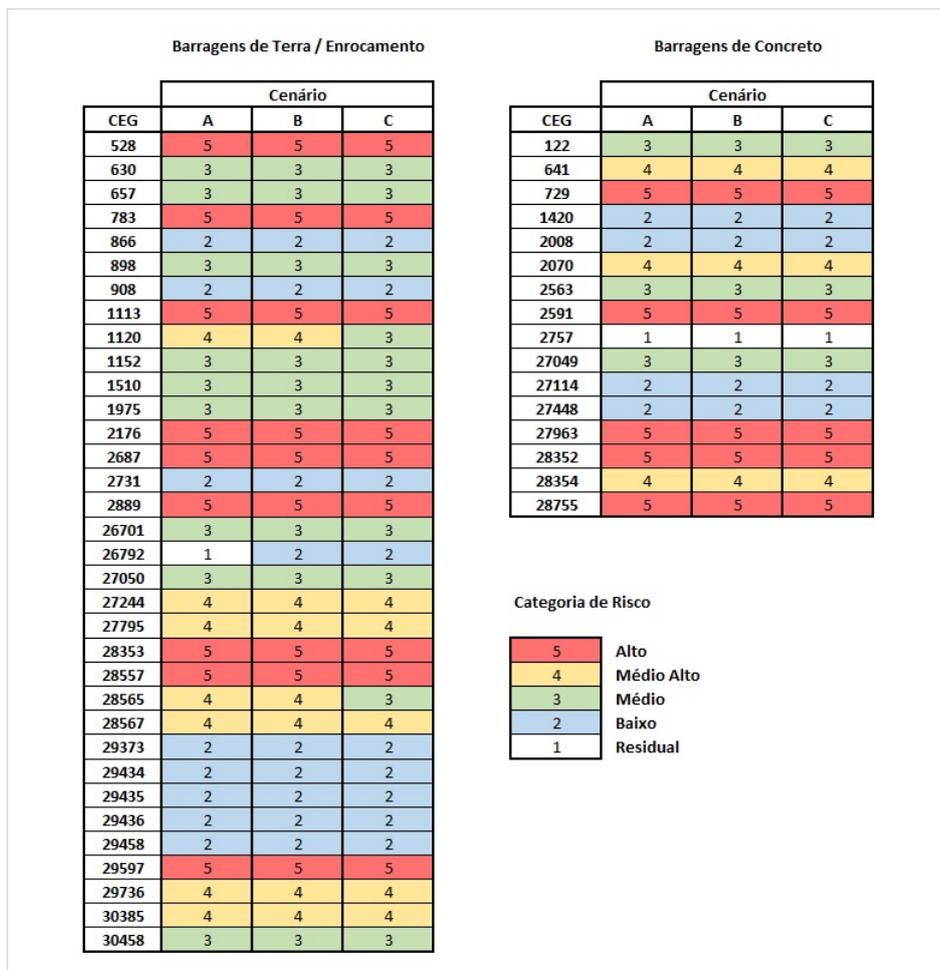


Figura 4.7: Resultados da Classificação Otimista Ajustados pelos Quintis para $\lambda = 0,76$.
Fonte: Autor.

Bastante similares entre si, reforçando a coerência do modelo quanto a parametrização adotada. Antes de ter seus resultados finais apresentados, a robustez do modelo foi testada mediante submissão desse a uma análise de sensibilidade, na qual os limites de categoria foram incrementados a passos 5% até o limite superior de 20%, não sendo observados, para as barragens estudadas, variações de quantidade representativas nas classificações finais obtidas ou mudanças bruscas de classificação.

Os cenários foram então avaliados pelos especialistas e pelo decisor, sendo os resultados do CENÁRIO A considerados mais conexos com suas preferências. Para esse cenário 26% das barragens estudadas posicionam-se em categorias de grau de risco considerado elevado e 16% em nível de risco médio elevado, requerendo maior atenção em termos de conservação de suas estruturas, mediante realização de intervenções de curto ou médio prazo, para manutenção de suas condições de segurança.

4.3.3.7 Análise das Restrições e Ajustes do Modelo de Classificação

Uma das funções a serem observadas no ELECTRE TRI é o nível de credibilidade, ou de corte (λ), que a classificação proporciona. Quanto mais próximo de 1 for o nível de corte, maior é o nível de credibilidade, no entanto, maiores são as chances de ocorrerem divergências e incomparabilidades.

A mensuração do impacto desses é feita mediante estudo da Matriz de Preferências gerada pelo ELECTRE TRI. A Figura 4.8 apresenta os resultados da Matriz de Preferências obtida para o conjunto de barragens de concreto avaliadas.

Matriz de Preferências Concreto

$\lambda = 0.76$

Alternativas	Categorias			
	b1	b2	b3	b4
122	>	R	<	<
641	>	>	R	<
729	>	>	R	R
1420	R	<	<	<
2008	>	<	<	<
2070	>	R	R	<
2563	>	R	<	<
2591	>	>	>	I
2757	<	<	<	<
27049	>	>	<	<
27114	>	<	<	<
27448	>	<	<	<
27963	>	R	R	R
28352	>	>	>	>
28354	R	R	R	<
28755	>	>	>	>

Figura 4.8: Matriz de Preferências: Resultados para Barragens de Concreto para $\lambda = 0,76$. Fonte: Autor.

Conforme Figura 4.8, verifica-se que a classificação realizada para um nível de corte de 0,76, acarretou a ocorrência de incomparabilidades (identificadas por R) em 50% do total de alternativas. Isto significa que para este conjunto de avaliações o modelo deveria ser revisto. É relevante observar que este sinal não seria captado por um método de classificação baseado na média ponderada que considerasse os mesmos julgamentos.

Tradicionalmente, considera-se que a incomparabilidade seja causada por: incoerência do avaliador; pelo modelo de classificação (incluindo o conjunto de critérios); ou pelo sistema de coleta de dados (incluindo as escalas utilizadas) [34]. Ante tais condições,

em princípio, entende-se por necessária a execução de novo processo de classificação, com o emprego de um nível de corte menor, permitindo as comparações par a par entre os critérios e os perfis definidos. No entanto, a presença de incomparabilidades pode estar associada a características intrínsecas à alternativa sob análise e à modelagem, não constituindo em si falha do sistema de avaliação [34]. Podem existir critérios que, mesmo sendo independentes, estejam alinhados e a sua avaliação seja convergente. Também pode haver critérios que sejam conflitantes, o que induz divergências de desempenho.

Ou seja, o fato de existir incomparabilidade não indica, necessariamente, uma falha do modelo – pois pode indicar um comportamento não homogêneo da alternativa. Na programação multiobjetivo e na otimização por algoritmos genéticos, estes tipos de ocorrências correspondem a situações nas quais não se encontra um *Ótimo de Pareto* [34]. Para o problema abordado verifica-se que os critérios Deformação e Escorregamento são fortemente conflitantes com o desempenho do critério Recalque.

Nesse sentido, removendo-se o critério Escorregamento e, posteriormente, promovendo-se um ajuste para menor no nível de corte (λ), obtiveram-se os resultados exibidos na Figura 4.9:

Matriz de Preferências Concreto					Matriz de Preferências Concreto				
$\lambda = 0.76$ sem escorregamento					$\lambda = 0.60$ sem escorregamento				
Alternativa	Categorias				Alternativas	Categorias			
	b1	b2	b3	b4		b1	b2	b3	b4
122	>	R	<	<	122	>	<	<	<
641	>	>	>	I	641	>	>	>	I
729	>	I	<	<	729	>	I	<	<
1420	R	<	<	<	1420	R	<	<	<
2008	>	<	<	<	2008	>	<	<	<
2070	>	>	<	<	2070	>	>	<	<
2563	>	<	<	<	2563	>	<	<	<
2591	>	>	>	I	2591	>	>	>	I
2757	I	<	<	<	2757	I	<	<	<
27049	>	>	<	<	27049	>	>	<	<
27114	>	<	<	<	27114	>	<	<	<
27448	>	<	<	<	27448	>	<	<	<
27963	>	R	<	<	27963	>	R	<	<
28352	>	>	>	>	28352	>	>	>	>
28354	>	>	R	<	28354	>	>	R	<
28755	>	>	>	>	28755	>	>	>	>

Figura 4.9: Matriz de Preferências: Resultados Ajustados para Barragens de Concreto $\lambda = 0,60$. Fonte: Autor.

Reduzindo o grau de incomparabilidade para 18,75% com um fator de corte $\lambda = 0,60$, mantendo-se esta situação inalterada até o limite inferior de $\lambda = 0,50$. Para os quais os barramentos 641 e 2757 foram posicionados em uma categoria imediatamente superior e as barragens 729 e 27693 tiveram seu nível de incomparabilidade significativamente reduzido posicionando-se 2 categorias abaixo em relação a sua classificação inicial.

Com relação à Matriz de Preferências construída para o grupo de barragens de Terra / Enrocamento, obteve-se o resultado conforme exibido na Figura 4.10:

Matriz de Preferências Terra / Enrocamento					Matriz de Preferências Terra / Enrocamento				
$\lambda = 0.76$					$\lambda = 0.70$				
Alternativas	Categorias				Alternativas	Categorias			
	b1	b2	b3	b4		b1	b2	b3	b4
528	>	>	>	>	528	>	>	>	>
630	>	R	<	<	630	>	I	<	<
657	>	I	<	<	657	>	I	<	<
783	>	>	>	>	783	>	>	>	>
866	>	<	<	<	866	>	<	<	<
898	>	>	<	<	898	>	I	<	<
908	I	<	<	<	908	I	<	<	<
1113	>	>	R	R	1113	>	>	>	R
1120	>	>	R	<	1120	>	>	>	<
1152	>	>	<	<	1152	>	I	<	<
1510	>	R	<	<	1510	>	R	<	<
1975	>	>	<	<	1975	>	>	<	<
2176	>	>	>	>	2176	>	>	>	>
2687	>	>	>	>	2687	>	>	>	>
2731	I	<	<	<	2731	I	<	<	<
2889	>	>	>	>	2889	>	>	>	>
26701	>	>	<	<	26701	>	I	<	<
26792	<	<	<	<	26792	I	<	<	<
27050	>	I	<	<	27050	>	I	<	<
27244	>	>	>	<	27244	>	>	>	<
27795	>	>	>	<	27795	>	>	>	<
28353	>	>	>	>	28353	>	>	>	>
28557	R	R	R	R	28557	<	<	<	<
28565	>	>	R	<	28565	>	>	>	<
28567	>	>	I	<	28567	>	>	I	<
29373	>	<	<	<	29373	>	<	<	<
29434	I	<	<	<	29434	I	<	<	<
29435	I	<	<	<	29435	I	<	<	<
29436	I	<	<	<	29436	I	<	<	<
29458	I	<	<	<	29458	I	<	<	<
29597	>	>	>	>	29597	>	>	>	I
29736	>	>	>	<	29736	>	>	>	I
30385	>	>	<	<	30385	>	>	>	<
30458	R	R	<	<	30458	>	>	<	<

Figura 4.10: Matriz de Preferências: Resultados Ajustados para Barragens de Terra e Enrocamento $\lambda = 0,70$. Fonte: Autor.

Não havendo a necessidade de exclusão do critério de Escorregamento e observando-se a eliminação das incomparabilidades (R) a partir do valor de nível de corte de $\lambda = 0,65$. Os resultados finais de classificação, ajustados para os novos níveis de corte e para a realidade da amostra, em termos de quintis, são exibidos na Figura 4.11.

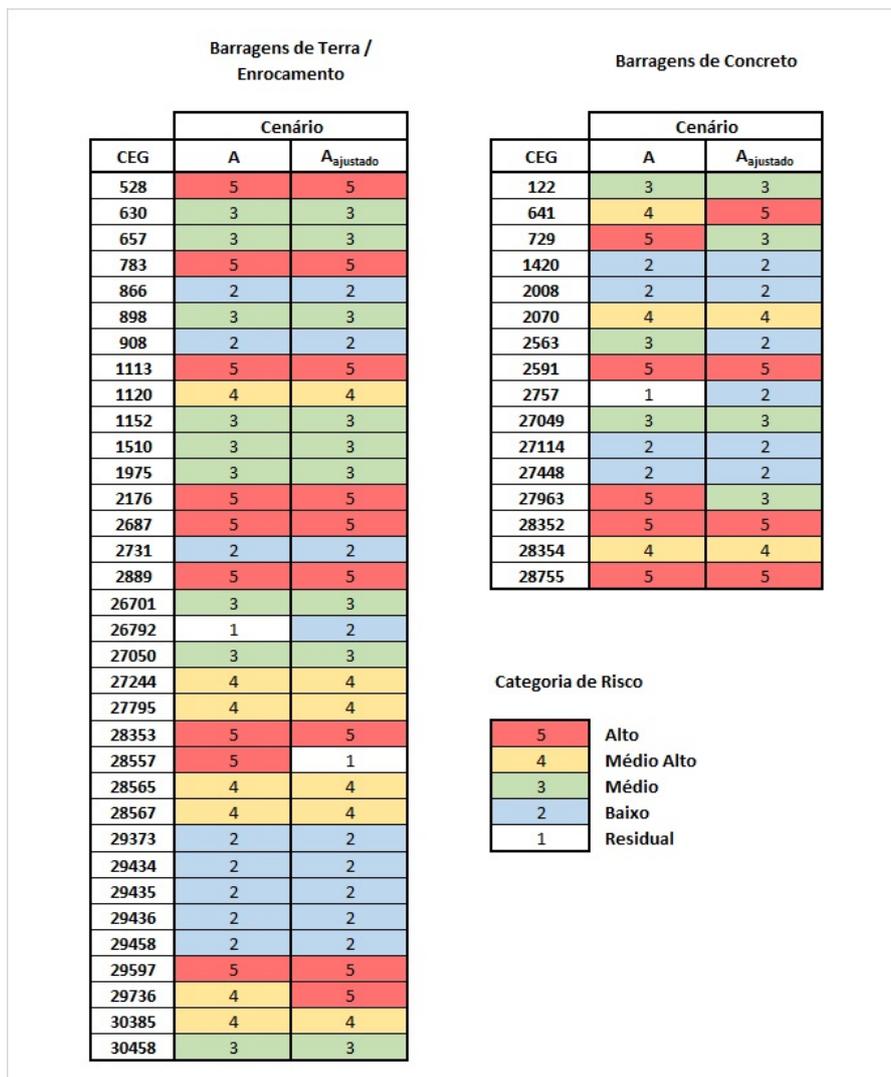


Figura 4.11: Resultados da Classificação Ajustados para os Novos Níveis de Corte e pelos Quintis da Amostra. Fonte: Autor.

Acarretando, para este cenário o reposicionamento de duas barragens (26792 e 29736) para uma categoria imediatamente superior e a devida classificação do barramento 28557, até então incomparável, como de baixo risco.

Com os novos níveis de corte definidos, realizou-se uma comparação par a par das alternativas considerando resultados de classificação para as atribuições pessimista e otimista, conforme Figura 4.12.

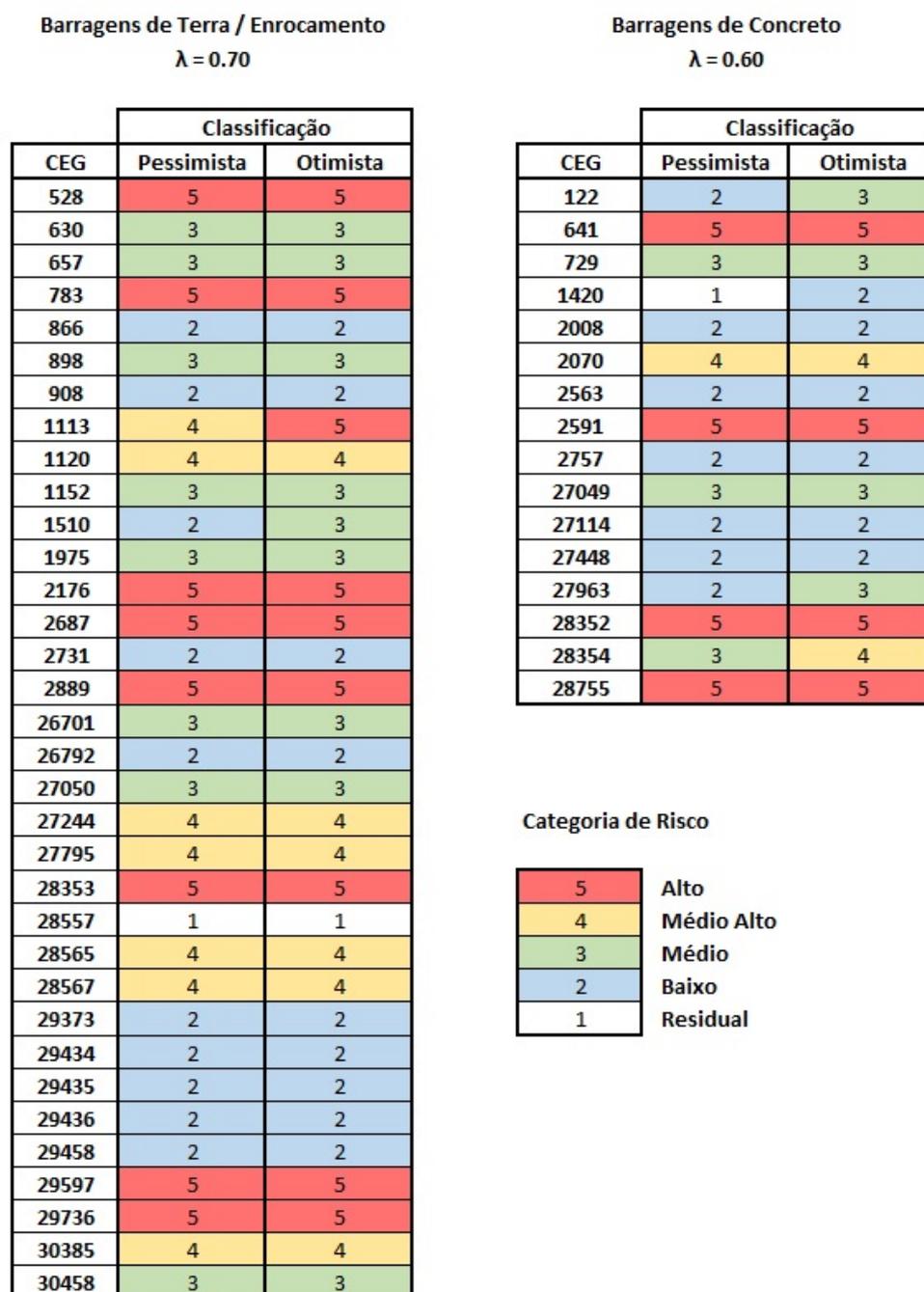


Figura 4.12: Resultados das Classificações Pessimista e Otimista para os valores ajustados de λ . Fonte: Autor.

Havendo divergência de categorias para duas alternativas para a amostra de barragens de Terra / Enrocamento, e de 4 alternativas para barragens de concreto. Em ambos os casos limitadas a um nível de diferença, demonstrando um elevado nível de coerência na classificação obtida.

4.3.4 Análise da Classificação Fuzzy

A despeito da classificação global, obtida mediante aplicação do método ELECTRE TRI, o procedimento proposto permite a avaliação das barragens em termos dos índices de risco calculados, por anomalia, na etapa de aplicação do modelo *Fuzzy*. Estes índices, uma vez referenciados aos perfis de categoria definidos durante a etapa de parametrização do modelo multicritério, como descrito na Tabela 4.16 e na Tabela 4.17, abrem oportunidade para uma análise mais ampla do desempenho e da integridade das estruturas em estudo, servindo de base para identificação de vulnerabilidades específicas e definição de ajustes quando necessário.

Na busca por padrões e comportamentos específicos que contribuíssem para o desenvolvimento desta etapa, consideraram-se como elementos de suporte fatores adicionais associados à identificação, porte e caracterização das barragens avaliadas, quais sejam: distribuição geográfica, altura, comprimento e capacidade de geração, conforme Anexo I.

A análise também considera a diferença conjuntural existente entre as diversas tecnologias construtivas empregadas nas centrais hidrelétricas (concreto, enrocamento, terra) e as diferentes categorias de geração (CGH's, PCH's e UHE's).

A Figura 4.13 exhibe, por anomalia, o mapa de calor (*heatmap*) construído com base nas correlações estabelecidas considerando-se os índices de risco calculados e os fatores característicos de cada barragem.

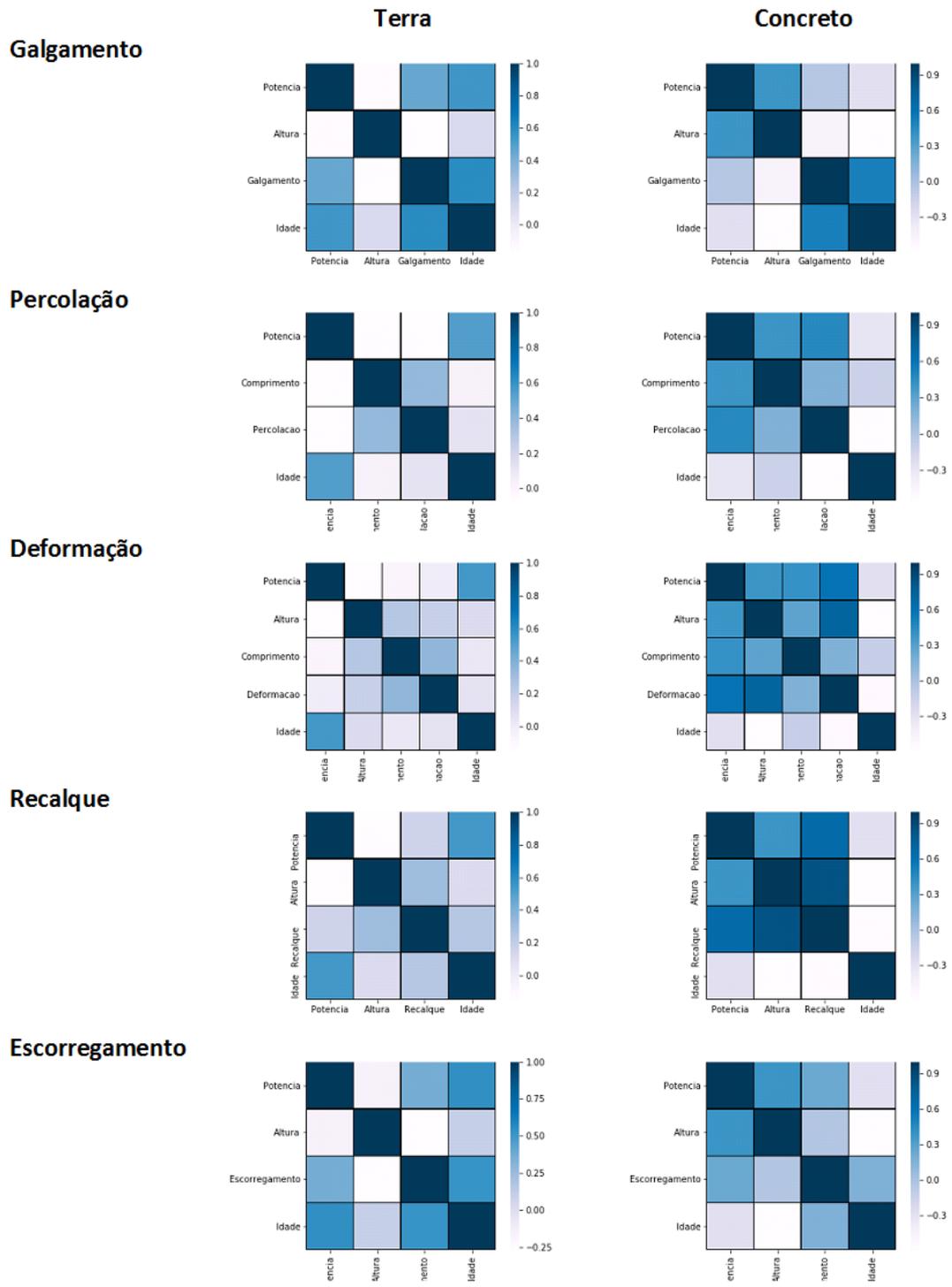


Figura 4.13: Matrizes de correlação para os fatores de risco calculados. Fonte: Autor.

As próximas seções apresentam os principais resultados e conclusões desta avaliação.

4.3.4.1 Galgamento

Na Figura 4.14 observa-se, por natureza e por tipo construtivo, a distribuição geográfica das barragens constantes da amostra, segundo os resultados calculados para avaliação da susceptibilidade de ocorrência da anomalia galgamento.

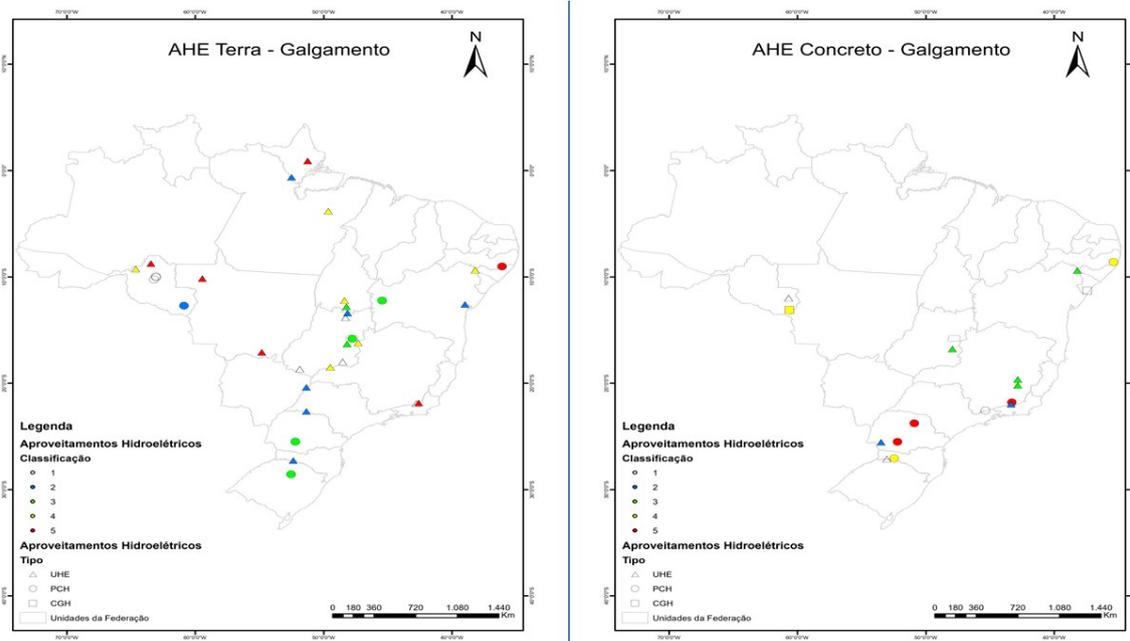


Figura 4.14: Mapa de Situação. Classificação por Nível de Galgamento. Fonte: Autor.

Mediante comparação de resultados, verifica-se que as barragens de concreto obtiveram uma nota média de avaliação inferior às de terra e enrocamento, (0,614 contra 0,715), resultados estes coerentes com as estatísticas discutidas na Seção 2.5, indicando a maior tolerância de empreendimentos desta natureza para este tipo de anomalia, ratificando a sensibilidade do modelo em capturar tal comportamento.

Ao avaliarem-se, no entanto, os desvios absolutos e os coeficientes de variação associados, verifica-se uma inversão desta condição. A partir da Figura 4.15 observa-se que boa parte deste comportamento pode ser explicado com base na influência exercida pelas PCH's de concreto, que, em sua maioria, apresentaram classificações de risco superiores às de seus equivalentes de terra. Essas últimas, considerando as características da amostra, dotadas de reservatórios de maior porte e com maior capacidade de geração, indicando a existência de estruturas de extravasamento maiores.

Quando segmentada por grandes usinas (UHE's), a amostra apresenta para barragens de concreto um grau máximo de classificação igual a 3. Com relação às barragens de terra 44% desta posicionam-se em categorias de nível 4 ou 5.

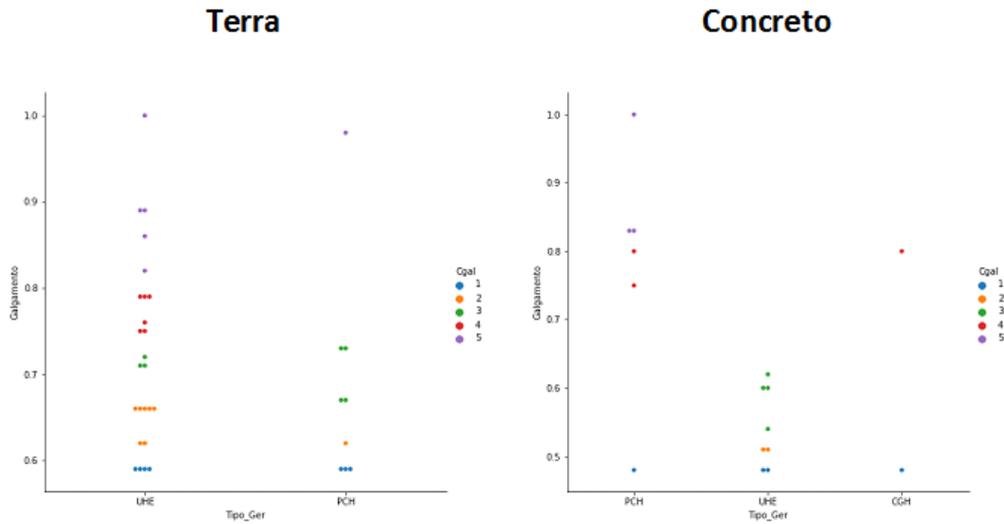


Figura 4.15: Distribuição de barragens. Classificação por Nível de Galgamento. Fonte: Autor.

Para ambos os casos se verificou uma distribuição assimétrica à direita, indicando que as barragens classificadas tendem a se posicionar em categorias inferiores, de menor risco. De fato, trinta e duas das 50 barragens estudadas classificaram-se em categorias de nível 3 ou inferior. Das que se classificaram em categorias de grau 4 ou 5, doze são de terra.

A Figura 4.16 apresenta graficamente os resultados das correlações estabelecidas entre os índices de risco calculados para a anomalia de galgamento e as características de altura e idade associadas a cada barragem.

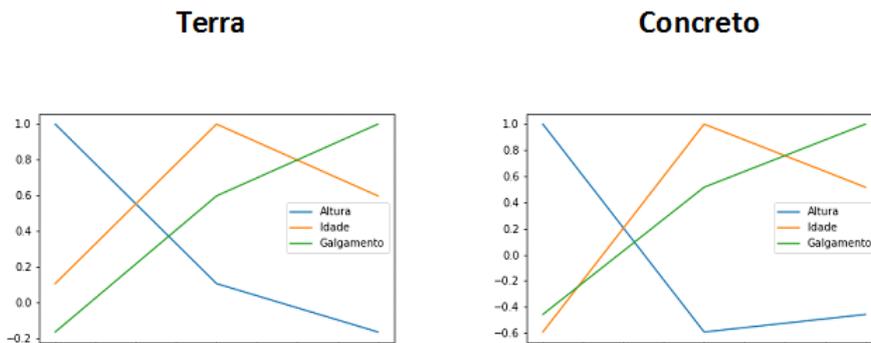


Figura 4.16: Estudo de Correlações por Nível de Galgamento. Fonte: Autor.

Revelando forte tendência a obter-se classificações de risco menor para estruturas de maior altura, atestando uma boa calibração do modelo. Em termos de idade os resultados obtidos para a amostra demonstraram-se não conclusivos, sugerindo de forma pouco representativa uma estabilização mais rápida dos valores para o universo de barragens de concreto.

Considerando aspectos geográficos observa-se a classificação de UHE's de terra em grupos de maior risco, para as usinas de terra e de enrocamento localizadas na Região Norte do país, comportamento este condizente com as características do solo encontradas, assim como com o porte das mesmas. Nas Regiões Sudeste e Sul observa-se a classificação de PCH's em patamares de maior nível de risco, em regiões sujeitas a regimes hidrológicos mais intensos.

4.3.4.2 Percolação

A Figura 4.17 traz a distribuição geográfica das barragens segundo os resultados calculados para avaliação da susceptibilidade de ocorrência da anomalia percolação.

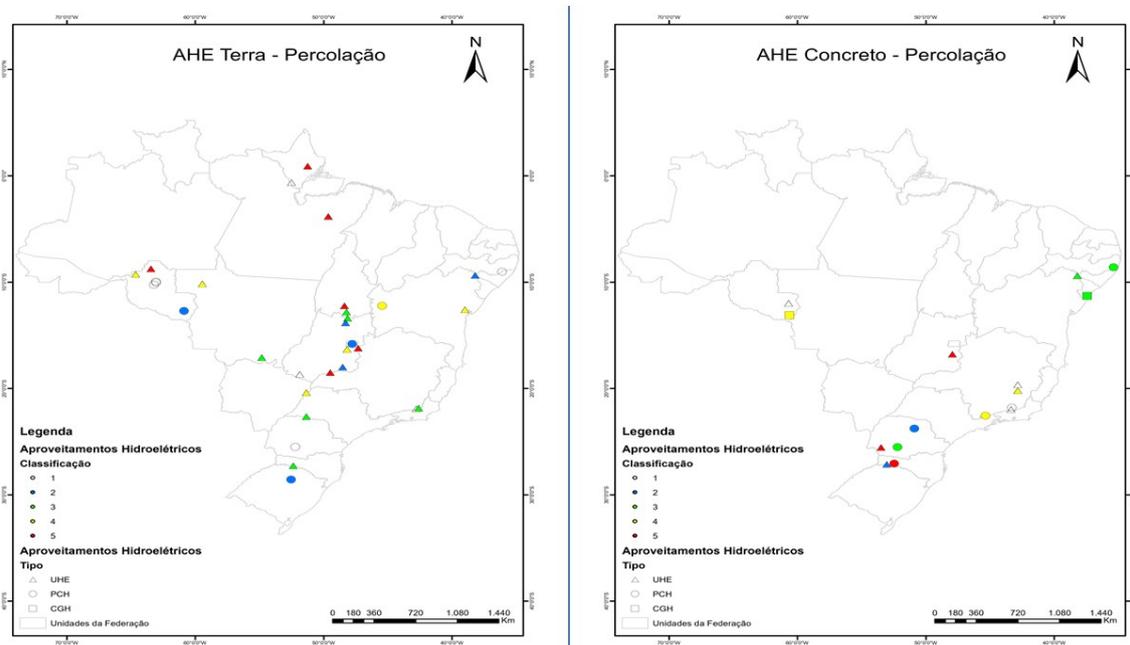


Figura 4.17: Mapa de Situação. Classificação por Nível de Percolação. Fonte: Autor.

A percolação ou infiltração é o movimento contínuo da água a partir da face de montante em direção a sua face de jusante. Essa infiltração deve ser limitada de acordo com o princípio do controle de fluxo, evitando que esse aflore no talude de jusante, provocando o arraste das partículas mais finas, dando início a processos erosivos internos. Para tanto são inseridos elementos de drenagem no corpo da barragem. A eficiência do dreno depende da sua localização e extensão.

Nesse sentido, barragens com maior face de contato, sujeitas a uma maior pressão de água e constituídas de material com maior grau de permeabilidade estão sujeitas a maior ocorrência deste tipo de anomalia.

A Figura 4.18 apresenta graficamente os resultados das correlações estabelecidas entre os índices de risco calculados para a anomalia de percolação e as características de altura e comprimento associadas a cada barragem.

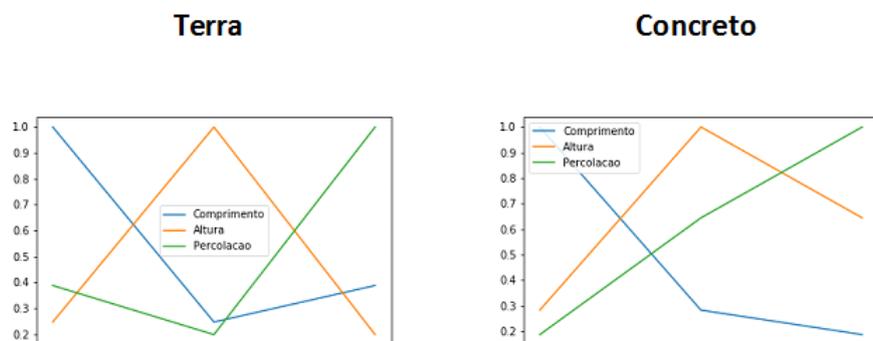


Figura 4.18: Estudo de Correlações por Nível de Percolação. Fonte: Autor.

Sendo os efeitos da relação altura *versus* comprimento observados de modo mais representativo para as barragens de terra e de enrocamento. De modo geral 48% das UHE's de terra posicionaram-se em categorias de nível 4 ou 5 contra 37,5% de UHE's de concreto. 88,89% das PCH's de terra posicionaram-se em categorias de nível 1 a 3 contra 62,5% das PCH's de concreto. A distribuição das barragens por categoria de risco é apresentada na Figura 4.19.

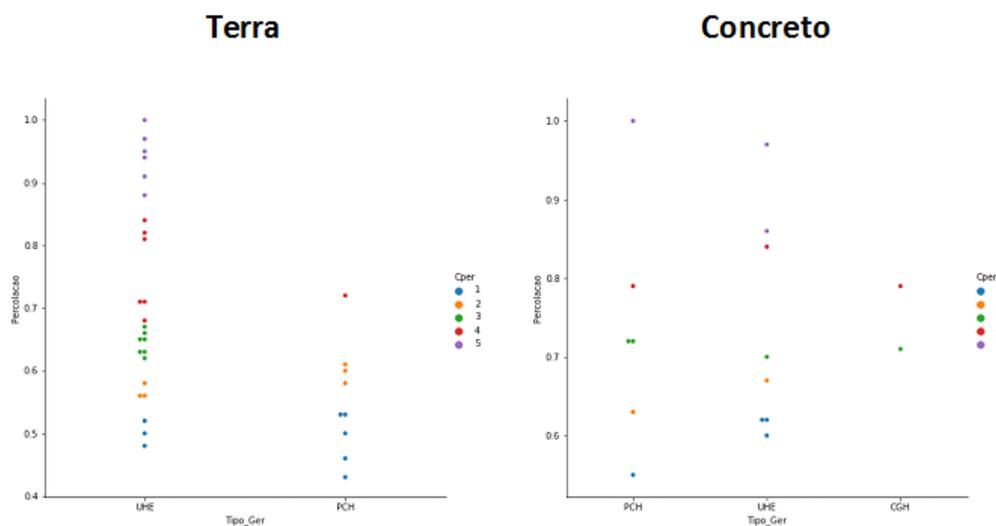


Figura 4.19: Distribuição de barragens. Classificação por Nível de Percolação. Fonte: Autor.

Para as barragens de concreto foi registrado um valor médio de pontuação superior ao das barragens de terra. Esse, por sua vez, associado a um baixo coeficiente de variação indicando assim um nível maior da manifestação da anomalia em tais estruturas, apesar

de sua ocorrência em barragens desta natureza, considerando seu grau de coesão, ser em princípio menos preocupante.

Destaca-se a captura pelo modelo de empreendimentos de pequeno porte (2070 e 28755), com histórico significativo deste tipo de ocorrência, conforme descrito no Anexo I. Geograficamente observa-se a vinculação dos valores mais críticos a regiões sujeitas a regimes de afluência mais representativos.

4.3.4.3 Deformação

As barragens devem resistir ao empuxo horizontal de água. Por conta de sua rigidez, barragens de concreto não podem sofrer muitas deformações, sendo indicadas para locais cujo terreno de fundação é composto de rocha com elevada dureza. Ao contrário das barragens de concreto, barragens de terra por sua plasticidade, permitem assentamento em fundações mais deformáveis, sendo indicadas para fundação de qualquer tipo de solo ou rocha [168].

A barragem de terra é a mais comum no Brasil, dotado de vales muito largos e ombreiras suaves, que demandam de grandes extensões de crista, ao mesmo tempo em que se dispõe abundantemente de solo. A Figura 4.20 traz a distribuição geográfica das barragens segundo os resultados calculados para avaliação da susceptibilidade de ocorrência da anomalia deformação.

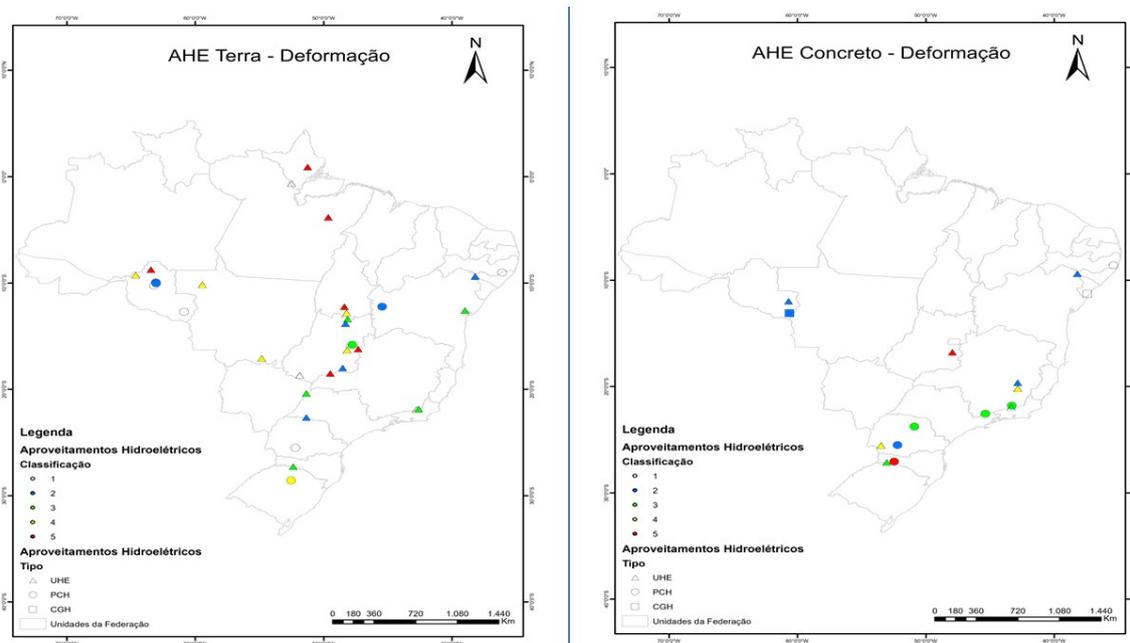


Figura 4.20: Mapa de Situação. Classificação por Nível de Deformação. Fonte: Autor.

De acordo com o modelo, as barragens de concreto apresentaram pontuação média levemente superior às de terra e de enrocamento (0,685 contra 0,707), com um coeficiente de variação menor (0,208 contra 0,186), consistente, portanto, com os conceitos discutidos anteriormente. Os valores de assimetria apontam para uma distribuição assimétrica à direita quando para barragens de terra e próximos a uma distribuição normal no caso das barragens de concreto, conforme ilustrado na Figura 4.21

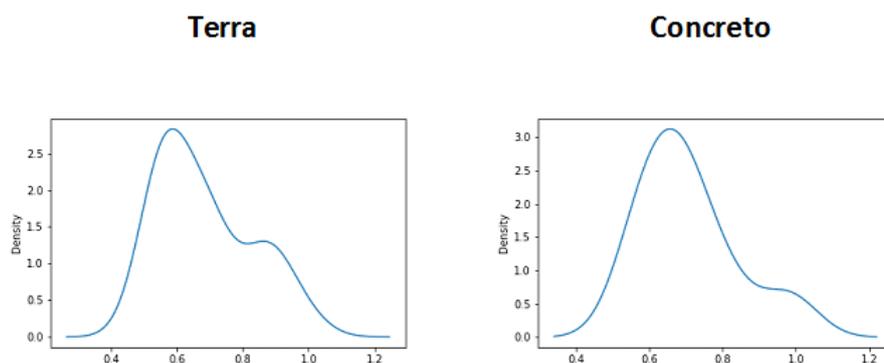


Figura 4.21: Curva de densidade para valores de deformação. Fonte: Autor.

Em concordância com distribuição exibida na Figura 4.22:

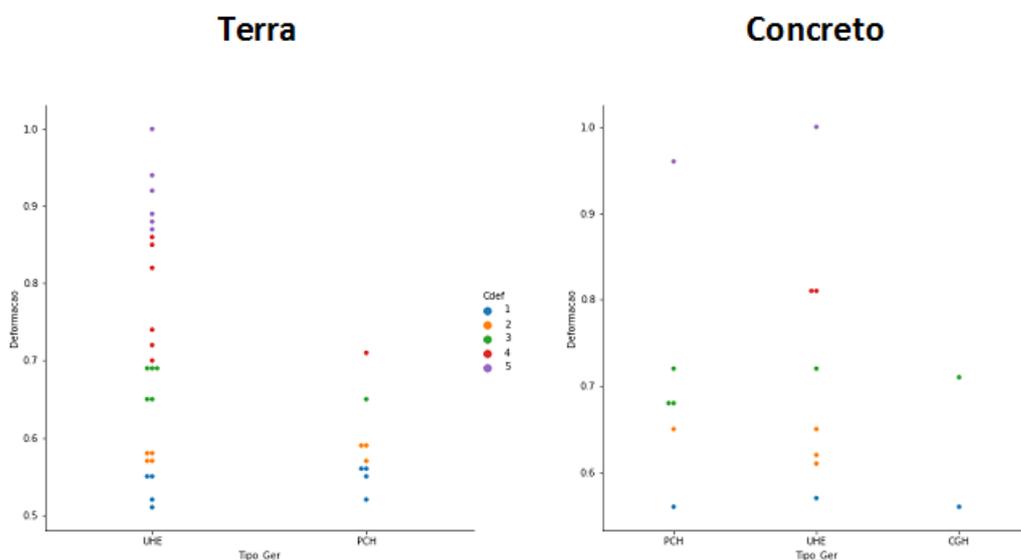


Figura 4.22: Distribuição de barragens. Classificação por Nível de Deformação. Fonte: Autor.

Sendo as barragens de concreto 2835 e 28755, que apresentam respectivamente graus de deformação e de percolação significativos em seu histórico I, capturadas em categorias de risco mais altas, conforme desejado. Para barragens de terra, destacam-se, na Região Norte, as barragens 2687 e 28583, com 1 e 6 km de extensão. Na região Centro Oeste a barragem de terra 528, com 2,9 km de comprimento, classificou-se como de categoria 5.

4.3.4.4 Recalque

A Figura 4.23 traz a distribuição geográfica das barragens segundo os resultados calculados para avaliação da susceptibilidade de ocorrência da anomalia recalque.

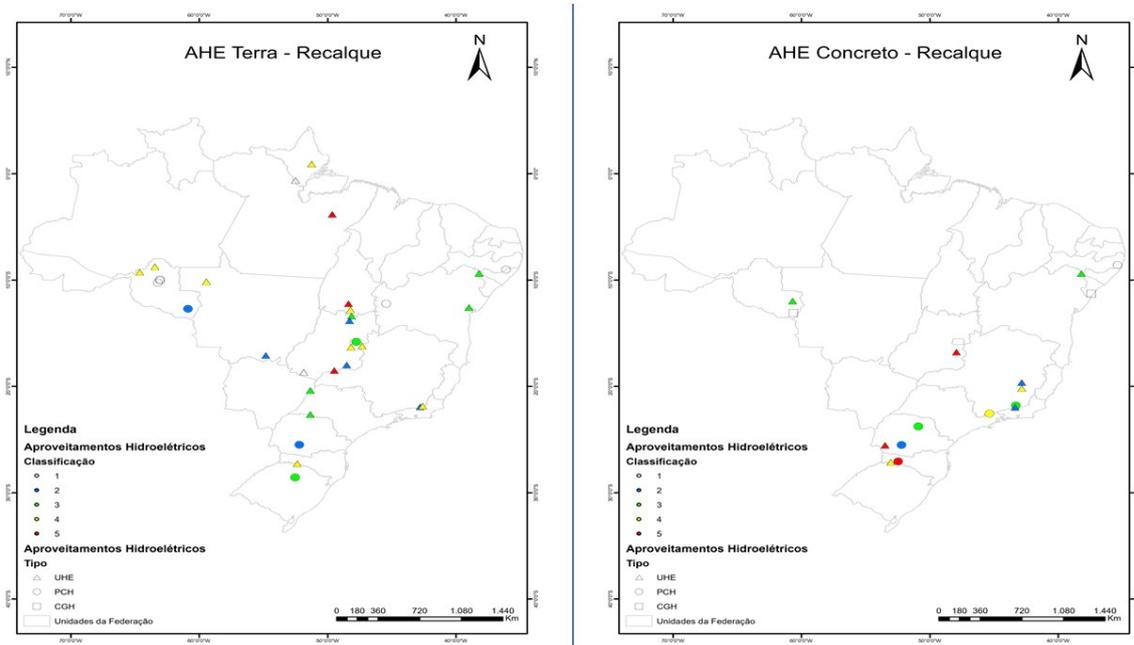


Figura 4.23: Mapa de Situação. Classificação por Nível de Recalque. Fonte: Autor.

Por se tratar de deformações nas fundações, observam-se os conceitos e comportamentos discutidos na seção anterior, sendo esperada, portanto, uma similaridade no tocante aos resultados obtidos. A Figura 4.24 apresenta um comparativo entre os índices de classificação obtidos para as duas anomalias:

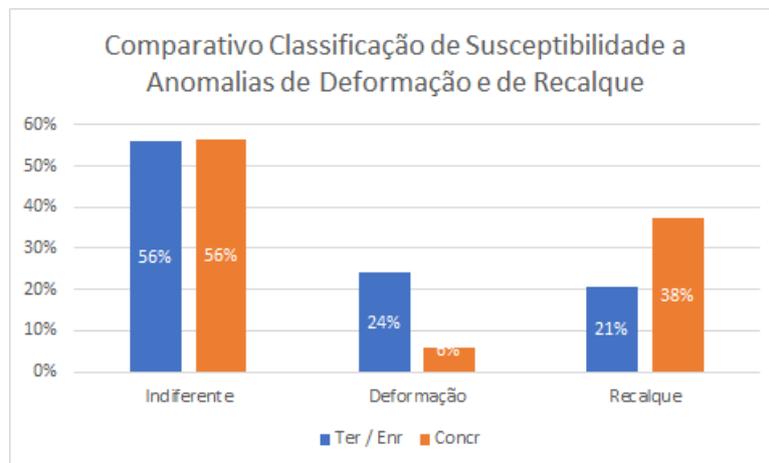


Figura 4.24: Comparativo das dos Níveis de Recalque e de Deformação. Classificação por Nível de Deformacao. Fonte: Autor.

Verifica-se que para as barragens de concreto avaliadas a classificação de risco associada à anomalia recalque é superior à associada às deformações em 38% dos casos. Conforme esclarece Matos [169] o monitoramento de barragens de concreto deve ser planejado em função do tipo da barragem: gravidade, contraforte, gravidade aliviada ou arco e ainda, em função do método construtivo, como o caso de barragem em concreto compactado a rolo. Segundo o autor a maioria das barragens de concreto no Brasil é do tipo gravidade, para as quais, de acordo com o Manual de Critérios de Projetos para Usinas Hidroelétricas da Eletrobras [170] é importante monitorar:

- Subpressão de fundação no contato entre concreto e rocha;
- Temperatura do concreto e sua dissipação ao longo do tempo;
- Deslocamentos, e recalques da fundação.

Consideradas causas de instabilidade em potencial sob condições normais de carregamento, de parte ou da totalidade da estrutura de barramento, corroborando os resultados apresentados na Tabela 2.6, a qual relaciona as principais causas de acidentes em barragens de concreto.

A Figura 4.25 apresenta graficamente os resultados das correlações estabelecidas entre os índices de risco calculados para as anomalias de deformação e de recalque com relação às características de altura e comprimento associadas a cada barragem.

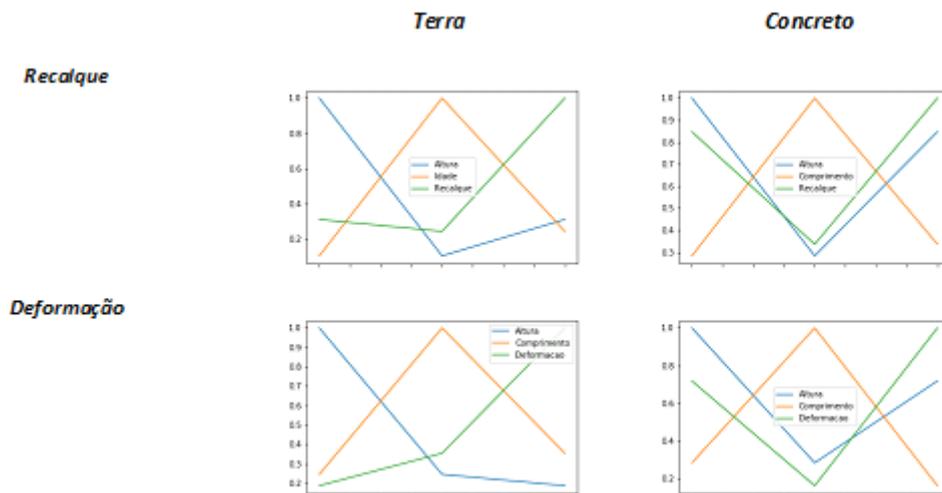


Figura 4.25: Estudo de Correlações. Comparativo dos Níveis de Recalque e de Deformação. Fonte: Autor.

Constata-se certa elevação do grau de risco à medida em que se incrementam as dimensões do maciço, que evolui a uma taxa mais acentuada para as estruturas de concreto.

Restringindo-se a amostra às UHE's e recalculando-se as correlações para a anomalia de deformação recalque com relação às características de Volume do Reservatório e Comprimento, tem-se Figura 4.26:

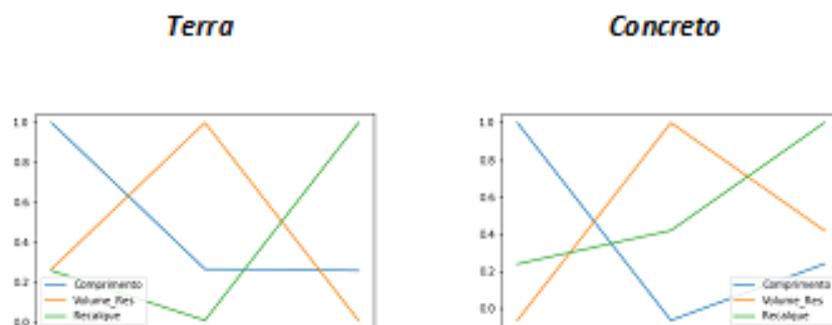


Figura 4.26: Estudo de Correlações por Nível de Recalque. Fonte: Autor.

Obtendo-se níveis de correlação de maior consistência, sugerindo a influência do peso do volume do reservatório associado à estrutura. De fato, Nobari e Duncan [171], em uma revisão detalhada dos casos históricos de movimentos em barragens causados pelo enchimento de reservatório, constataram que o carregamento ocasionado pela pressão d'água ocasiona movimentos na direção de jusante sendo o aumento dessa carga proporcional ao quadrado da altura d'água, e ainda mais pronunciado em fases posteriores ao enchimento.

Conforme resultados do modelo, para a suscetibilidade à anomalia de recalque, 19 barragens foram classificadas como de categoria 4 ou 5. Destas 17 foram UHE's, estando 50% das UHE's de concreto participantes da amostra classificadas entre as 15 primeiras.

4.3.4.5 Escorregamento

Quando a superfície de um terreno não é horizontal, produzem-se esforços tangenciais que tendem a mover o solo para as regiões mais baixas, comprometendo de forma severa a estabilidade de uma estrutura, ocasionando seu deslizamento e/ou tombamento.

Ao movimento de massa de terra nestas circunstâncias dá-se o nome de escorregamento, sendo este tipo de episódio indesejável a qualquer barragem. Escorregamentos de encostas podem formar ondas no reservatório, as quais podem galgar a barragem e causar graves danos nos taludes a jusante [170].

Estudos quanto ao risco de escorregamento são recorrentes em projetos de estabilidade de barragens de concreto à gravidade, onde são avaliados os efeitos dos parâmetros da interface entre concreto e rocha.

A ação da água é uma das maiores responsáveis pela ocorrência de escorregamentos. Essa, ao encharcar o solo, contribui para a perda de sua resistência.

A Figura 4.27 traz a distribuição geográfica das barragens segundo os resultados calculados para avaliação da susceptibilidade de ocorrência da anomalia escorregamento.

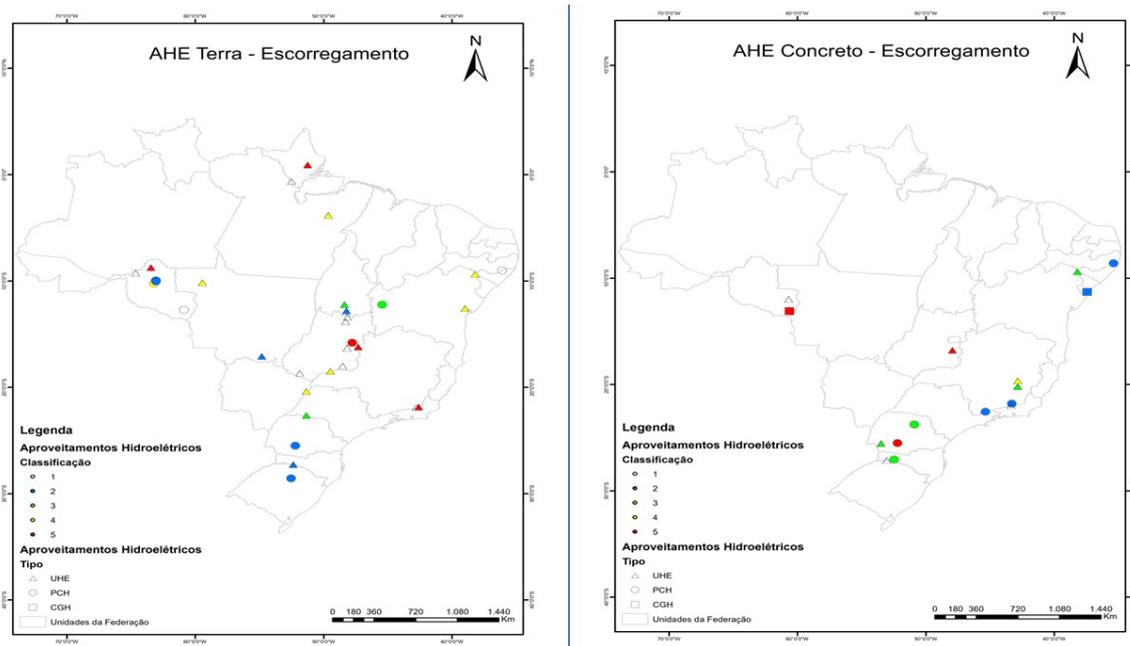


Figura 4.27: Mapa de Situação. Classificação por Nível de Escorregamento. Fonte: Autor.

Constata-se a sensibilidade do modelo ao posicionar em categorias de maior risco as barragens localizadas nas regiões Central e Norte do país, caracterizadas por bacias sedimentares, detentoras, portanto, de solo com maior permeabilidade. Tais regiões foram palco dos acidentes decorrentes da ruptura por escorregamento das barragens hidroelétricas de Apertadinho (Rondônia) e Espora (Goiás), ocorridos em 2008.

4.3.5 Análise da Classificação ELECTRE TRI

Atestadas a acurácia dos resultados do modelo fundamentado em conjuntos *Fuzzy*, o modelo ELECTRE TRI foi aplicado no sentido de um agregar todas os julgamentos e informações acerca do problema estudado, produzindo uma classificação geral dos empreendimentos, conforme visualizado na Figura 4.28.

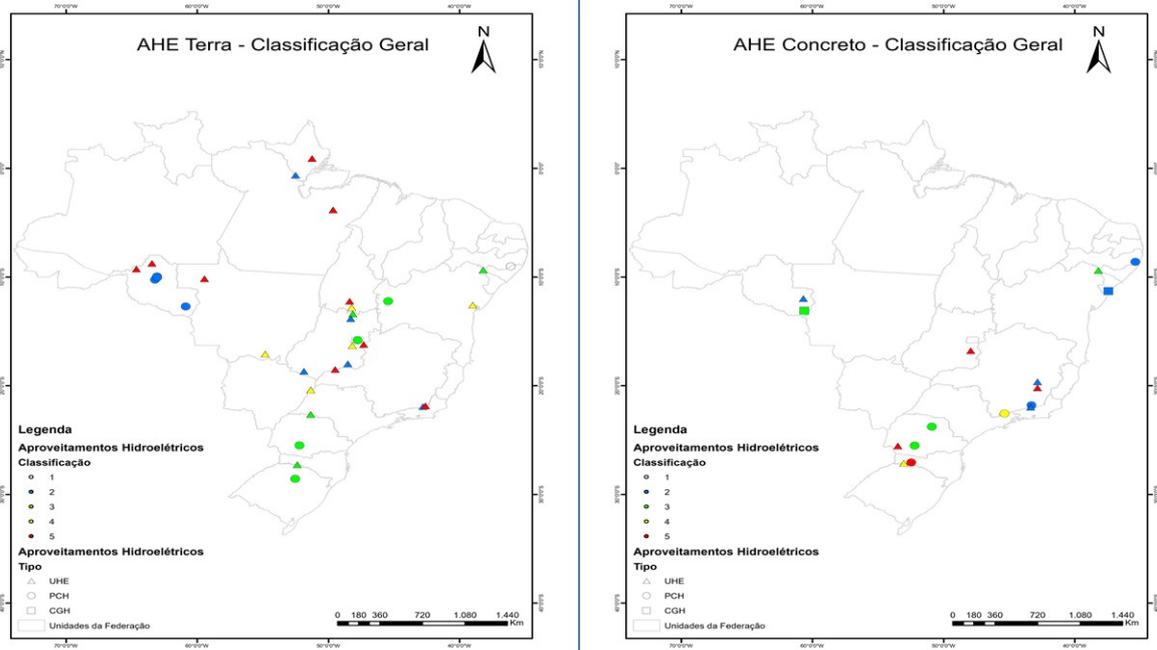


Figura 4.28: Mapa de Situação. Resultado da Classificação de Barragens pelo Método ELECTRE TRI. Fonte: Autor.

A avaliação dos resultados quanto a sua efetividade decorre do processo de calibração do método, promovido na Seção 4.3.3.6.

Os resultados da Classificação ELECTRE TRI podem ser agregados em uma Matriz de Classificação dos Riscos, a qual classifica o risco em função de um evento, combinando a ordenação da probabilidade da ocorrência do fato à classificação de sua severidade. Conforme diretrizes do *UK Health and Safety Executive - HSE* [172] existem duas classificações determinantes: quanto à probabilidade da ocorrência; e, quanto à sua severidade. Combinadas elas resultam em uma classificação final.

Segundo a ABNT [74], uma matriz de probabilidade/consequência é utilizada para classificar os riscos, fontes de risco ou tratamentos de risco com base no nível de risco. Ela pode ser adotada como ferramenta de estabelecimento de prioridades para tratamento, de quais seriam aceitáveis ou por qual nível de gestão o risco deveria ser tratado. Pode também ser utilizada para auxiliar na comunicação, visando à compreensão comum dos níveis qualitativos dos riscos por toda a organização ou por todos os envolvidos e responsáveis pela gestão de risco.

No caso da gestão de risco de segurança em barragens, Matriz de Classificação dos Riscos, definida em termos de Categoria de Risco (CRI) e de Dano Potencial Associado (DPA), apresentada na página 10, funciona como uma importante ferramenta de planejamento, pois permite, tanto aos empreendedores quanto aos servidores da Agência Nacional

de Energia Elétrica, a canalização de esforços para as estruturas que constituam ameaça maior para a sociedade.

O formato da matriz de risco e as definições a ela aplicadas dependem do contexto em que é utilizada. Há diretrizes para a construção da matriz de risco, em termos de estabelecimento das categorias, ou escala de pontos, de consequências e de probabilidades, devendo estas adequarem-se às circunstâncias do ambiente em que serão aplicadas.

Para o estudo em questão, foram considerados como resultados de probabilidade os decorrentes do processo de classificação providos, na Seção 4.3.3, pelo método ELECTRE TRI. Como classificadores de severidade, ou de gravidade das consequências decorrentes da ruptura, foram considerados os resultados de avaliação quanto ao Dano Potencial Associado obtidos no processo de autoavaliação realizado via aplicação dos FSB's, qual subdivide-se em 3 (três categorias): Alto (A), Médio (B) e Baixo (C), conforme matriz de classificação Tabela II.1, do Anexo II.

As classificações obtidas nas classes da severidade e da probabilidade do eventos, são combinadas dentro da Matriz de Classificação dos Riscos, alcançado a classificação final do risco associado ao evento, conforme proposto na Tabela 4.20:

Tabela 4.20: Matriz de Classificação de Riscos

Categoria de Risco – CRI (ELECTRE TRI)	Dano Potencial Associado – DPA (REN 696/2015 - ANEEL)		
	A	B	C
5	5	5	5
4	5	5	4
3	5	4	3
2	4	3	2
1	3	2	1

Fonte: Autor.

E cujos resultados podem ser visualizados na Figura 4.29:

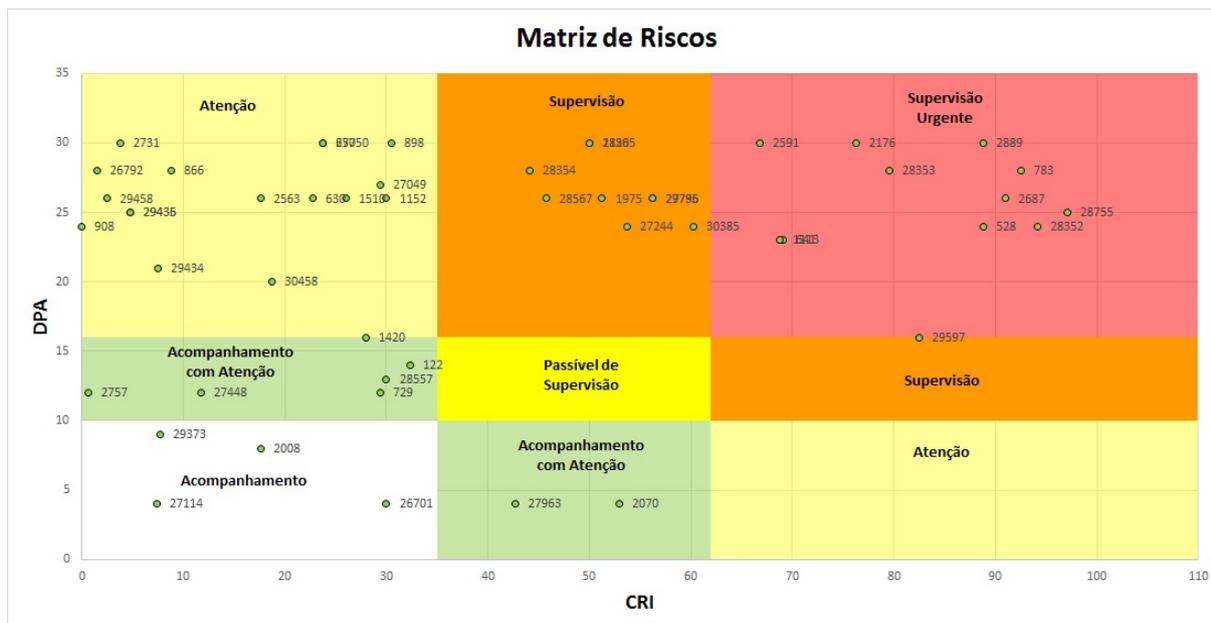


Figura 4.29: Matriz de Classificação de Risco. Fonte: Autor.

Tal mapa revelou-se mais adequado como ferramenta para planejamento e alocação de recursos órgão de fiscalização, sendo, na visão de seus técnicos, mais aderente à missão e aos objetivos da sua área de atuação.

4.4 Objetivo Específico 3: Validar os Fatores de Risco Associados às Barragens por Intermédio de Entrevistas Semiestruturadas Realizadas com os Engenheiros Responsáveis pela Segurança dessas Estruturas

A reincidência de acidentes e incidentes em barragens leva a questionar os motivos pelas quais as medidas de controle adotadas não surtem os efeitos esperados. Ao mesmo tempo, a prevenção de novas tragédias mediante a mitigação dos riscos depende das lições extraídas dos incidentes e acidentes, independente do porte desses. Os princípios da teoria multicausal, discutidos na Seção 2.4, suscitam que esse aprendizado não se limite à análise de fatores imediatos, razões óbvias apontadas como responsáveis pela ocorrência não podem ser tomadas como suficientes.

De fato, os acidentes resultam de uma sequência de eventos, representados pela interação de fatores técnicos e comportamentais. Assim, os fatores podem ser: subjacentes (razões sistêmicas ou organizacionais menos evidentes); latentes (condições iniciadoras

que possibilitam o surgimento de todos os outros fatores relacionados ao evento adverso) e contribuintes (outros fatos que ocorreram na empresa ou com os envolvidos que podem ter contribuído para a ocorrência do acidente) [173]. Esses dados têm grande importância na identificação da causa raiz.

O desafio de toda análise de acidente é objetivar os determinantes concretos das decisões e formas de agir. Nesse sentido, buscou-se a validação dos fatores de risco associados às barragens utilizados neste estudo mediante a realização de pesquisa *on-line* com os responsáveis técnicos pela segurança dessas estruturas, cujas respostas obtidas são apresentadas a seguir. O questionário utilizado na pesquisa é apresentado no Anexo IV desta pesquisa.

4.4.1 Análise das Questões 1 a 3

- **Identifique seu barramento quanto ao porte de geração.**
- **Identifique seu barramento quanto ao tipo construtivo.**
- **Em qual região do país seu barramento está localizado?**

As questões de 1 a 3 do questionário tiveram por finalidade descrever o conjunto de respondentes, segregando-o porte de geração (CGH, PCH e UHE), tipo construtivo e região de localização.

Desse universo 47% dos respondentes são PCH's e 36% UHE's, refletindo o posicionamento histórico desses em termos de preocupação com padrões segurança, dado o porte dos empreendimentos por estes operados. A Figura 4.30 traz a consolidação das repostas apuradas.

A concentração de empreendimentos na Região Sul e Sudeste reflete o perfil da matriz de geração hidrelétrica nacional, conforme cenário exibido na 1.2, apresentando concentração de empreendimentos nas regiões de maior patamar de industrialização.

Além de estarem presentes em maior quantidade, PCH's possuem volumes de espera e tempos de recorrência menores, estando sujeitas a vertimentos a nível diário ou semanal, sendo fortemente dependentes da confiabilidade de suas estruturas extravasoras. Justificando-se assim o amplo interesse de contribuição dessa fonte, particularmente refletido no número de respondentes localizados na Região Sul do país, caracterizada pela alta variabilidade em seus regimes e fluxos hidrológicos.

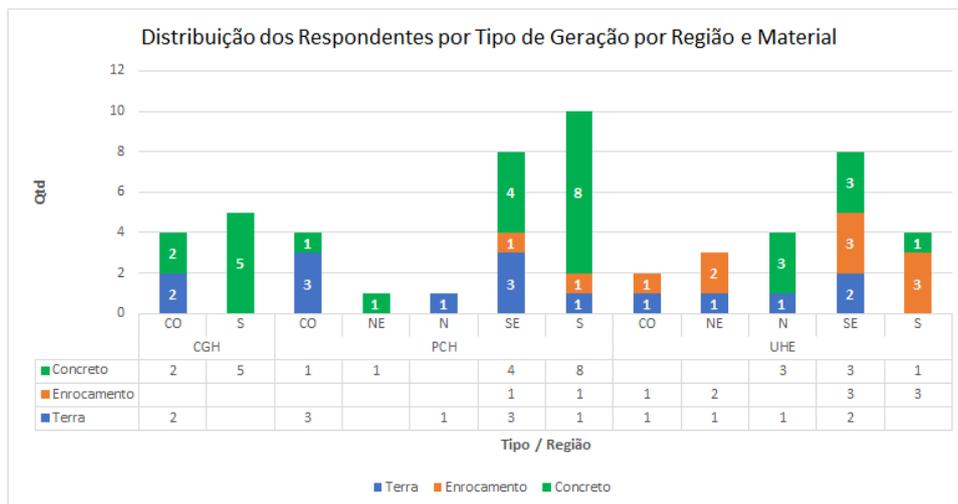
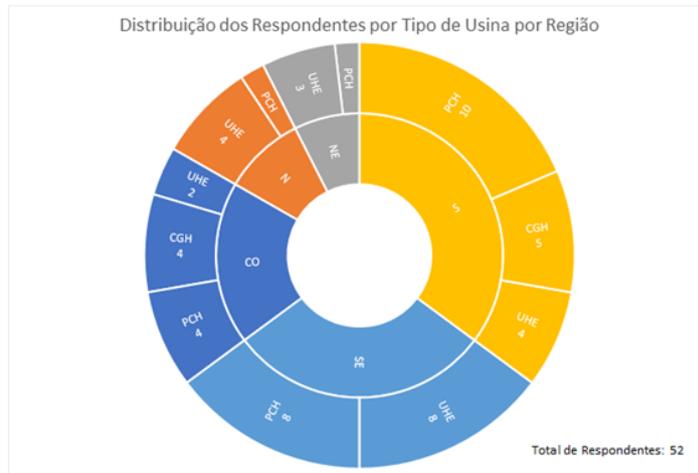


Figura 4.30: Respostas para as Questões de 1 a 3: Descrição do Conjunto de Respondentes. Fonte: Autor.

As perguntas de 4 a 6 do questionário solicitaram aos respondentes que estes comparassem os fatores de risco previstos na Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012, classificando-os em ordem de preferência. Tais fatores têm como objetivo representar, de acordo com os estudos estatísticos de ruptura já existentes, o índice de vulnerabilidade a um acidente do maciço.

Para identificação da opção de resposta com maior grau de preferência foi gerado um *score* calculado em termos da média ponderada extraída entre a posição da resposta e a contagem de respostas por opção de resposta. Os pesos foram aplicados na ordem inversa, de modo que a opção de preferência dos respondentes (classificada como nº 1) tivesse o maior peso, e a opção de menor preferência (classificada na última posição), peso 1.

4.4.2 Análise da Questão 4

- Classifique em ordem decrescente de importância os fatores de risco estipulados para o grupo Características Técnicas.

A questão 4 abordou os fatores de risco associados ao grupo de Características Técnicas, cuja consolidação das repostas pode ser visualizada na Figura 4.31.

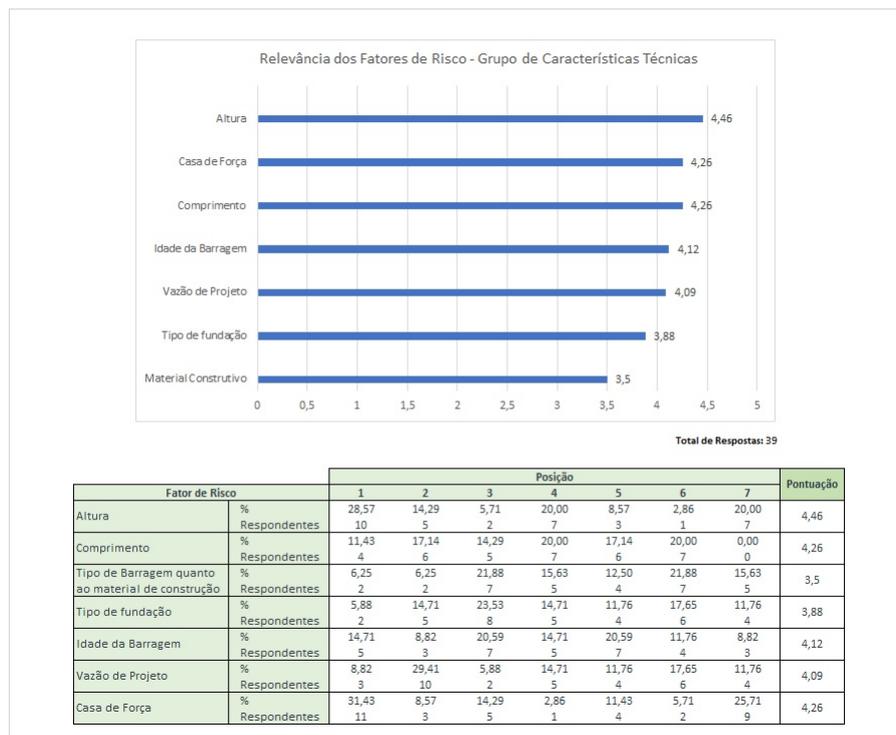


Figura 4.31: Respostas para Questão 04. Fonte: Autor.

As Características Técnicas são inerentes à construção do barramento, não oferecendo condições de intervenção pela equipe de segurança da barragem. No entanto algumas destas são, como abordado no início deste capítulo, essenciais para a mensuração do grau de susceptibilidade da barragem a determinadas anomalias.

Altura, localização da Casa de Força e comprimento posicionaram-se como os três mais importantes fatores de risco a serem observados. Todos fatores objetivos, de fácil identificação e mensuração. A definição do tipo de fundação, da idade da barragem e da vazão de projeto (principalmente para estruturas mais antigas), embute certo grau de imprecisão caso a memória dos documentos da usina não apresente os dados de projeto, relatórios de sondagem e perfis geotécnicos na região de implantação do barramento.

Utilizando dados extraídos do Boletim 99 [3], Fusaro [59] correlacionou o número de rupturas ocorridas em barragens com suas alturas, constatando a ocorrência maior de casos em barragens de pequena altura, conforme gráfico da Figura 4.32. Como explicação

possível para tal comportamento Fusaro sugere a baixa percepção do risco em estruturas menores, o que conduz a projetos e construções de qualidade inferior, assim como monitoramento insuficiente na fase de operação. Entretanto, ao comparar o percentual de barragens existentes por altura, a autora verificou que o percentual de ruptura praticamente independe deste fator.

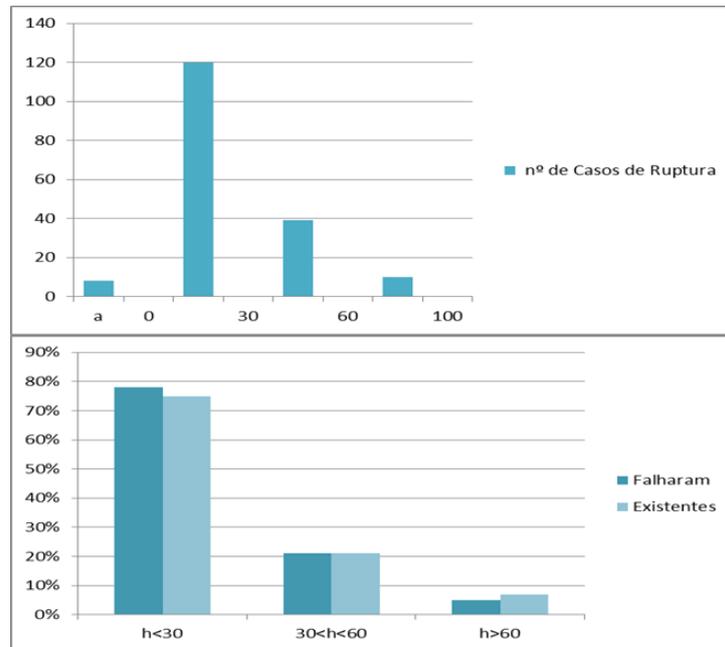


Figura 4.32: Correlações entre número de barragens rompidas até 1988 e sua altura. Fonte: Fusaro, 2011 [59].

Não obstante a mensuração do fator de risco com base na altura do barramento é aceitável, considerando-se que o potencial de dano a jusante é maior no caso de barragens mais altas.

O emprego do comprimento como um fator de risco não é usual nos estudos estatísticos de ruptura de barragens. Entretanto, dentro da lógica anterior, barragens mais longas estariam sujeitas a um potencial de risco maior pela sua extensão permitir uma maior variabilidade nos materiais de fundação e de construção.

Posicionados como menos representativos o Tipo da Barragem quanto ao Material de Construção e o Tipo de Fundação sempre são analisados nos estudos estatísticos de rupturas de barragens. Conforme esclarece Fusaro [59], o maior número de casos de ruptura ocorre em barragens de terra e enrocamento, levando a uma falsa percepção de que este tipo de barragens seria muito mais “insegura” que barragens de concreto. Entretanto, raciocinando em termos de percentual de barragens existentes de cada tipo e incluindo o fator altura nesta análise, observa-se que esta não é uma verdade absoluta. Estatisticamente, o percentual de falhas em barragens de terra e enrocamento é realmente

maior, mas esta diferença é em parte compensada pela quantidade e altura das estruturas, como mostrado nas Figura 4.33:

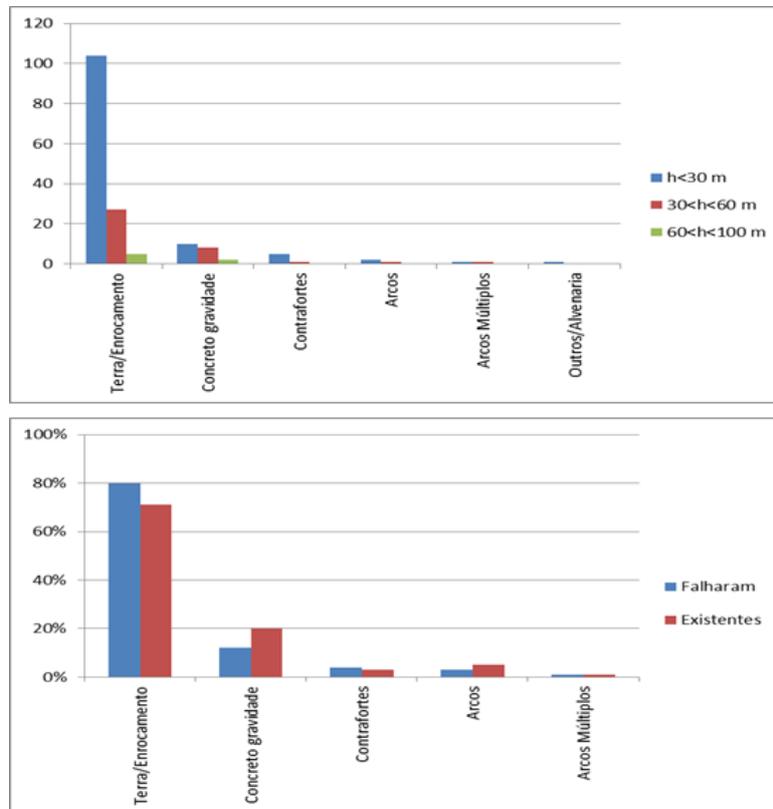


Figura 4.33: Correlações entre número de barragens rompidas até 1988 e tipo de material de construção. Fonte: Fusaro, 2011 [59].

Quanto à importância do tipo de fundação e seu tratamento para a segurança, no caso de barragens de concreto, a causa principal de ruptura está associada a problemas de fundação, com destaque para resistência ao cisalhamento e erosão interna. No caso de barragens de terra/enrocamento, a fundação também se destaca como causa de rupturas, embora os maiores “vilões” sejam o galgamento e a erosão interna. Ratificando-se, portanto, a suposição de que a classificação deste critério como pouco relevante pelos especialistas atribui-se ao grau de imprecisão embutido na memória dos documentos.

Afora resultados gerais, CGH’s e PCH’s apontaram altura, Tipo de fundação e Tipo de barragem quanto ao material de construção como fatores mais relevantes para mensuração de risco. PCH’s e UHE’s deram destaque a comprimento e vazão de projeto.

Faz-se destaque à conclusão do estudo de Melo, 2006 apud Colle, o qual conclui que a insuficiente capacidade de vazão ou o mau funcionamento dos órgãos de descarga de cheias representam cerca de 42% das causas de rupturas de barragens. No caso das barragens de aterro com altura inferior a 15 metros esta proporção sobe para 77%.

4.4.3 Análise da Questão 5

- Classifique em ordem decrescente de importância os fatores de risco estipulados para o grupo Estado de Conservação.

A questão 5 abordou os fatores de risco associados ao grupo de Estado de Conservação, para a qual a estratificação das repostas pode ser visualizada na Figura 4.34.

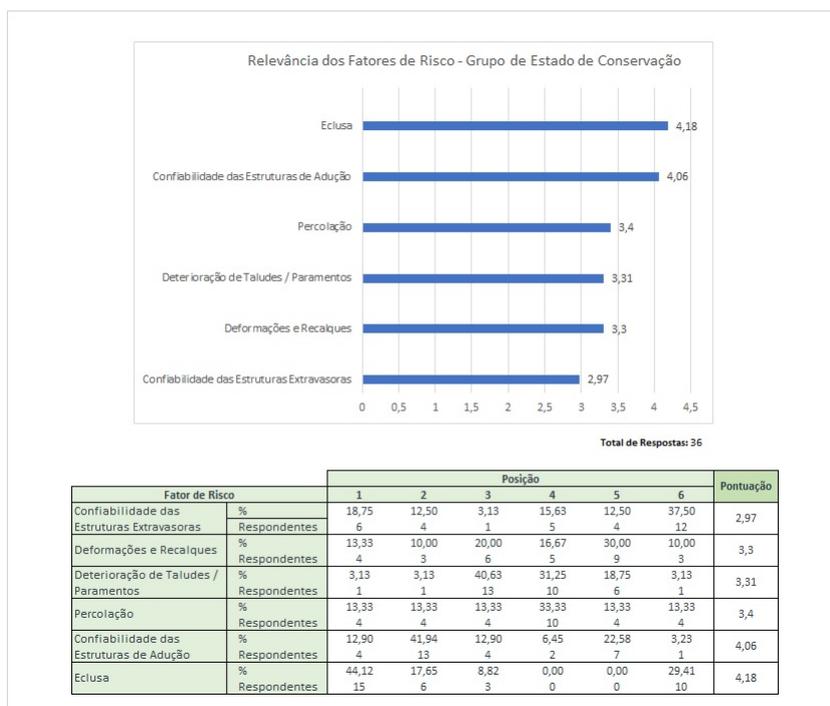


Figura 4.34: Respostas para Questão 05. Fonte: Autor.

O Estado de Conservação abarca todas as atividades de manutenção das condições de integridade de um barramento e que são de responsabilidade explícita do empreendedor, conforme estabelecido na Lei nº 12.334/2010.

Historicamente observa-se que os acidentes de barragem decorrem em maior frequência por questões vinculadas a [59]:

- Falha hidráulica devido a níveis anormais, incluindo galgamento e subsequente erosão do aterro da barragem, além de tombamento;
- Movimentação de Massa causada por carregamentos extraordinários, propriedades inadequadas de materiais ou falhas geológicas não detectadas; e
- Deterioração e erosão interna, identificada pela ocorrência de *piping* (retroerosão ou erosão).

Sendo essas os principais focos de investigação em estudos de risco e inspeções em barragens, em detrimento a confiabilidade das estruturas de adução e presença de eclusas. Provavelmente pelo fato de serem pouco observadas ou consideradas, essas últimas, entretanto, foram apontadas como altamente representativas para composição de uma boa análise de risco.

A Confiabilidade das estruturas de adução busca avaliar o risco de ruptura de uma estrutura de adução, permitindo a liberação de volume significativo do reservatório para jusante. Este fator é especialmente importante quando não existem estruturas de controle de vazão a montante de canais de adução e de condutos enterrados, implicando na impossibilidade de fechar a entrada de água quando detectado qualquer problema. Portanto, apesar de não devidamente explicitado nos estudos, deve-se atentar para a existência de tubulações e galerias enterrados no corpo da barragem e o posicionamento das estruturas de controle de vazão destes condutos (a montante ou a jusante do corpo da barragem). A existência de um conduto enterrado dificulta a compactação na sua proximidade, podendo criar um caminho preferencial de percolação, além de um possível recalque do maciço ou fundação poder causar a ruptura do próprio conduto [59].

Eclusas, apresentam uma série de limitações devido aos esforços hidráulicos a que estão submetidas quando em operação. Processos erosivos desencadeados por fenômenos de abrasão e cavitação, uma vez não devidamente identificados, monitorados e controlados podem inviabilizar sua operação, colocando toda a estrutura em risco, o que faz com que entendimento de seu comportamento hidráulico seja essencial. A operação e manutenção dessas, cuja responsabilidade por vezes está dissociada do detentor da barragem, sob jurisdição e tutela de entes, esferas administrativas ou empresas independentes, quando não devidamente coordenados constituem fator de risco adicional para ambas estruturas, como no cuidado com a interface existente entre essas e a barragem.

As hidrovias se constituem em um sistema de transporte bastante competitivo. Tendo em vista alterações recentes de legislação em prol da ampliação do sistema hidroviário nacional, como a Lei 13.081/2015, de 2 de janeiro de 2015, que trata da construção e da operação de eclusas ou de dispositivos de transposição hidroviária de níveis em vias navegáveis de rios, esta discussão torna-se ainda mais pertinente. Pela lei, os projetos para construção de novas hidrelétricas devem prever a construção simultânea de eclusas ou de outros mecanismos de transposição de nível. Ficam excluídas dessa regra barragens com aproveitamento de até 50 MW (cinquenta megawatts), assim como aquelas em construção na época da promulgação da nova lei. O texto estabelece também que a manutenção da navegabilidade na barragem é função do responsável pela exploração do reservatório.

4.4.4 Análise da Questão 6

- Classifique em ordem decrescente de importância os fatores de risco estipulados para o grupo Planos de Segurança.

A questão 6 abordou os fatores de risco associados ao grupo de Planos de Segurança, cujas repostas são visualizadas na Figura 4.35.

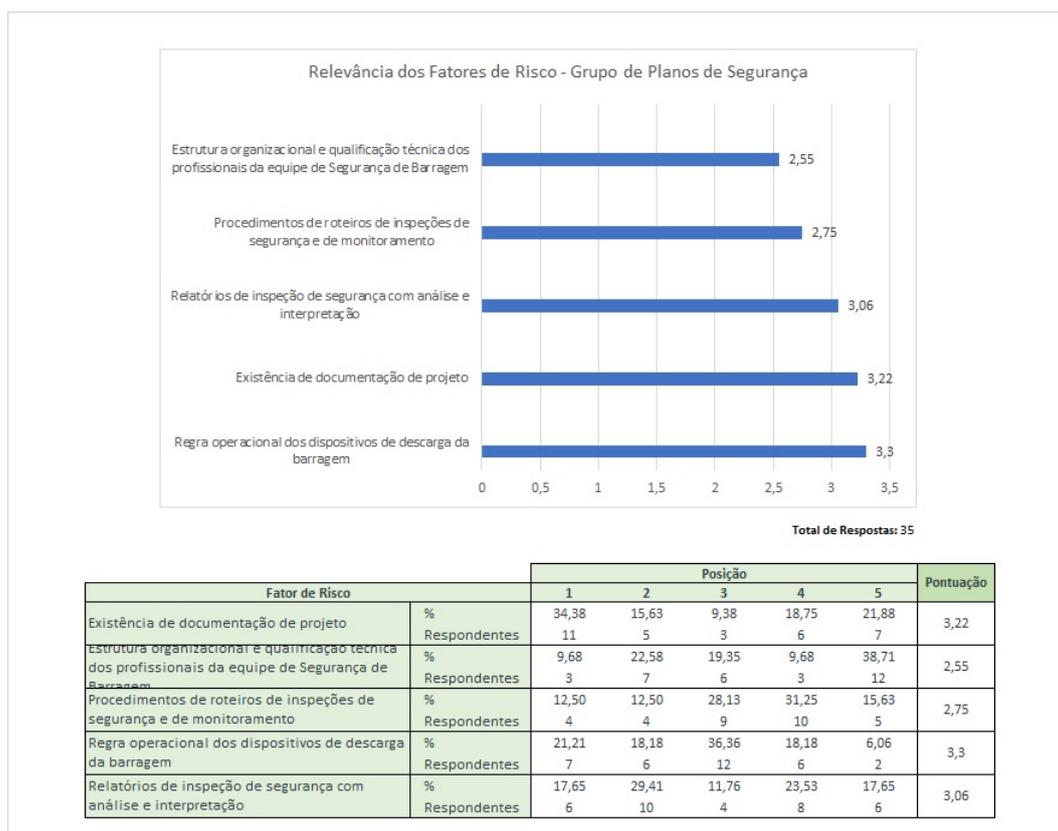


Figura 4.35: Respostas para Questão 06. Fonte: Autor.

O Plano de Segurança da barragem identifica e qualifica as ferramentas disponíveis na estrutura organizacional do empreendedor, tanto do ponto de vista de qualificação da equipe responsável, quanto pela rotina e características das operações de fiscalização e análise de seus resultados.

O fator de risco mais bem pontuado, 'Regra operacional dos dispositivos de descarga', vincula-se diretamente à preocupação com a integridade física da estrutura, visando proteger o barramento de um possível galgamento, sem agravar as condições de cheia a jusante.

A disponibilidade de informações sobre projeto e construção é essencial para o entendimento do comportamento das estruturas e para permitir análises e avaliações de segurança. Instruções de trabalho e procedimentos operacionais mal escritos, desenhos ou

projetos imprecisos são apenas alguns exemplos que refletem erro humano. Uma documentação inconsistente adiciona incertezas que poderiam ter sido evitadas, justificando-se a escolha da '(In)Existência de documentação de projeto' como fator de risco relevante.

No caso de barragens antigas, onde inexitem ou são desconhecidos os projetos, o empreendedor poderá fazer um levantamento cadastral das estruturas para obter: a geometria, informações sobre as fundações e materiais de construção. O grau de detalhamento deste levantamento depende da complexidade das estruturas, mas deve permitir a análise de estabilidade global do barramento e a determinação da capacidade dos órgãos extravasores [59].

Em seguida demonstra-se preocupação com os 'Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação', documentos que consolidam as informações sobre a segurança da barragem, avaliando de forma integrada os dados obtidos por meio das inspeções visuais e dados da instrumentação instalada, quando pertinente.

Mantendo a coerência da classificação deve-se buscar construir procedimentos específicos para cada barragem que englobem atividades de manutenção preditiva, visando antecipar possíveis riscos para o empreendimento. A estrutura organizacional deve estar descrita de maneira compatível quanto comparada com o quesito procedimentos. Observa-se, no entanto que, na Resolução, não é avaliado o nível de aderência do conteúdo dos relatórios com a regulamentação específica.

Uma vez avaliada a relevância dos fatores de risco previstos em regulamento, os especialistas foram incitados a criticar o regulamento no sentido de contribuir para o aprimoramento desse, tendo como ponto de partida as questões de 7 a 9 do questionário, discutidas a seguir.

4.4.5 Análise da Questão 7

- Assumindo a possibilidade de aprimoramento da Política Nacional de Segurança de Barragens, algum dos fatores de risco dentre os elencados anteriormente é descartável?

A questão 7, admitindo a possibilidade de aprimoramento da Política Nacional de Segurança de Barragens, questionou se algum dos fatores de risco dentre os anteriormente elencados é descartável, cujas respostas são exibidas na Figura 4.36.

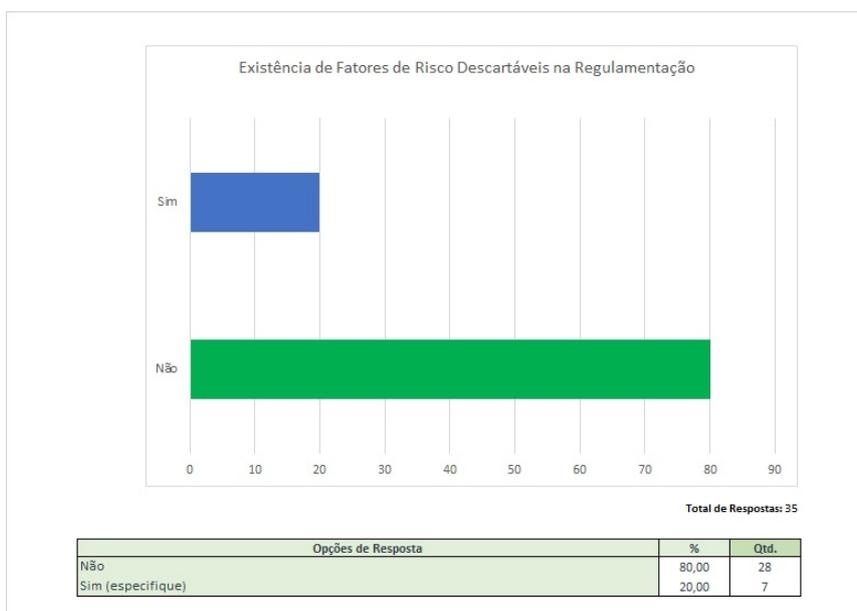


Figura 4.36: Respostas para Questão 07. Fonte: Autor.

Das respostas abertas obtidas quatro entenderam ser a avaliação de eclusas desnecessária, uma apontou como descartável a confiabilidade das estruturas de adução, uma indicou casa de força associada ao barramento e uma reforçou que todos os fatores de risco indicados são relevantes.

Adicionalmente uma das respostas sugeriu verificar-se a "necessidade de revisão do contrato de concessão por projeto *versus* a possibilidade de inserção de dispositivo de fundo para esvaziamento de reservatórios.

A escolha do fator de risco eclusa como relevante pode ser atribuída à (a) baixa disseminação dessas no setor (apenas 23 no universo de 890 barragens avaliadas), e (b) ao fato de que eventuais problemas associados à existência de uma eclusa já poderiam ser avaliados pelos demais fatores existentes na legislação: possibilidade de percolações indevidas no contato estrutura da eclusa/barragem de terra e/ou enrocamento (já avaliado pelo fator Percolação), recalques diferenciais entre as estruturas (já avaliado pelo fator Deformações e recalques).

4.4.6 Análise da Questão 8

- **Assumindo a possibilidade de aprimoramento da Política Nacional de Segurança de Barragens, algum dos fatores de risco dentre os elencados anteriormente merece ser revisado?**

A questão 8 admitindo a possibilidade de aprimoramento da Política Nacional de Segurança de Barragens, questionou se algum dos fatores de risco dentre os anteriormente elencados é passível de revisão, para a qual obtiveram-se as seguintes respostas retratadas na Figura 4.37:

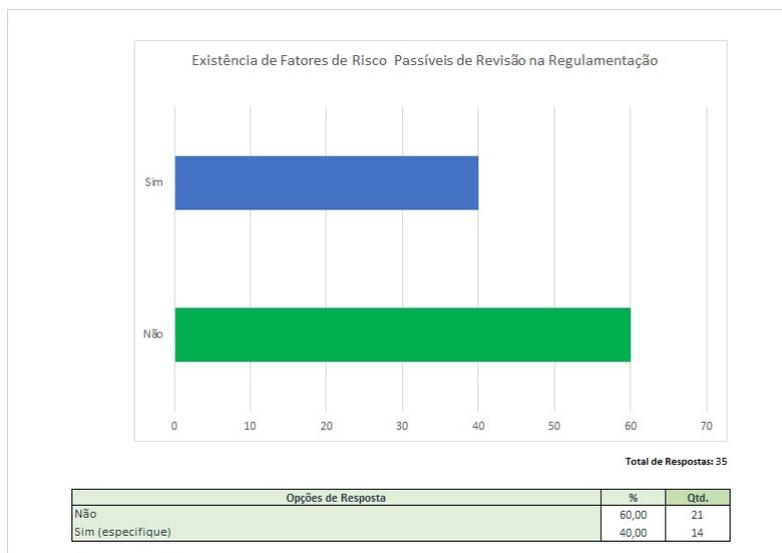


Figura 4.37: Respostas para Questão 08. Fonte: Autor.

Dentre as 14 respostas abertas registradas, cinco fizeram referência à Documentação, conteúdo dos Relatórios de Vistoria e Planos de Ação Emergencial (PAE) como principais fatores. Para este último, duas das cinco respostas apontaram a necessidade de acréscimo de uma escala específica de avaliação, abordando nessa, inclusive, a prática de treinamentos e simulações.

Três respostas abordaram a matriz de 'Características Técnicas' da barragem sugerindo a incorporação de métricas vinculadas ao volume do reservatório, considerando-o tão ou mais importante quanto a dimensão de altura da estrutura. Na visão destes especialistas, uma avaliação restrita à altura muitas vezes posiciona desnecessariamente uma barragem em uma condição de risco maior.

Complementarmente, duas dessas respostas recomendaram a simplificação da matriz para os casos em que, limitado à caixa do rio, o volume de eventual rompimento fique restrito aos limites do próprio curso d'água, não representando riscos a terceiros. Observa-se que a matriz de avaliação de 'Características Técnicas' também realiza uma avaliação

do comprimento da barragem, sugerindo a ideia de uma avaliação indireta de volume de reservatório.

Duas respostas abertas demonstraram preocupação com o vale, sugerindo a formulação de critérios mais específicos com relação aos danos e impactos a jusante promovidos pelo barramento em caso de ruptura.

Duas respostas apontaram a necessidade de maior 'granularidade' em termos de classes para avaliação da barragem quanto à sua natureza construtiva (atualmente três) e tipos de fundação.

Uma resposta sugeriu a utilização de pesos diferenciados para patologias de natureza construtiva diferente, abordagem seguida por este trabalho. Uma resposta demonstrou preocupações com efeitos de recalque e diferenciais de pressão. Uma resposta considerou que toda a regulamentação e seus fatores deveriam ser revisados.

4.4.7 Análise da Questão 9

- Considerando a possibilidade de aprimoramento do sistema de categorização de barragens, indique abaixo temas que considere relevante (Marque até 3 caixas).

A questão 9, considerando a possibilidade de aprimoramento do sistema de categorização de barragens, solicitou aos respondentes que indicassem até 3 fatores riscos importantes não abarcados pela Lei, tendo como base uma lista de temas pré-definidos. Os resultados deste questionamento são exibidos na Figura 4.38

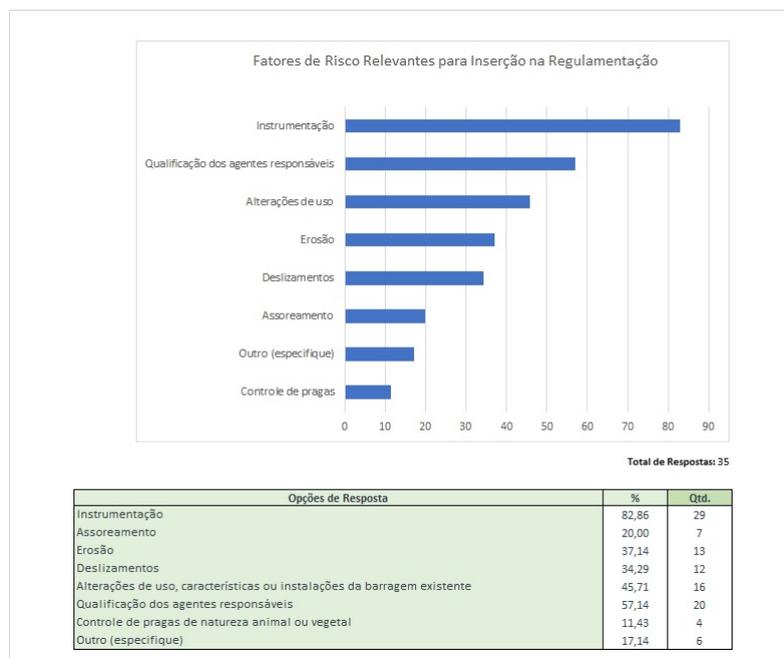


Figura 4.38: Respostas para Questão 09. Fonte: Autor.

Em 82% dos casos a instrumentação foi apontada como principal ponto de preocupação pelos especialistas. As barragens são obras de engenharia múltipla, em que o projeto, a construção e operação envolvem vários ramos do conhecimento que se integram e resultam numa grande intervenção artificial na natureza. Dada tais condições, desnecessário dizer que toda barragem, independentemente do tipo, constituição, localização e destinação, deve ser monitorada. A instrumentação é a ferramenta objetiva desse monitoramento. Sua relação intrínseca com os parâmetros de projeto estabelece os valores de controle ou de referência, que devem ser observados durante a vida útil da barragem.

Conforme estabelecido pelo Ministério de Minas e Energia - MME: *“Toda barragem deve ser instrumentada, de acordo com seu porte e riscos associados e ter os dados analisados periodicamente com a realização das leituras. Todos os instrumentos devem ser dotados de valores de controle ou limites.”* (Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (MME, 2002).

Neste sentido, a Portaria ANM nº 70.389/2017, de 17 de maio de 2017, ao estabelecer, em seu Anexo V, sua Matriz de Risco para avaliação das 'Características Técnicas' da barragem, apresenta como alternativa a seguinte escala de avaliação (Fator e - Auscultação):

- Existe instrumentação de acordo com o projeto técnico - 0 pontos;
- Existe instrumentação em desacordo com o projeto, porém em processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto - 2 pontos;
- Existe instrumentação em desacordo com o projeto sem processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto - 6 pontos; e
- Barragem não instrumentada em desacordo com o projeto - 8 pontos.

Com 57,14% das escolhas chama atenção a preocupação com a 'Qualificação dos agentes responsáveis'. Nesse momento faz-se uma reflexão com base na proposta apresentada por James Reason [77], professor de psicologia da Universidade de Manchester, Reino Unido, abordada na seção 2.4. Reason sugere um modelo que se conforma em um paradigma voltado para a análise de eventos envolvendo a Saúde Pública. Este modelo, como visto, conhecido como a Teoria do “Queijo suíço”, compara as vulnerabilidades do sistema de saúde aos buracos de um queijo suíço. A representação desse demonstra, conforme exibido na Figura 2.9, o quanto o rompimento das defesas por uma trajetória de falhas pode levar a ocorrência de um erro.

Ressalta-se que para a ocorrência do erro faz-se necessário o alinhamento de diversos orifícios, conforme explicitado na Figura 2.9. A fonte do problema pode ser frequentemente desencadeada por múltiplos fatores, como: falhas estruturais ou pontuais, prática

inadequada ou descuido dos profissionais, cujas consequências geram efeitos adversos. Estas falhas podem assumir diferentes formas, como erros e violações de procedimentos; e, falhas latentes, que dizem respeito a problemas já existentes no sistema. Destaca-se que as falhas ativas não podem ser facilmente previstas. Entretanto, as latentes podem ser identificadas e corrigidas antes que um evento adverso ocorra. Esta compreensão possibilita que o gerenciamento do cuidado seja proativo ao invés de reativo.

As ideias propostas levam o autor a promover o mapeamento das organizações sob o ponto de vista da cultura organizacional, para em seguida repensá-las em termos de reestruturação de modo a substituir “a culpa e a vergonha” por um “repensar os processos assistenciais”, com o desígnio de antecipar a ocorrência dos erros antes que causem danos. Para Reason, de modo geral, as organizações subdividem-se em três grandes grupos, de acordo com a Tabela 4.21:

Tabela 4.21: Tipos de Cultura Organizacional

CULTURA PATOGÊNICA	CULTURA BUROCRÁTICA	CULTURA CRIATIVA
Não quer saber	Pode não descobrir o motivo do acidente	Busca ativamente saber
Informações de pé de ouvido (deletadas)	Informações são ouvidas, desde que sejam fornecidas ou cheguem ao seu conhecimento	As informações são bem recebidas e os responsáveis são treinados e recompensados
Responsabilidades são restritas	Responsabilidades são centralizadas	Responsabilidades são compartilhadas
Erros são punidos ou até mesmo, escondidos	ERROS são corrigidos para cada caso em específico	ERRO implica em reformas, revisões, modernização, etc.
Novas ideias são fortemente desencorajadas	Novas ideias normalmente representam problemas	Novas ideias são bem-vindas

Fonte: Reason, J. T., 1990 [174]

Sendo nitidamente visível a importância da transição do paradigma punitivo para outro que seja voltado à educação dos profissionais. Um sistema de informações deficiente compromete substancialmente a cultura de segurança, porquanto, inviabiliza o aprendizado a partir das falhas.

Com 45,71% as 'Alterações de uso, características ou instalações da barragem existente' foram apontadas como o terceiro maior fator de risco, reforçando, conforme discutido na Questão 6, o conceito da disponibilidade de informações em termos de projeto e construção como essencial para o entendimento do comportamento e avaliação das quanto a segurança.

Em termos de respostas abertas, foram apresentadas as seguintes sugestões:

- Aprimoramento do enquadramento em efetivo RISCO, a terceiros, no caso de barragens de pequena altura e volume acumulado;
- Operação dispositivo de extravasor de fundo (esvaziamento reservatório);
- Infiltrações ou surgências e afloramentos no pé da barragem;
- Capacidade da Equipe de Monitoramento e análise; e

- Capacidade financeira do agente.

Com base nas repostas aos questionários e devidas contribuições, pode-se concluir que a análise de riscos utilizando as matrizes propostas em regulamento é de certa forma superficial, por não explicitar a necessidade de informações aprofundadas sobre o projeto e construção (critérios de projeto, materiais empregados, técnicas construtivas, por exemplo).

Consiste, portanto, em uma ferramenta de Análise Preliminar de Risco - APR e não em um modelo de classificação definitivo. Opinião esta partilhada por pesquisadores do tema [59] e pelos especialistas da Agência consultados. Entretanto, sua importância não pode ser diminuída, sendo esta considerada satisfatória devido à facilidade de utilização e por forçar uma reflexão sobre os possíveis modos de falha de cada estrutura componente de uma barragem.

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

Barragens, pela quantidade de massa que armazenam, são consideradas fontes de perigo potencial; expondo vidas e propriedades a jusante, a uma constante situação de risco. A incapacidade de mitigar completamente o risco de ruptura dessas estruturas gera a necessidade de antecipar quais ações devem ser tomadas para sua redução.

O risco imposto por uma barragem, por sua vez, raramente é provocado por um único fator. Decorre de uma conjunção de condições adversas, recebendo, dentre outras, contribuições do local, do projeto, da forma de construção e de manutenção, das características da rocha subjacente, das condições de precipitação e da atividade sísmica na área.

A segurança de barragens é, portanto, um processo multidisciplinar, constituída por atividades estruturais e não estruturais com o propósito de manter o estado da arte para a qual a barragem foi projetada.

Eventos de rompimento em barragens não são, entretanto, uma particularidade da sociedade moderna, sendo esse tipo de ocorrência uma modalidade de desastres consideravelmente recorrente na história da humanidade. Lamentavelmente, nas últimas duas décadas, o Brasil vem registrando diversos acidentes por conta de falhas de segurança em barragens.

Muitos desses acidentes resultaram em danos maciços sob a forma de baixas humanas, destruição de propriedade, poluição do meio ambiente e perda econômica para o setor de mineração. A tragédias envolvendo o rompimento de duas barragens da mineradora Samarco, em Mariana (MG), 2015, e mais recentemente em Brumadinho (MG), 2019, trouxeram à tona a discussão quanto à segurança dessas estruturas.

A prevenção de novas tragédias, no entanto, depende das lições que tirarmos dos acidentes anteriores, independente do seu porte. Os acidentes atuam como reveladores de disfunções organizacionais, questionando nossa capacidade de análise e de diagnóstico. Forçam-nos a buscar soluções e modos de agir concretos. De modo geral a solução para

mitigar os riscos desses eventos exige, além de uma fiscalização periódica rigorosa a adoção de estudos e técnicas estruturais e não estruturais mais eficientes.

O presente trabalho, portanto, faz parte de um assunto de significativa importância, não apenas pelo interesse científico para atender diretrizes da Legislação Nacional envolvendo assuntos regulatórios de barragens, mas também, como uma proposta de ferramenta de apoio para as decisões no domínio da Segurança de Barragens, com objetivo de dar uma resposta às necessidades impostas pela sociedade moderna.

Vincula-se a essa decisão o momento propício à incorporação de ajustes. Tradicionalmente, os órgãos reguladores primam por aprimorar continuamente os processos de regulamentação, ou seja, aperfeiçoar as metodologias de como os regulamentos são pensados e desenhados, de forma a torná-los mais inteligentes e efetivos.

Em grande parte dos países analisados, pouco esforço é realizado no sentido de estudar novas formas de aprimorar as técnicas e ferramentas de fiscalização com vistas a garantir a eficácia da implementação dos regulamentos. Conforme verificado, o modelo apresentado na Lei 12.334/2010 pode ser considerado um modelo multicriterial. Esse, no entanto, não tem o compromisso de auxílio à tomada de decisão e sim de propor um valor final de referência para posterior avaliação dos padrões de segurança de uma barragem.

A falta de uma priorização de atividades em qualquer organização, por sua vez, pode gerar falta de transparência e tratamento diferenciado para o mesmo tipo de solicitação, além de subutilização dos recursos disponíveis, pois mesmo que cada equipe esteja otimizada, o processo como um todo pode estar sub otimizado.

Assim, buscando harmonizar esses aspectos, é proposto nesta pesquisa um modelo *fuzzy* envolvendo constructos referentes às principais anomalias associadas à ruptura de barragens (*galgamento, escorregamento, percolação, recalque e deformação*) a partir de um conjunto de 11 (onze) fatores de risco extraídos da REN 696/2015 – ANEEL, tendo como referência compilações de estudos estatísticos e observações de especialistas do órgão regulador.

A abordagem *fuzzy* permitiu tratar, de forma matematicamente sólida, medidas subjetivas sujeitas a incertezas, obtidas a partir da aplicação de questionários de avaliação entre detentores de 50 empreendimentos previamente selecionados. Também possibilitou a avaliação das barragens em termos dos índices de risco calculados, por anomalia. Os índices determinados, uma vez referenciados a perfis de categoria e ao método de análise multicritério ELECTRE TRI proporcionaram a análise ampla do desempenho e da integridade das estruturas em estudo, servindo de base para identificação de vulnerabilidades específicas e definição de ajustes quando necessário.

Adicionalmente, na busca por padrões e comportamentos específicos que contribuíssem para o desenvolvimento desta etapa, consideraram-se como elementos de suporte fatores

adicionais associados à identificação, porte e caracterização das barragens avaliadas, quais sejam: distribuição geográfica, altura, comprimento e capacidade de geração.

Os cenários avaliados em estudo, tiveram por finalidade avaliar a acuracidade do modelo, sendo os resultados finais considerados conexos com as preferências dos especialistas e do decisor. Neles 26% das barragens estudadas posicionaram-se em categoria de grau de risco elevado e 16% em categoria de grau de risco médio-elevado, indicando necessidade de maior atenção em termos de conservação dessas estruturas.

Já a avaliação do grau de concordância dos responsáveis pela elaboração dos planos de segurança e de contingência para atendimento com os fatores de risco estabelecidos pela Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012 revelou preocupação com a qualidade da instrumentação das barragens, bem como com a qualificação dos responsáveis por sua segurança. O Plano de Segurança associado a essas estruturas também foi objeto de destaque.

Uma estratégia de fiscalização eficiente maximiza a adequação regulatória e minimiza os custos administrativos – tanto do agente regulado quanto do regulador – partes envolvidas nos processos de fiscalização. Nesse sentido entende-se que a implementação do modelo proposto possibilitou ao órgão regulador o desenvolvimento de seu papel de modo mais eficiente.

Isso porque a racionalização dos trabalhos por meio da definição, recebimento, tratamento e análise via indicadores possibilita o monitoramento do desempenho dos agentes, a identificação de evidências de transgressões às normas, a seleção de temas com base nas evidências e riscos, além da alocação adequada de recursos humanos e materiais em ações de natureza remota ou presencial.

Dessa forma, assegurar de forma efetiva a adequação regulatória de agentes regulados (*Regulatory Compliance*) é um dos principais objetivos de uma agência reguladora e é algo indispensável para que o mercado possa desenvolver-se de forma equilibrada e em benefício da sociedade. Em relação à literatura internacional, verificou-se que alguns trabalhos têm convergido no sentido de estabelecer alguns princípios básicos que norteiam as boas práticas de uma estratégia de fiscalização moderna.

Vislumbra-se em médio prazo, com um histórico mínimo de aplicação, e mediante aperfeiçoamento da matemática *Fuzzy*, o desenvolvimento de rankings e referências de prestação do serviço, que servirão como estímulo para que os agentes de geração busquem cada vez mais melhorar o desempenho de suas instalações, trazendo benefícios para os consumidores.

5.1 Dificuldades

A maior dificuldade encontrada na execução da pesquisa, foi a não existência de estatísticas oficiais referentes a acidentes em barragens brasileiras. A ausência de bases de dados históricos contendo informações quanto a natureza, possíveis causas e consequências de eventuais rupturas, não permitiu a construção de cenários confiáveis que possibilitassem o entendimento da realidade enfrentada pela engenharia nacional.

Essa lacuna fez com que o estudo buscasse amparo nos registros e boas práticas internacionais. Tal condição, entretanto, limitou a customização do modelo em termos de cenários e critérios que melhor refletissem determinadas particularidades construtivas e tecnológicas.

5.2 Recomendações

Conforme discutido anteriormente, esta pesquisa busca contribuir com informações relevantes sobre o processo decisório de Gestão de Riscos de Segurança de Barragens, com foco na utilização da metodologia multicritério de apoio à decisão e teoria de conjuntos *fuzzy*.

Verifica-se, porém, que o mesmo objetivo pode ser aplicado a demais sistemas de infraestruturas críticas como transporte, energia, telecomunicações, em cenários diversos. Assim sugere-se a avaliação da sensibilidade desse modelo quando aplicado a outros contextos, como por exemplo em outros órgãos de fiscalização, em diferentes segmentos de prestação de serviços públicos.

O sucesso na definição de uma matriz consensual de indicadores de risco levando em consideração os valores de diferentes especialistas, deve-se, sem sobra de dúvidas, à abordagem construtivista da metodologia MCDA. Portanto, a exploração mais aprofundada com identificação de novos critérios e fatores de risco para aprimoramento da política de segurança de barragens, é deixada como proposta, de forma a garantir aos gestores uma gama maior de opções. Para tanto, técnicas de análise exploratória, associadas à mineração de dados, devem ser consideradas.

Nesse sentido, considerando a avaliação do grau de concordância dos responsáveis pela elaboração dos planos de segurança das barragens quanto aos fatores de risco regulamentariamente estabelecidos, entende-se que a formação de um grupo amplo de discussão com a incorporação de critérios ambientais e sociais, além dos técnicos e econômico permitirá aproximar as questões técnicas e econômicas do processo de gestão de riscos aos anseios da sociedade, dado os diferentes valores das partes interessadas.

Ainda, quanto às opiniões emitidas pelos responsáveis pela segurança das barragens, sugere-se que o estudo dos fatores que motivaram tais respostas seja aprofundado como forma de subsidiar o processo de aperfeiçoamento e refinamento da Política Nacional de Segurança de Barragens, tendo em vista as deficiências apontadas.

Por fim recomenda-se uma aplicação ampla da metodologia MCDA, em que sejam testados diversos modelos de avaliação das alternativas, no intuito de se criar uma massa crítica em relação aos modelos mais adequados para cada contexto. E poder, desta forma, corroborar, quantitativamente, a hipótese apresentada.

Referências

- [1] JANSEN, Robert B. et. al.: *Water resources technical publication*. Em *Dams and public safety*. Saffron Walden: Books Express Publishing, 1983. 1, 18
- [2] PERINI, Daniel Sosti: *Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra*. 2009. 149 f. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Geotecnia)- Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2009. 1, 2, 4, 25, 26, 28, 32, 33, 35, 36, 38, 39, 112
- [3] ICOLD: *Dam failures: a statistical analysis*. *icold bulletin*, n. 99. International Commission on Large Dams ICOLD, Paris, 1995. 2, 7, 141
- [4] VALLERO, Daniel A.; Trevor M. LETCHER: *Engineering risks and failures: Lessons learned from environmental disasters*. Leadership and Management in Engineering, American Society of Civil Engineers, v. 12, n. 4, p. 199–209, 2012. 2
- [5] BRASIL, BBC News: *'É devastador passar por isso de novo', diz médica voluntária em mariana e brumadinho*, jan 2019. <<https://noticias.r7.com/minas-gerais/>>. Acesso em: 27 Jan. 2019. 2
- [6] VEYRET, Yvette: *Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente*. São Paulo: Contexto, 2007. 2
- [7] VIANNA, Luiz Filipe Venturi: *Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens.: auxílio ao processo de tomada de decisão*. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes)- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. 3
- [8] RETTEMIER, K. et. al.: *New developments in dam safety–feasibility evaluation on risk assessment*. Relatório Técnico, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Aachen University of Technology, Aachen, Germany, 2001. 3
- [9] ICOLD, CIGB: *Risk assessment in dam safety management: A reconnaissance of benefits, methods and current applications*. Paris: ICOLD, 2005. 3, 32, 33
- [10] BOWLES, David et. al.: *A role for risk assessment in dam safety management*. Em *INTERNATIONAL CONFERENCE; 3rd, Hydropower; Trondheim; Norway*. Rotterdam [u.a.]: Balkema,, 1997. 1997. p. 359-368. 4

- [11] BRASIL: *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens.* Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Seção 1, 21 de setembro de 2010, página 1, 2010. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/ccivil/Leis/L9427cons.htm>>. Acesso em 04 Abr. 2019. 4, 21
- [12] MEDEIROS, Carlos Henrique: *Curso guia de diretrizes para elaboração de projeto de barragens e revisão periódica módulo 1: Etapas dos estudos e projetos, UFC, Acordo de Cooperação Técnica ANA X CBDB.* Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/downloads/>>. Acesso em: 08 fev. 2019. 4, 85
- [13] SILVEIRA, João Francisco Alves: *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento.* São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 4
- [14] BRASIL: *Associação Brasileira das Empresas Geradoras de Energia Elétrica - ABRAGE, Comitê de Segurança de Barragens e de Estruturas Cíveis de Usinas.* Disponível em: <<https://http://www.abrage.com.br/>>. Acesso em: 21 Abr. 2019. 5
- [15] MILANEZ, Bruno e Wanderley: *Antes fosse mais leve a carga: introdução aos argumentos e recomendações referente ao desastre da Samarco/Vale/BHP Billiton.,* capítulo TROCATE, Marcio Zonta. A Questão mineral no Brasil. v. 2., Marabá, PA: Iguana Editorial, 2016. 6
- [16] ALVES, Henrique Rosmaninho: *O rompimento de barragens no Brasil e no mundo: desastres mistos ou tecnológicos.* Belo Horizonte: Dom Total, 2015. 6
- [17] MENESCAL, Rogério de Abreu: *Gestão de segurança de barragens no Brasil: proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. 2009. 727p.* Tese de Doutorado, Tese (Doutorado em Recursos Hídricos)– Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. 6, 35
- [18] CESTARI JUNIOR, Euclides: *Estudo de propagação de ondas em planície de inundação para elaboração de plano de ação emergencial de barragens: Uhe três irmãos estudo de caso.* Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/111148>>. Acesso em: 20 Abr. 2019., 2013. 7
- [19] VISEU, Teresa: *Segurança dos vales a jusante de barragens: metodologia de apoio à gestão do risco.* Tese de Doutorado, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006. 7
- [20] LEMPÉRIÈRE, François: *Dams and floods.* Engineering, v. 3, n. 1, p. 144–149., 2017. 7
- [21] OECD: *Regulatory Enforcement and Inspections.* Paris: OECD Publishing, 2015. 7, 14, 15

- [22] BRASIL: *Agência Nacional de Águas - Relatório de Segurança de Barragem*. Relatório Técnico, Agência Nacional de Águas - ANA, Brasília, <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2015-1>, 2015. 7
- [23] MENESCAL, Rogério de Abreu: *Terminologia para análise de risco e segurança de barragens*, capítulo MENESCAL, Rogério de Abreu (org.). *A Segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília: Proágua, 2005. p. 31-54. 7, 28
- [24] BRASIL: *Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, sistema de informações geográficas do setor - sigel*. Disponível em: <<https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/>>. Acesso em: 20 Abr. 2019. 8
- [25] BRASIL: *Ministério do Meio Ambiente - MMA. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 143/2012*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 set. de 2012. Seção 1. 9
- [26] ANEEL, Resolução Normativa Nº: 696. Estabelece critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL de acordo com o que determina a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, 17, 2015. 9, 10
- [27] NICHELE, Rogério Moraes; Jonatan Garrido JUNG: *Aplicação das matrizes de classificação de risco e dano potencial associado da lei 12.334 na uhe itaúba – rio jacui/rs*. Em *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15, Porto Alegre, Anais... Porto Alegre: GRID,*, Disponível em: <<http://cbge2015.hospedagemdesites.ws/trabalhos/trabalhos/284.pdf>>. Acesso em: 18 Abr. 2019, 2015. 10
- [28] KUPERMAN, Selmo Chapira: *Panorama mundial da análise de riscos aplicados às barragens*. Em *SIMPÓSIO DE SEGURANCA DE BARRAGENS E RISCOS ASSOCIADOS, 5., 2016, Fortaleza. Anais eletrônicos. Fortaleza: CBDB*, 2016. 11
- [29] SAMPAIO, José Adércio Leite: *As deficiências do plano de ação emergencial das barragens no brasil*. Revista Brasileira de Direito, v. 12, n. 2, 2016. p. 7–17. Disponível em: <<https://seer.imed.edu.br/index.php/revistadedireito/article/download/1313/1026>>. Acesso em: 13 Abr. 2019. 11
- [30] CARVALHO, Nádia et al.: *Efeitos da assimetria de informação sobre os custos de transação da cadeia produtiva da batata*. Em *SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 7., 2010, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos. Rio de Janeiro: Associação Educacional Dom Bosco*, 2010. 12
- [31] ZUFFO, Monica Soares Resio: *Metodologia para avaliação da segurança de barragens*. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 2005. 12, 19, 39, 42

- [32] PEDROSA, Leonardo: *Reavaliação do sistema de classificação de barragens realizado pelo DNPM*. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto,, Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/9356>>. Acesso em: 10 Abr. 2019., 2017. 12
- [33] MARTINI, Bruno Diniz: *Sistema web para gestão de segurança de barragens*. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10611>>. Acesso em: 02 Abr. 2019, 2018. 12
- [34] COSTA, Helder Gomes et. al.: *ELECTRE TRI aplicado a avaliação da satisfação de consumidores*. Production, v. 17, n. 2, p. 230–245, 2007. 13, 64, 66, 113, 119, 120
- [35] BRASIL.: *Lei 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da constituição federal, e dá outras providências.*, Diário Oficial: Legislação Federal. Brasília, DF, 13 fev. 1995. 14
- [36] SALES, Gustavo Manguiera De Andrade: *Proposta de um modelo utilizando análise envoltória de dados - dea na definição das metas dos indicadores da qualidade comercial das distribuidoras de energia elétrica – DER e FER*. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Regulação)- Universidade de Brasília, Brasília, Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/9494>>. Acesso em: 22 Abr. 2019, 2011. 14
- [37] FERNANDES, Camilla de Andrade Gonçalves: *A reforma do modelo de fiscalização do setor elétrico brasileiro*. Relatório Técnico, Monografia (Especialização em Gestão Pública)- Escola Nacional de Administração Pública, Brasília, Disponível em: <<http://repositorio.enap.gov.br/handle/1/3376>>. Acesso em: 20 fev. 2019, 2018. 15
- [38] HIRATA, Issao; Sérgio Ribeiro LEITE et. al.: *Fiscalização em 3 níveis – aplicando o conceito de diferenciação de risco regulatório na fiscalização de empreendimentos de geração de energia. v. 20*. Em CONGRESSO BRASILEIRO DE REGULAÇÃO, 9, EXPOABAR, Brasília, 2015. 15, 111
- [39] AYRES, Ian; John BRAITHWAITE: *Responsive regulation: Transcending the deregulation debate*. New York: Oxford University Press, 1995. 15
- [40] BALDWIN, Robert; Martin CAVE; Martin LODGE: *Understanding regulation: theory, strategy, and practice*. New York: Oxford University Press on Demand, 2012. 15
- [41] QUINTELA, Antônio de Carvalho; João Luís CARDOSO; José Manuel MASCARENHAS: *Aproveitamentos Hidráulicos Romanos a Sul do Tejo: contribuição para a sua inventariação e caracterização*. Brasília: Ministério do Plano e da Administração do Território, 1986. 18

- [42] FAHLBUSCH, Henning: *Early dams*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering History and Heritage, v. 162, n. 1, p. 13–18, 2009. 18
- [43] SCHNITTER, Nicolas: *A history of dams: the useful pyramids*. [s.l]: Balkema, 1994. 18, 19, 20
- [44] SENEM, Paulo Roberto; Daniel Domingues LORIGGIO: *Análise crítica dos critérios de projeto da laje de concreto em barragens de enrocamento com face de concreto*. Em *CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2. Anais, Salvador, 2003*. 19
- [45] PISANIELLO, John D: *A comparative review of environmental protection policies and laws involving hazardous private dams: Appropriate practice models for safe catchments*. William & Mary Environmental Law and Policy Review, v. 35, 2010, 515 p. 19
- [46] VELTROP, Jorgen: *Water, dams and civilization*. World Bank Technical, Washington, v. 115, p. 5–27, 1990. 20
- [47] UEMURA, Sandra: *Instrumentos de avaliação e gestão de impactos gerados por rupturas de barragens. 2009. 222 f.* Tese de Doutorado, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. 20
- [48] ALMEIDA, A Betâmio de: *Riscos a jusante de barragens e legislação*. Jornada Técnica – Legislação sobre segurança de barragens, Lisboa, 1999. 10 p. 21
- [49] NEVES, Luiz Paniago: *Legislação Federal Brasileira em Segurança de Barragens Comentada*. Brasília: Agência Nacional de Mineração - ANM, 2018. 21
- [50] ALMEIDA, Márcio de S.: *Riscos e o estado atual da política nacional de segurança de barragens*, 2018. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/dino/riscos-e-o-estado-atual-da-politica-nacional-de-seguranca-de-barragens,997bb6223b4cdb76e0caa6e099644bb23jvea90s.html>>. Acesso em: 14dez.2018. 21
- [51] ROCHE, C.; K. THYGESEN; E. BAKER: *Mine tailings storage: safety is no accident*. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal, 2017. 22
- [52] BERNSTEIN, Peter L: *Desafio aos deuses: a fascinante história do risco*. Rio de Janeiro: Campus, 1997. 22
- [53] COHEN, M. W.; G. R. PALMER: *Project risk identification and management, ACEE international transaction, pp. I013-15*, v. 10, 2004. 22
- [54] ASSAF NETO, Alexandre: *Mercado financeiro*. São Paulo: Atlas, 2001. 22
- [55] VAUGHAN, Emmett J.; Therese VAUGHAN: *Fundamentals of risk and insurance*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 22, 27

- [56] CALIL, Luís Fernando Peres et. al.: *Metodologia para gerenciamento de risco: foco na segurança e na continuidade*. Tese de Mestrado, Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2009. 22, 23, 24, 30, 34, 35
- [57] HERTZ, David B. ; HOWARD, Thomas: *Risk analysis and its applications*. New Jersey: Wiley, 1983. 24
- [58] PERRY, J. G.; R. W. HAYES: *Risk and its management in construction projects*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, v. 78, n. 3, 1985. p. 499–521. 24
- [59] MELO, Alexandre Vaz de; Teresa Cristina FUSARO: *Avaliação de métodos de análise de risco aplicados a barragens*. Em *Seminário Nacional de Grandes Barragens, 30, Foz do Iguaçu*, 2015. 24, 34, 36, 141, 142, 143, 144, 145, 147, 153
- [60] ADVISORS, DEUTSCHE Bank: *Relatório de Gerenciamento de Riscos – Basileia II Pilar 3*. Relatório Técnico, Deutsche Bank Group, 2010. 24
- [61] VIEIRA, Vicente P. P. B.: *Notas de aula*. Curso de Doutorado em Recursos Hídricos. Universidade Federal do Ceará, 2000. 24
- [62] Recursos Hídricos., BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de: *Resolução nº 143/2012. estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. diário oficial da união, Brasília, df, 4 de set. de 2012, seção 1*. Disponível em: <<http://www.cnrh.gov.br/resolucoes/1922-resolucao-n-143-de-10-de-julho-de-2012/file>>. Acesso em: 26 fev. 2019. 25
- [63] VIEIRA, Vicente P. P. B.: *Análise de Risco em Recursos Hídricos: Fundamentos e Aplicações*. Porto Alegre: ABRH., 2005. 361 p. 25
- [64] ALMEIDA, Adiel Teixeira de: *O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2011. 25, 26, 57, 59, 94, 114
- [65] BIEDERMANN, R: *Safety concept for dams: development of the swiss concept since 1980*. Berne, Switzerland, v. 21, 1997. 26
- [66] FONSECA, Alessandra da Rocha: *Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica-estudo de caso das barragens da uhe são simão*. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2003. 27
- [67] SALMON, Gary M.; D. N. D HARTFORD: *Risk analysis for dam safety*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, v. 6, n. 32, p. 42-47, 1995. 27
- [68] PINTO, A. Veiga: *Gestão de riscos e segurança de barragens. simpósio de segurança de barragens e riscos associados-lnec, 3*, nov 2008. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/documentos/AVeigaPinto-LNEC-CBDB-BAem:20jan.2019>>. 27

- [69] PIMENTA, Lurdes: *Abordagens de riscos em barragens de aterro*. Lisboa: LNEC, 2009. 28, 32, 33
- [70] GOMES, A. S. et. al.: *1º Relatório de Progresso – Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens*. Lisboa: Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens–CNPGB, 2005. 28, 29
- [71] BOWLES, David S.: *Dam safety risk management for hydroelectric projects*. Em *INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROPOWER PROJECTS IN PORTUGAL: A NEW CYCLE*, Porto, v. 17, 2010. 28
- [72] KREUZER, Harald: *The use of risk analysis to support dam safety decisions and management*. Em *ICOLD CONGRESS, 20, Beijing*, 2000. 28, 31
- [73] MENESCAL, Rogério de Abreu et. al.: *Uma metodologia para avaliação do potencial de risco em barragens do semi-árido*. Em *SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 24, Fortaleza, 2001. Anais. Fortaleza, 2001*. 29
- [74] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas: *NBR ISO/IEC Guia 73–Gestão de riscos–Vocabulário–Recomendações para uso em normas*. ABNT: Rio de Janeiro, 2009. 29, 136
- [75] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas: *NBR-ISO 31000–Gestão de Riscos–Princípios e Diretrizes*. ABNT: Rio de Janeiro, 2018. 29
- [76] MOSIEH, Ali et. al.: *An integrated framework for identification, classification, and assessment of aviation systems hazards*. Em *PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT AND MANAGEMENT*, Berl Springer, 2004. p. 2384–2390. 30
- [77] REASON, James: *Managing the Risks of Organizational Accidents*. England: Ashgate Publishing Limited, 1997. 30, 151
- [78] MELO, Alexandre Vaz de: *Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da CEMIG GT*. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 30, 31, 32, 33, 34
- [79] FONTENELLE, Alexandre de Sousa: *Proposta metodológica de avaliação de riscos em barragens do nordeste brasileiro - estudo de caso: barragens do estado do Ceará*. Tese de Doutorado, Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007. 31
- [80] COOPER, Dale: *The Australian and New Zealand Standard on Risk Management, as/nzs 4360: 2004*. Cammeray: Broadleaf Capital International Pty Ltd., 2004. 32
- [81] ANDERÁOS, Alexandre M. N.; Lígia ARAÚJO; Carlos M. NUNES: *Classificação de barragem quanto à categoria de risco e ao dano potencial associado - um exercício*. Em *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 10, Bento Gonçalves -RS, 2013*. 32
- [82] CALDEIRA, Laura: *Análises de riscos em geotecnia. Aplicação a barragens de aterro*. Lisboa: LNEC, 2005. 266 p. 34

- [83] PIASENTIN, Corrado: *Considerações sobre a importância das observações visuais na auscultação de barragens*. Em *Seminário Nacional de Grandes Barragens*, 15, Salvador, 2003. p. 149–163. 34
- [84] PIASENTIN, Corrado: *Um índice para avaliação do nível de auscultação de barragens*. Em *SEMINÁRIO NACIONAL DE BARRAGENS*, 26., 2005, Goiânia. *Anais eletrônicos*. Goiânia, 2005. 34
- [85] BAIMA, Sandra Keila de Oliveira: *Uma Metodologia multicritério construtivista para a avaliação da vulnerabilidade de barragens e regiões a jusante*. Tese de Doutorado, Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. 35, 37, 39
- [86] Sandroni, S.: *Notas de aula da disciplina de barragens de terra e enrocamento*. Curso de Mestrado da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012. 35, 37, 97
- [87] ASCE: *Subcommittee of Dam Incidents and Accidents of the Committee on Dam Safety of the U.S. Committee on Large Dams. Lessons from dam incidents. USA-II*. New York: American Society of Civil Engineers, 1988. 35
- [88] SILVEIRA, João Francisco Alves; José Augusto de A. MACHADO: *Construção das Árvores de eventos e análise de riscos da barragem João Leite da Saneago*. Em *Seminário Nacional de Grandes Barragens*, 26, Goiânia, 2005. 37
- [89] CORREA, Heitor Barreto; Carlos F. da Rocha SANTOS: *Considerações sobre segurança de barragem*. Em *Seminário Nacional de Grandes Barragens*, 19, Aracaju. *Anais*, Aracaju, 1991. 38
- [90] MCGRATH, Shane: *To study international practice and use of risk assessment in dam management*. Relatório Técnico, The Winston Churchill Memorial Trust of Australia, 2000. 39, 46, 49
- [91] BRADLOW, Daniel D. Salman M. A. SALMAN: *Regulatory frameworks for dam safety: A comparative study*. New York: World Bank Publications, 2015. 39, 52, 53, 54
- [92] COLLE, Giselle de Andrade: *Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança*. 2008. 124 f. Tese de Mestrado, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008, 2008. 39, 47
- [93] GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro; Carlos Francisco Simões GOMES: *Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério*. São Paulo: Atlas, 2009. 54, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 70
- [94] MORITZ, Gilberto de Oliveira; Maurício Fernandes PEREIRA: *Processo decisório*. Florianópolis: SEAD/UFSC, 2006. 54
- [95] DUTRA, Camila Costa: *Modelo econômico-probabilístico para seleção e priorização de projetos*. 2012. 119 f. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 55

- [96] HALL, David L.; Alexander NAUDA: *An interactive approach for selecting IR & D projects*. IEEE Transactions on Engineering Management, Portland, v. 37, n. 2, p. 126-133, 1990. 55
- [97] ARCHER, Norm P.; Fereidoun GHASEMZADEH: *An integrated framework for project portfolio selection*. International Journal of Project Management, [l.], v. 17, n. 4, p. 207-216, 1999. 55
- [98] ALMEIDA, Adiel Teixeira de: *Processo de Decisão Nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério*. São Paulo: Atlas, 2000. 56
- [99] ALMEIDA, Adiel Teixeira: *Processo de decisão nas organizações*. São Paulo: Atlas, 2013. 56
- [100] BELTON, Valerie; Theodor STEWART: *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Berl Springer Science & Business Media, 2002. 56, 57, 72
- [101] DEHE, Benjamin; David BAMFORD: *Development, test and comparison of two multiple criteria decision analysis (mcda) models: A case of healthcare infrastructure location*. Expert Systems with Applications, [s.l.], v. 42, n. 19, p. 6717–6727, 2015. 57
- [102] TAVANA, Madjid; Mariya A. SODENKAMP: *A fuzzy multi-criteria decision analysis model for advanced technology assessment at kennedy space center*. Journal of the Operational Research Society, Oxford, v. 61, n. 10, p. 1459–1470, 2010. 57
- [103] ORMEROD, Richard J.: *Or as rational choice: A decision and game theory perspective*. Journal of the Operational Research Society, Oxford, v. 61, n. 12, p. 1761–1776, 2010. 57
- [104] VINCKE, Philippe: *Multicriteria decision-aid*. New Jersey: John Wiley & Sons, 1992. 57
- [105] CAVALCANTI, Rebeca Campos: *Sistema multicritério para apoiar a compra de imóveis urbanos multifamiliares do mercado imobiliário recifense baseado no método smarts. 2007. 100 f.* Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. 57, 58
- [106] GRANDZOL, John; Mark GERSHON: *Multiple criteria decision making-this tool can help in tqm efforts*. Quality Progress, Milwaukee, v. 27, n. 1, p. 69–74, 1994. 58
- [107] YU, Wei: *ELECTRE TRI (aspects méthodologiques et manuel d'utilisation)*. Paris: Université de Paris-Dauphine, 1992. 58, 62
- [108] ROY, Bernard; Daniel: *An overview on “the european school of mcda: Emergence, basic features and current works”*. European Journal of Operational Research, Amsterdam, v. 99, n. 1, p. 26-27, 1997. 58

- [109] QUEIROZ, Monica Eliza Arruda: *Avaliação multicritério de riscos em contratos comerciais de terceirização: uma abordagem de classificação com o electre tri*. 2011. 86 f. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. 58, 65, 67, 71, 93, 115
- [110] DANILA, Nicolas: *Roy b. : Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Politiques et Management Public, v. 4, n. 3, pp. 138-140, 1986. 59, 60, 68
- [111] VINCKE, Jean Pierre e BRANS Philippe: *A preference ranking organization method. the promethee method for mcdm*. Management Science, v. 31, n. 6, p.647–656, 1985. 60
- [112] ALMEIDA, Adiel Teixeira de; Ana Paula Cabral Seixas COSTA: *Modelo de decisão multicritério para priorização de sistemas de informação com base no método promethee*. Gestão & Produção, v. 9, n. 2, p. 201–214, 2002. 60, 61, 62, 64
- [113] ROY, Bernard: *Classement et choix en présence de points de vue multiples*. Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle, v. 2, n. 8, p. 57–75, 1968. 62
- [114] ROY, Berthier; Patrice BERTIER: *La méthode ELECTRE II: une méthode de classement en présence de critères multiples*. Paris: SEMA-METRA, 1971. 62
- [115] ROY, Bernard: *ELECTRE III: Un algorithme de classement fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples*. Cahiers du CERO, v. 20, n. 1, p. 3–24,, 1978. 62
- [116] ROY, Bernard; J. HUGONNARD: *Classement des prolongements de lignes de métro en banlieue parisienne (présentation d'une méthode multicritère originale)*. Cahiers du CERO, v. 24, n. 2-4, p. 153–171, 1982. 62
- [117] ROY, Bernard; Jean Michel SKALKA: *ELECTRE IS: Aspects méthodologiques et guide d'utilisation. 2. ed*. LAMSADE, Université de Paris Dauphine, 1987. 62
- [118] YU, Wei: *Electre tri: aspects méthodologiques et guide d'utilisation*. Document du LAMSADE, Paris, n. 74, 1992. 62
- [119] SANTOS, Patrícia Guarnieri dos: *Modelo de apoio à decisão multicritério para classificação de fornecedores em níveis de colaboração no gerenciamento da cadeia de suprimentos utilizando o método ELECTRE TRI*. Tese de Mestrado, Mestrado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012., 2012. 63
- [120] ROY, Bernard; Denis BOYSSOU: *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*. Paris: Economica, 1993. 63
- [121] MIRANDA, Caroline Maria Guerra de; Adiel Teixeira de ALMEIDA: *Visão multicritério da avaliação de programas de pós-graduação pela CAPES: o caso da área engenharia iii baseado nos métodos ELECTRE II e MAUT*. Gestão Produção, v. 11, n. 1, p. 51–64, 2004. 64

- [122] BRITO, Anderson Jorge de Melo: *Avaliação multicritério de riscos em gasodutos de gás natural: uma abordagem de classificação com o electre tri*. 2007. 176 f. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. 64
- [123] FIGUEIRA, José; Vincent MOSSEUAU; Bernard ROY: *ELECTRE methods*. Em *GRECO, Salvatore (ed.). Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*. New York: Springer, 2005. p. 133–153. 64, 70, 71
- [124] MOSSEAU, Vincent; Roman SLOWINSKI; Piotr ZIELNIEWICZ: *A user-oriented implementation of the ELECTRE-TRI method integrating preference elicitation support*. *Computers & operations research*, New York, US, v. 27, n. 7-8, p. 757–777, 2000. 66
- [125] LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck et. al.: *Desenvolvimento de aplicativo para uso do método multicritério ELECTRE-TRI*. Em *SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORTE E CENTROESTE, 1, ABRH, Cuiabá*, páginas 1–20, 2007. 69
- [126] ZADEH, Lotfi A. et. al.: *Fuzzy sets*. *Information and control*, New York, US, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965. 72
- [127] BONVICINI, Sarah; Paolo LEONELLI; Gigliola SPADONI: *Risk analysis of hazardous materials transportation: evaluating uncertainty by means of fuzzy logic*. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, NL, v. 62, n. 1, p. 59–74, 1998. 73
- [128] ZOLOTUKHIN, Anatoly; Ove T. GUDMESTAD: *Use of fuzzy sets theory in qualitative and quantitative risk assessment*. Em *SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Stavanger, Norway*. Society of Petroleum Engineers, 2000. 73
- [129] DE RU, Willem G. Jan H. P. ELOFF: *Risk analysis modelling with the use of fuzzy logic*. *Computers & Security*, Amsterdam, NL, v. 15, n. 3, p. 239–248, 1996. 73
- [130] ALVINO, Alberto Edwin Ildefonso: *Aplicação da Lógica Nebulosa ao Modelo Muhlbauer Para Análise de Risco em Dutos*. 2003. 223 f. Tese de Doutorado, Doutorado em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003. 73, 80
- [131] SILVA JUNIOR, Celso Henrique Leite: *Lógica fuzzy e processo analítico hierárquico (AHP) aplicados ao zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos: uma revisão*. *Revista Monografias Ambientais*, v. 14, n. 3, p. 42–55, 2015. 73
- [132] SIMOES, Marcelo Godoy; Ian S. SHAW: *Controle e modelagem fuzzy*. São Paulo: Blucher, 2007. 73, 74, 77, 78
- [133] BELCHIOR, Arnaldo Dias: *Um modelo fuzzy para avaliação da qualidade de software*. Tese de Doutorado, Doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação -, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,, 1997. 73, 75

- [134] MOREÍ, Jesús Domech: *Aplicação da lógica fuzzy na avaliação da confiabilidade humana nos ensaios não destrutivos por ultra-som*. Tese de Doutorado, Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. 74, 75
- [135] ABAR, Celina: *O conceito fuzzy*. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <<https://www.pucsp.br/logica/Fuzzy.htm>>. Acesso em: 10 fev. 2019. 74
- [136] BOENTE, Alfredo Nazareno Pereira: *Proposição de um Modelo Fuzzy para Tomada de Decisão acerca da Avaliação da Qualidade do Produto de Software AVA Moodle utilizado no Curso de Pós-Graduação em Tecnologias Educacionais do IST-Rio e da Satisfação de seus Usuários. 2013. 240 f.* Tese de Doutorado, Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)– Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. 74, 75, 76, 77, 94
- [137] GONÇALVES, André Paim: *Aplicação de lógica fuzzy em guerra eletrônica*. Em *SIMPÓSIO DE GUERRA ELETRÔNICA, 9, [s.l.]. Anais*, 2007. 5 p. 76
- [138] IZARD, Irene Ribeiro de Sá: *Indicação das ações empresariais a partir da percepção do consumidor: Uso da lógica fuzzy*. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Administração e Desenvolvimento Empresarial)- Universidade Estácio de Sá, RJ, 2007. 77, 78
- [139] BOENTE, Alfredo Nazareno Pereira: *Um modelo fuzzy para avaliação da qualidade de produtos de software e da satisfação dos gerentes de projetos numa fundação pública estadual*. Tese de Mestrado, Mestrado em Administração e Desenvolvimento Empresarial - Universidade Estácio de Sá, Rio de Janeiro, 2009. 77, 78
- [140] REIS, Ana Carla Bittencourt: *Modelagem multicritério e aplicação da Teoria dos Conjuntos Fuzzy para avaliação da liderança. 2011. 110 f.* Tese de Doutorado, Doutorado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 78
- [141] CZYZAK, Piotr; Roman SKOWIŃSKI: *Possibilistic construction of fuzzy outranking relation for multiple-criteria ranking*. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 81, n. 1, p. 123–131, 1996. 78
- [142] BELACEL, Nabil: *Multicriteria assignment method PROAFTN: Methodology and medical application*. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, NL, v. 125, n. 1, p. 175–183, 2000. 78
- [143] GOUMAS, Met; V. LYGEROU: *An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects*. *European Journal of Operational Research*, v. 123, n. 3, p. 606–613, 2000. 78
- [144] HUANG, Chi Cheng; Pin Yu CHU; Yu Hsiu CHIANG: *A fuzzy AHP application in government-sponsored R & D project selection*. *Omega*, v. 36, n. 6, p. 1038–1052, 2008. 78

- [145] CHEN, Ye: *Multiple criteria decision analysis: classification problems and solutions*. 2006. 183 f. Tese de Doutorado, Doutorado em Engenharia de Sistemas - University of Waterloo, Ontario, 2006. 78
- [146] AMIRI, Morteza Pakdin: *Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods*. Expert systems with applications, v. 37, n. 9, p. 6218–6224, 2010. 79
- [147] HATAMI-MARBINI, Adel; Madjid TAVANA: *An extension of the Electre I method for group decision-making under a fuzzy environment*. Omega, v. 39, n. 4, p. 373–386, 2011. 79
- [148] TAYLAN, Osman et. al.: *Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies*. Applied Soft Computing, v. 17, p. 105–116, 2014. 79
- [149] CARVALHO, Maria Cecília M de: *Construindo o saber: metodologia científica: fundamentos e técnicas*. São Paulo: Papirus, 2000. 80
- [150] GIL, Antonio Carlos: *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 80, 83
- [151] BAUER, Martin W. e GLASKELL George: *Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático*. Editora Vozes Limitada, 2017. 81
- [152] EVERTSON, Carolyn M.; Judith Lee GREEN: *Handbook of research on teaching*, capítulo WILTROCK, M. C. Observation as inquiry and method. New York: Macmillan; London : Collier Macmillan, 1986. 83
- [153] VOGT, W Paul; Burke JOHNSON: *Dictionary of statistics & methodology: A non-technical guide for the social sciences*. California: Sage, 2011. 83
- [154] MÓNICO, Lisete et. al.: *A observação participante enquanto metodologia de investigação qualitativa*. Em CONGRESO ÍBERO-AMERICANO EM INVESTIGACIÓN CUALITATIVA, 6, Salamanca, 2017. 83
- [155] TAYLOR, Steven J.; Robert BOGDAN; Marjorie DEVAULT: *Introduction to qualitative research methods: A guidebook and resource*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 83
- [156] BRASIL: *Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração*, 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/big-banco-de-informacoes-de-geracao/655808?inheritRedirect=false> .Acesso em: 10 fev. 2019. 85
- [157] KIMBALL, R. e ROSS M.: *The data warehouse toolkit: The definitive guide to dimensional modeling*. John Wiley & Sons, 2013. 89

- [158] COSTA, Helder Gomes; Adriana Costa SOARES; P. F. de OLIVEIRA: *Avaliação de transportadoras de materiais perigosos utilizando o método ELECTRE TRI*. Gestão & Produção, v. 11, n. 4, p. 221–229, 2004. 93, 117
- [159] FREITAS, André Luís Policani; Helder Gomes COSTA: *Avaliação e classificação da qualidade de serviços utilizando uma abordagem multicritério*. Gestão e Produção, v.5, n.3, p.272-283, 1998. 93
- [160] MILLER, George A.: *The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information*. Psychological review, Washington, US, v. 101, n. 2, 1994. 101
- [161] TANAKA, Kazuo: *An introduction to fuzzy logic for practical applications*. New York, US: Springer-Verlag, 1997. 103
- [162] KLIR, George J e YUAN Bo: *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. Upper Saddle River, P. 563, 1995. 103
- [163] MORÉ, Jesus Domech, MATTOSO Luciana Fagundes, ALTAFF Joyce Gonçalves e XEXEO Geraldo Bonorino: *Avaliação da eficiência do portal globo. com: um estudo de caso à luz da teoria dos conjuntos fuzzy*. JISTEM-Journal of Information Systems and Technology Management, v. 7, n. 3, p. 353–374, 2010. 103
- [164] MOUSSEAU, Vincent; Roman SLOWINSKI: *Inferring an ELECTRE TRI model from assignment examples*. Journal of global optimization, v. 12, n.2, p. 157–174, 1998. 114
- [165] DIAS, Luís et. al.: *An aggregation/disaggregation approach to obtain robust conclusions with ELECTRE TRI*. European Journal of Operational Research, v. 138, n. 2, p. 332–348, 2002. 114
- [166] NEVES, Roberta Braga; Helder Gomes COSTA: *Avaliação de programas de pós-graduação: proposta baseada na integração ELECTRE TRI, SWOT e sistema CAPES*. Sistemas & Gestão, v. 1, n. 3, p. 276–298, 2009. 115
- [167] SILVA, Vinícius Barcelos da; André Luis Policani FREITAS: *Classificação de instituições de ensino médio: uma abordagem exploratória*. Em *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 43, 2011, São Paulo. Anais eletrônicos*. São Paulo, 2011. 115
- [168] SOUZA, Mariana Miranda et. Al.: *Estudo para projeto geotécnico da barragem de Alto Irani*. Monografia Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. 130
- [169] MATOS, Silvia Frazão: *Avaliação de instrumentos para auscultação de barragem de concreto. estudo de caso: deformímetros e tensômetros para concreto na barragem de itaipu*. Tese de Mestrado, Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002. 133
- [170] ELETROBRAS, Centrais Elétricas Brasileiras SA: *Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2003. 133, 134

- [171] NOBARI, Elmira Shoar; J. M. DUNCANS: *Effect of reservoir filling on stress and movements in earth and rockfill dams, report no. 184 p*, 1972. 134
- [172] HSE, HEALTH & Safety Executive: *Reducing risks, protecting people: HSE's decision making process*. United Kingdom: Her Majesty's Stationery Office, 2001. 136
- [173] ROTTA, Eloni Terezinha et. al.: *Ciclo de análise de evento adverso grave utilizado pela gerencia de risco assistencial (GR) do Hospital de Clínicas de Porto Alegre (HCPA)*. Hospital de Clínicas de Porto Alegre, Semana Científica, 36, Porto Alegre, 2016. 139
- [174] REASON, James: *Human error*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 1990. 152
- [175] HOLTON, Glyn A.: *Defining risk*. Financial Analysts Journal, v. 60, n. 6, p. 19–25, 2004.
- [176] SALDANHA, Fernando: *Introdução a planos de continuidade e contingência operacional*. Rio de Janeiro: Papel Virtual, 2000.
- [177] KUMAMOTO, Hiromitsu; Ernest J. HENLEY: *Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. 2. ed.* Piscataway, Nova Jersey: IEEE Press, 1996.
- [178] PMI: *Project Management Institute – A guide project management body of knowledge (pmbok® guide)*. Pennsylvania, EUA: Project Management Institute, 2001.
- [179] BRASIL: *Ministério do Trabalho e Emprego – MTE, nr 10 : Segurança em instalações e serviços em eletricidade. portaria nº 598 de 07 de dezembro de 2004. diário oficial da união, 08 dez. 2004*, 2004. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=9CFA236F73433A3AA30822052EF011F8.proposicoesWebExterno1?codteor=309173&filename=LegislacaoCitada+-INC+5298/2005. Acesso em: 20fev.2019.
- [180] BUHLMANN, Hans: *Mathematical methods in risk theory*. New York: Springer Science & Business Media, 2007.
- [181] CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de: *Manual de planejamento em Defesa Civil*. Brasil. Ministério do Planejamento e Orçamento. Secretaria Especial de Política Regionais. Departamento de Defesa Civil, 2005.

Apêndice A

Código Python Análise Conjuntos Fuzzy

```

import xlrd
import xlwt
import json
def getWorkBook(caminhoArquivoExcel):
    return xlrd.open_workbook(caminhoArquivoExcel)
def getPeso(folha):
    return (1 / (len(folha.row(0)) - 1))
def calcAPonderado(valorA, escalaCorrente, peso):
    if(( escalaCorrente == 1) and ( (valorA - 1) < 1) ) or (valorA <
escalaCorrente)):
        vlrFiltradoA = valorA * peso
    else:
        vlrFiltradoA = (valorA - 1) * peso
    return vlrFiltradoA
def calcBPonderado(valorB, escalaCorrente, escalaMax, peso):
    if((escalaCorrente == escalaMax and (valorB + 1) > escalaMax ) or
(valorB == escalaMax)):
        vlrFiltradoB = valorB * peso
    else:
        vlrFiltradoB = (valorB + 1) * peso
    return vlrFiltradoB
def calcMPonderado(valorM, peso):
    return valorM * peso
def fuzzy(folha, peso = None, escala = 5):
    minA = []
    minM = []
    maxB = []
    crisp = []
    vNormal = []
    maxCrisp = 0
    dicionario = dict()
    if peso == None:
        peso = getPeso(folha)
    numColunas = len(folha.row(0)) - 1
    numLinhas = len(folha.col(0)) - 7
    for esc in range(1, (escala + 1)):
        somaA = []
        somaM = []
        somaB = []
        for j in range(0, numLinhas):
            somaA.append(0)
            somaM.append(0)
            somaB.append(0)
            for i in range(0, numColunas):
                vlrCel = folha.cell(j + 7, i + 1).value #Linha e
coluna de celulas com Layout proposto pelo Sergio
                peso = folha.cell(2, i + 1).value
                vlrFiltradoA = calcAPonderado(vlrCel, esc, peso)
                vlrFiltradoB = calcBPonderado(vlrCel, esc, escala,
peso)

                vlrFiltradoM = calcMPonderado(vlrCel, peso)
                somaA[j] = (somaA[j] + vlrFiltradoA)
                somaB[j] = (somaB[j] + vlrFiltradoB)
                somaM[j] = (somaM[j] + vlrFiltradoM)

```

```

        if(esc == 1):
            minA = somaA
            minM = somaM
            maxB = somaB
        else:
            for jInterno in range(0, numLinhas):
                minA[jInterno] = min(minA[jInterno],
somaA[jInterno])
                minM[jInterno] = min(minM[jInterno],
somaM[jInterno])
                maxB[jInterno] = max(maxB[jInterno],
somaB[jInterno])
            for idxCrisp in range(0, numLinhas):
                crisp.append((minA[idxCrisp] + (2 * minM[idxCrisp]) +
maxB[idxCrisp]) / 4)
            maxCrisp = max(crisp)
            for idxVNormal in range(0, numLinhas):
                vNormal.append(crisp[idxVNormal] / maxCrisp)
            dicionario.update({"minA": [round(l, 9) for l in minA]})
            dicionario.update({"minM": [round(l, 9) for l in minM]})
            dicionario.update({"maxB": [round(l, 9) for l in maxB]})
            dicionario.update({"crisp": [round(l, 9) for l in crisp]})
            dicionario.update({"vNormal": [round(l, 9) for l in vNormal]})
            dicionario.update({"maxCrisp": [round(maxCrisp, 9)]})
            return dicionario
def getDictFolhas(workbook):
    entradasComputadas = dict()
    for i in workbook.sheets():
        entradasComputadas.update({i.name: fuzzy(i)})
    return entradasComputadas
def getDictToJSON(dictFolhas):
    return json.dumps(dictFolhas)
def outputFuzzy(dictFuzzy, caminhoSaida):
    workbook = xlwt.Workbook()
    for i in dictFuzzy:
        ws = workbook.add_sheet(i)
        cc = 0
        for j in dictFuzzy[i]:
            cl = 1
            ws.write(0, cc, j)
            for g in dictFuzzy[i][j]:
                ws.write(cl, cc, g)
                cl+=1
            cc+=1
    workbook.save(caminhoSaida)
if __name__ == '__main__':
    caminhoDiretorio = r'D:\desenvolvimento'
    arquivoEntrada = caminhoDiretorio + r'\entrada.xls'
    arquivoSaida = caminhoDiretorio + r'\out_Fuzzy.xls'
    workbook = getWorkBook(arquivoEntrada)
    dictWorkbook = getDictFolhas(workbook)
    outputFuzzy(dictWorkbook, arquivoSaida)

```

Apêndice B

Código Python Electre TRI

```

import xlrd
import re
import numpy
from OutputEletreTri import OutputEletreTri
from FixOutput import *
def getFileConfig(filePath):
    arquivo = open(filePath,'r')
    config = dict()
    arquivoSaida = ''
    for i in arquivo:
        if i.strip()[0] != '#':
            var = [linha.strip() for linha in i.strip().split('=')]
            config.update({var[0]:var[1]})
    for i in config['ARQUIVO_ENTRADA'].split('\\\')[::-1]:
        arquivoSaida += i + '\\\ '
    arquivoSaida += 'OUTPUT_' + config['ARQUIVO_ENTRADA'].split('\\\')[::-1].split('.')[0]+'.xls'
    config.update({'ARQUIVO_SAIDA':arquivoSaida})
    return config
class Eletre:
    arrayEntradaP = numpy.array([])
    arrayEntradaQ = numpy.array([])
    arrayEntradaV = numpy.array([])
    arrayEntradaW = numpy.array([])
    arrayXB = numpy.array([])
    arrayBX = numpy.array([])
    arrayCXB = numpy.array([])
    arrayCBX = numpy.array([])
    arrayDXB = numpy.array([])
    arrayDBX = numpy.array([])
    arrayConcordanciaXB = numpy.array([])
    arrayConcordanciaBX = numpy.array([])
    arrayDiscordanciaXB = numpy.array([])
    arrayDiscordanciaBX = numpy.array([])
    dictEntradaX = dict()
    dictEntradaB = dict()
    arrayEntradaX = numpy.array([])
    arrayEntradaB = numpy.array([])
    listAlternativas = []
    listNomeB = []
    listNomeX = []
    listMatrizClassificacaoDiscordancia = []
    listMatrizClassificacaoConcordancia = []
    somatorioC = numpy.array([])
    matrizEntrada = None
    somatorioW = 0
    vlambda = 0
    def __init__(self, matrizEntrada, vlambda):
        self.matrizEntrada = matrizEntrada
        self.vlambda = vlambda
        self.calculaValores()
    def calculaValores(self):
        self.getConvertValores()
        self.getcalculateBX_XB()

```

```

        self.getCalculateCBX()
        self.getCalculateCXB()
        self.getConcordanciaBX()
        self.getConcordanciaXB()
        self.getDXB()
        self.getDBX()
        self.getDiscordanciaBX()
        self.getDiscordanciaXB()
        self.getMatrizClassDiscordancia()
        self.getMatrizClassConcordancia()
        classPessimistaDiscordancia =
self.vetorClassificacaoPessimista(self.listMatrizClassificacaoDiscordancia)
        classOtimistaDiscordancia =
self.vetorClassificacaoOtimista(self.listMatrizClassificacaoDiscordancia)
        classPessimistaConcordancia =
self.vetorClassificacaoPessimista(self.listMatrizClassificacaoConcordancia)
        classOtimistaConcordancia =
self.vetorClassificacaoOtimista(self.listMatrizClassificacaoConcordancia)
        self.listClassificacaoFinalOtimistaDiscordancia =
self.organizadolistMatrizClassificacao(classOtimistaDiscordancia,
self.listNomeX, self.listNomeB)
        self.listClassificacaoFinalPessimistaDiscordancia =
self.organizadolistMatrizClassificacao(classPessimistaDiscordancia,
self.listNomeX, self.listNomeB)
        self.listClassificacaoFinalOtimistaConcordancia =
self.organizadolistMatrizClassificacao(classOtimistaConcordancia,
self.listNomeX, self.listNomeB)
        self.listClassificacaoFinalPessimistaConcordancia =
self.organizadolistMatrizClassificacao(classPessimistaConcordancia,
self.listNomeX, self.listNomeB)
        def getConvertValores(self):
            self.listAlternativas = self.matrizEntrada.row_values(0)[1:]
            flagB = False
            flagX = False
            for contadorlinhas in range(1,self.matrizEntrada.nrows):
                indicadorLinha =
self.matrizEntrada.row_values(contadorlinhas)[0]
                if isinstance(indicadorLinha, str) == False:
                    indicadorLinha = str(round(indicadorLinha))
                arrayValor =
numpy.array(self.matrizEntrada.row_values(contadorlinhas)[1:])
                if re.match('^[Bb]\\d+', indicadorLinha) is not None:

                    self.dictEntradaB.update({indicadorLinha:arrayValor})
                    self.listNomeB.append(indicadorLinha)
                    if flagB is False:
                        self.arrayEntradaB = arrayValor
                        flagB = True
                    else:
                        self.arrayEntradaB =
numpy.vstack((self.arrayEntradaB,arrayValor))
                        elif re.match('^[Pp]$', indicadorLinha) is not None:

```

```

        self.arrayEntradaP = arrayValor
    elif re.match('^[Qq]$', indicadorLinha) is not None:
        self.arrayEntradaQ = arrayValor
    elif re.match('^[Vv]$', indicadorLinha) is not None:
        self.arrayEntradaV = arrayValor
    elif re.match('^[Ww]$', indicadorLinha) is not None:
        self.arrayEntradaW = arrayValor
        self.somatorioW = numpy.sum(arrayValor)
    else:

self.dictEntradaX.update({indicadorLinha:arrayValor})
        self.listNomeX.append(indicadorLinha)
        if flagX is False:
            self.arrayEntradaX = arrayValor
            flagX = True
        else:
            self.arrayEntradaX =
numpy.vstack((self.arrayEntradaX,arrayValor))
    def getcalculateBX_XB(self):
        flag = False
        for b in self.dictEntradaB:
            for x in self.dictEntradaX:
                if flag is False:
self.dictEntradaX[x]
                    self.arrayBX = self.dictEntradaB[b] -
self.dictEntradaX[x]
                    self.arrayXB = self.dictEntradaX[x] -
self.dictEntradaB[b]
                    flag = True
                else:
                    self.arrayBX =
numpy.vstack((self.arrayBX,self.dictEntradaB[b] - self.dictEntradaX[x]))
                    self.arrayXB =
numpy.vstack((self.arrayXB,self.dictEntradaX[x] - self.dictEntradaB[b]))
    def getCalculateCBX(self):
        flag = False
        iBX = 0
        iB = 0
        for b in self.arrayEntradaB:
            iX = 0
            for x in self.arrayEntradaX:
                tempCbx = numpy.array([])
                for b,x,bx,p,q in
zip(self.arrayEntradaB[iB],self.arrayEntradaX[iX],self.arrayBX[iBX],self.
arrayEntradaP,self.arrayEntradaQ):
                    if bx >= p:
                        tempCbx = numpy.append(tempCbx,0)
                    elif bx < q:
                        tempCbx = numpy.append(tempCbx,1)
                    else:
                        tempCbx = numpy.append(tempCbx,(p - b +
x) / (p - q))

                if flag is False:
                    self.arrayCBX = tempCbx
                    flag = True

```

```

        else:
            self.arrayCBX =
numpy.vstack((self.arrayCBX,tempCbx))
            iX+=1
            iBX+=1
            iB+=1
def getCalculateCXB(self):
    flag = False
    iXB = 0
    iB = 0
    for b in self.arrayEntradaB:
        iX = 0
        for x in self.arrayEntradaX:
            tempCXB = numpy.array([])
            for b,x,xb,p,q in
zip(self.arrayEntradaB[iB],self.arrayEntradaX[iX],self.arrayXB[iXB],self.
arrayEntradaP,self.arrayEntradaQ):
                if xb >= p:
                    tempCXB = numpy.append(tempCXB,0)
                elif xb < q:
                    tempCXB = numpy.append(tempCXB,1)
                else:
                    tempCXB = numpy.append(tempCXB,(p - x +
b) / (p - q))
            if flag is False:
                self.arrayCXB = tempCXB
                flag = True
            else:
                self.arrayCXB =
numpy.vstack((self.arrayCXB,tempCXB))
                iX+=1
                iXB+=1
                iB+=1
def getConcordanciaBX(self):
    for vetorCBX in self.arrayCBX:
        tempWCBX = numpy.array([])
        for cbx,w in zip(vetorCBX,self.arrayEntradaW):
            tempWCBX = numpy.append(tempWCBX,cbx * w)
        self.arrayConcordanciaBX =
numpy.append(self.arrayConcordanciaBX, tempWCBX.sum() / self.somatorioW)
def getConcordanciaXB(self):
    for vetorCXB in self.arrayCXB:
        tempWCXB = numpy.array([])
        for cxb,w in zip(vetorCXB,self.arrayEntradaW):
            tempWCXB = numpy.append(tempWCXB,cxb * w)
        self.arrayConcordanciaXB =
numpy.append(self.arrayConcordanciaXB, tempWCXB.sum() / self.somatorioW)
def getDXB(self):
    flag = False
    iXB = 0
    iB = 0
    for b in self.arrayEntradaB:
        iX = 0
        for x in self.arrayEntradaX:

```

```

        tempDXB = numpy.array([])
        for b,x,xb,p,v in
zip(self.arrayEntradaB[iB],self.arrayEntradaX[iX],self.arrayXB[iXB],self.
arrayEntradaP,self.arrayEntradaV):
            if xb < p:
                tempDXB = numpy.append(tempDXB,0)
            elif xb >= v:
                tempDXB = numpy.append(tempDXB,1)
            else:
                tempDXB = numpy.append(tempDXB,(-p - b
+ x) / (v - p))
        if flag is False:
            self.arrayDXB = tempDXB
            flag = True
        else:
            self.arrayDXB =
numpy.vstack((self.arrayDXB,tempDXB))
            iX+=1
            iXB+=1
            iB+=1
def getDBX(self):
    flag = False
    iBX = 0
    iB = 0
    for b in self.arrayEntradaB:
        iX = 0
        for x in self.arrayEntradaX:
            tempDBX = numpy.array([])
            for b,x,bx,p,v in
zip(self.arrayEntradaB[iB],self.arrayEntradaX[iX],self.arrayBX[iBX],self.
arrayEntradaP,self.arrayEntradaV):
                if bx < p:
                    tempDBX = numpy.append(tempDBX,0)
                elif bx >= v:
                    tempDBX = numpy.append(tempDBX,1)
                else:
                    tempDBX = numpy.append(tempDBX,(-p - x
+ b) / (v - p))
            if flag is False:
                self.arrayDBX = tempDBX
                flag = True
            else:
                self.arrayDBX =
numpy.vstack((self.arrayDBX,tempDBX))
                iX+=1
                iBX+=1
                iB+=1
def getDiscordanciaBX(self):
    for vetorDBX,concordanciaBX in
zip(self.arrayDBX,self.arrayConcordanciaBX):
        tempDBX = numpy.array([])
        for dbx in vetorDBX:
            if dbx > concordanciaBX:

```

```

tempDBX = numpy.append(tempDBX, (1 - dbx) /
(1 - concordanciaBX))
else:
tempDBX = numpy.append(tempDBX, 1)
if vetorDBX.max() == 0:
self.arrayDiscordanciaBX =
numpy.append(self.arrayDiscordanciaBX, concordanciaBX)
elif vetorDBX.max() == 1:
self.arrayDiscordanciaBX =
numpy.append(self.arrayDiscordanciaBX, 0)
else:
self.arrayDiscordanciaBX =
numpy.append(self.arrayDiscordanciaBX, (tempDBX.prod() * concordanciaBX))
def getDiscordanciaXB(self):
for vetorDXB, concordanciaXB in
zip(self.arrayDXB, self.arrayConcordanciaXB):
tempDXB = numpy.array([])
for dxb in vetorDXB:
if dxb > concordanciaXB:
tempDXB = numpy.append(tempDXB, (1 - dxb) /
(1 - concordanciaXB))
else:
tempDXB = numpy.append(tempDXB, 1)
if vetorDXB.max() == 0:
self.arrayDiscordanciaXB =
numpy.append(self.arrayDiscordanciaXB, concordanciaXB)
elif vetorDXB.max() == 1:
self.arrayDiscordanciaXB =
numpy.append(self.arrayDiscordanciaXB, 0)
else:
self.arrayDiscordanciaXB =
numpy.append(self.arrayDiscordanciaXB, (tempDXB.prod() * concordanciaXB))
def getMatrizClassDiscordancia(self):
for discBX, discXB in zip(self.arrayDiscordanciaBX,
self.arrayDiscordanciaXB):
if discBX >= self.vlambda:
if discXB >= self.vlambda:
self.listMatrizClassificacaoDiscordancia.append('I')
else:
self.listMatrizClassificacaoDiscordancia.append('>')
elif discXB >= self.vlambda:
self.listMatrizClassificacaoDiscordancia.append('<')
else:
self.listMatrizClassificacaoDiscordancia.append('R')
def getMatrizClassConcordancia(self):
for discBX, discXB in zip(self.arrayConcordanciaBX,
self.arrayConcordanciaXB):
if discBX >= self.vlambda:
if discXB >= self.vlambda:

```

```

self.listMatrizClassificacaoConcordancia.append('I')
    else:

self.listMatrizClassificacaoConcordancia.append('>')
    elif discXB >= self.vlambda:

self.listMatrizClassificacaoConcordancia.append('<')
    else:

self.listMatrizClassificacaoConcordancia.append('R')
def vetorClassificacaoPessimista(self, vetorPreferencia):
    listClassificacao = []
    for i in vetorPreferencia:
        if i == '>':
            listClassificacao.append('P')
        elif i == 'I':
            listClassificacao.append(i)
        else:
            listClassificacao.append('P-')
    return listClassificacao
def vetorClassificacaoOtimista(self, vetorPreferencia):
    listClassificacao = []
    for i in vetorPreferencia:
        if i == '<':
            listClassificacao.append('P-')
        else:
            listClassificacao.append('P')
    return listClassificacao
def organizadolistMatrizClassificacao(self, arClassificacao,
listNomesX, listNomesB):
    contador = 0
    listCompleta = []
    listTemp = []
    arrMatrizClassificacao = None
    listPontuacao = []
    for valorClassPess, linha in zip(arClassificacao,
range(len(arClassificacao))):
        if linha % len(listNomesX) == 0:
            listCompleta.append(listTemp)
            listTemp = []
            contador += 1
        listTemp.append(valorClassPess)
    listCompleta.append(listTemp)
    listCompleta.pop(0)
    arrMatrizClassificacao = numpy.array(listCompleta).T
    for i in arrMatrizClassificacao:
        contadorPontos = len(listNomesB)
        for j in i[::-1]:
            if j == 'P-':
                contadorPontos-=1
            else:
                break
    listPontuacao.append(contadorPontos)

```

```
        return listPontuacao
if __name__ == '__main__':
    config = getFileConfig(r'config.ini')
    arquivo = xlrd.open_workbook(config['ARQUIVO_ENTRADA'])
    e = Eletre(arquivo.sheet_by_index(0), 0.76)
    OutputEletreTri(e, config['ARQUIVO_SAIDA'])
    corrigeParametros(config['ARQUIVO_SAIDA'])
```

Anexo I

Usinas Seleccionadas

Tabela I.1: Usinas Selecionadas para Avaliação

Código	CEG	UF	Tipo Geração	Tipo Barragem	Potencia (MW)	Histórico de Anomalia / Eventos
1	122	PR	PCH	CCR	10,00	-
2	528	GO	UHE	Ter/Enr	658,00	Percolação
3	630	GO	UHE	Ter/Enr	450,00	-
4	641	MG	UHE	CCR	140,00	Recalque / Rompimento de Barragem a Montante
5	657	PR	UHE	Ter/Enr	619,00	-
6	729	PR	PCH	CCV	1,30	-
7	783	AP	UHE	Terra	78,00	-
8	866	GO	UHE	Ter/Enr	375,00	Recalque
9	898	RS	PCH	Ter/Enr	4,96	Fundação
10	908	GO	UHE	Ter/Enr	32,00	Escorregamento
11	1113	MG	UHE	Ter/Enr	187,17	Deformação por Reação Álcali-Agregado
12	1120	SP	UHE	Ter/Enr	3444,00	Deformação por Reação Álcali-Agregado
13	1152	RS	UHE	Ter/Enr	1450,00	-
14	1420	MG	PCH	Conc. Cicl.	4,00	-
15	1510	AL	UHE	Ter/Enr	400,00	-
16	1975	DF	UHE	Ter/Enr	30,00	Percolação
17	2008	PE	PCH	CCV	1,22	Galgamento
18	2070	MG	PCH	CCR	3,34	Comprometimento de Estruturas Extravasos
19	2176	GO	UHE	Ter/Enr	105,00	Percolação no Pé da Barragem e Túnel de Desvio
20	2563	MG	UHE	CCV	78,00	Idade
21	2591	PR	UHE	CCR	1240,00	-
22	2687	RO	UHE	Terra	216,75	-
23	2731	GO	UHE	Ter/Enr	1275,00	-
24	2757	MG	UHE	CCV	60,00	-
25	2889	PA	UHE	Ter/Enr	8535,00	Interface com Eclusa / Crescimento de Vegetação
26	26701	BA	PCH	Ter/Enr	3,97	-
27	26792	PA	UHE	Ter/Enr	373,40	-
28	27049	AL	UHE	CCV	794,20	-
29	27050	AL	UHE	Ter/Enr	2462,40	-
30	27114	SE	CGH	CCV	0,55	-
31	27244	MT	UHE	Ter/Enr	157,77	Inundação da Casa de Força
32	27448	RO	UHE	CCR	73,50	-
33	27795	GO	UHE	Ter/Enr	127,00	Recalque
34	27963	RO	PCH	CCR	1,50	Escorregamento
35	28352	GO	UHE	CCV	96,45	Recalque
36	28353	TO	UHE	Ter/Enr	498,75	Percolação / Infiltração
37	28354	RS	UHE	CCV	855,00	Deformação
38	28557	AL	PCH	Ter/Enr	1,25	Deformação
39	28565	BA	UHE	Ter/Enr	160,00	-
40	28567	TO	UHE	Ter/Enr	243,20	-
41	28755	SC	PCH	CCR	13,00	Percolação
42	29373	RO	PCH	Ter/Enr	9,60	Escorregamento
43	29434	RO	PCH	Ter/Enr	17,01	-
44	29435	RO	PCH	Ter/Enr	20,00	Percolação / Surgências
45	29436	RO	PCH	Ter/Enr	17,00	-
46	29458	MG	UHE	Ter/Enr	333,70	Percolação
47	29597	MT	UHE	Ter/Enr	261,00	-
48	29736	RO	UHE	Ter/Enr	3750,00	Cheia Excepcional
49	30385	AP	UHE	Ter/Enr	252,00	Cheia Excepcional
50	30458	PR	PCH	Ter/Enr	19,01	Cheia Excepcional

Anexo II

Tabelas de Avaliação REN 696/2015 - ANEEL

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)

1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT

Altura(a)	Comprimento (b)	Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazão de Projeto (f)	Casa de Força (g)
Altura 15m	0 comprimento 200m	2 Concreto Con- vencional	1 Rocha sã	1 entre 30 e 50 anos	1 CMP (Cheia Máxima Prová- vel) ou Decami- lenar	3 Barragem/Dique sem Casa de Força associada
15m <Altura <30m	1 comprimento >200m	3 Alvenaria de pedra/ Concreto ciclópico/ Con- creto Rolado -CCR	2 Rocha alterada dura com trata- mento	2 entre 10 e 30 anos	2 Milenar	2 Casa de força as- sociada à barra- gem por meio de conduto forçado, túnel, etc.
30m 60m	2 -	Terra homogê- nea/ Enroca- mento/ Terra enrocamento	3 Rocha alterada sem tratamento / Rocha alte- rada fraturada com tratamento	3 entre 5 e 10 anos	3 TR = 500 anos	5 Casa de força ao pé da barragem
Altura >60m	3 -	-	Rocha alterada mole / Saprolito / Solo compacto	4 <5 ou >50 anos ou sem informa- ção	4 TR <500 anos ou Desconheci- da/ Estudo não confiável	10 -
	-	-	Solo residual / aluvião	5 -	-	

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)

2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC						
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (h)	Confiabilidade das Estruturas de Adução (i)	Percolação(j)	Deformações e Recalques (k)	Deterioração dos Taludes / Paramentos(l)	Eclusa (*) (m)	
Estruturas civis e hidroeletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) destruídos.	0 Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento.	0 Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem.	0 Inexistente	0 Inexistente	0 Não possui eclusa	0
Estruturas civis e hidroeletromecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente.	4 Estruturas civis comprovadas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação.	4 Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas.	3 Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo.	1 Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo.	1 Estruturas civis e hidroeletromecânicas bem mantidas e funcionando.	1
Estrut. civis comprom. ou dispos. hidroeletromec. com problemas identificados, com red. de capacidade de vazão e com medidas corret. em implant. / canais ou verted. (tipo sol. livre) c/ erosões e/ou parcialm. obstruíd., c/ risco de comprom. da estrutura vertente.	7 Estruturas civis comprovadas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas.	6 Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico.	5 Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento.	5 Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva.	5 Estruturas civis comprovadas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação.	2
Estruturas civis comprovadas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas.	10 -	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente.	8 Existência de trinças, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança.	8 Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança.	7 Estruturas civis comprovadas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e sem medidas corretivas.	4

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)

3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - PS

Existência de documentação de projeto(n)	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem (o)	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p)	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q)	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r)
Projeto executivo e "como construído".	0 Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem.	0 Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento.	0 Sim ou Vertedouro tipo soleira livre.	0 Emite regularmente os relatórios.
Projeto executivo ou "como construído".	2 Possui técnico responsável pela segurança da barragem.	4 Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção.	3 Não	6 Emite os relatórios sem periodicidade.
Projeto básico.	4 Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem.	8 Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento.	5 -	5 Não emite os relatórios.
Anteprojetos ou Projeto conceitual.	6 -	6 Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções.	-	-
Inexistência de documentação de projeto.	8 -	-	-	-

II.2 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)					
Volume Total do Reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas(b)	Impacto ambiental(c)	Impacto sócio-econômico(d)		
Pequeno <= 5 milhões m ³	INEXISTENTE(não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem)	0	SIGNIFICATIVO(área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais)	3	INEXISTENTE(não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem)
Médio 5 milhões a 75 milhões m ³	POUCO FREQUENTE(não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local)	4	MUITO SIGNIFICATIVO(área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica)	5	BAIXO(existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação)
Grande 75 milhões a 200 milhões m ³	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas)	8	-	-	ALTO(existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação)
Muito Grande >200 milhões m ³	EXISTENTE(existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas)	12	-	-	-

Anexo III

Formulário de Segurança de Barragens - FSB

Ano de referência

2017

Preenchimento concluído

#N/D

Formulário de Segurança de Barragens(FSB): Matriz para Classificação das Barragens e Informações Gerais



Parte I: Informações Gerais

Instruções gerais:

- 1) USAR SOMENTE a versão Excel 2010 ou superior.
- 2) Este Formulário FSB deverá ser preenchido para cada barramento da usina, seja barragem ou dique (Ex: um empreendedor que possua uma usina com 10 barramentos deverá preencher e encaminhar 10 Formulários FSB).
- 3) Antes do preenchimento do Formulário FSB, realizar a leitura do Manual de Instruções de Preenchimento, disponível na página da SFG/ANEEL: <http://www.aneel.gov.br/SFG>
- 4) Nos termos do Art. 5º da REN nº 696/2015, a ANEEL publicará relatório de classificação das barragens. Assim, as informações aqui prestadas estão sujeitas a avaliação da fiscalização.

I - Identificação do empreendedor

Nome da usina (selecionar da lista)		Identificador ANEEL da usina	-
Denominação da empresa outorgada	-	Identificador ANEEL do Agente	-
Nome Representante legal da empresa		E-mail	
		Telefone	
Nome do Responsável técnico pela segurança da barragem (com registro no CREA)		E-mail	
		Telefone	
Endereço para correspondência da empresa outorgada		Município	
		UF	
Código de Endereço Postal (CEP)			

II - Dados técnicos referentes ao empreendimento

Potência outorgada da usina (MW)	#VALOR!	Capacidade total do reservatório (m³)	
Nome do rio	-	Data do 1º enchimento do reservatório	
Município	-	Nº total de barramentos da usina	
UF			

III - Dados técnicos referentes ao barramento

Selecione o tipo de barramento		Nome do barramento:		Data de conclusão do barramento	
Coordenadas geográficas do barramento	Latitude:	Grau (°)			
		Minuto (')			
		Segundo (")			
	Longitude:	Grau (°)			
		Minuto (')			
		Segundo (")			
Altura do maciço (m)		Comprimento do barramento (m)			

IV - Obrigações Normativas referentes ao barramento

Plano de Segurança da Barragem - PSB elaborado?		Data de conclusão PSB	
Plano de Ação de Emergência - PAE elaborado?		Data de conclusão PAE	
Plano de Ação de Emergência - PAE protocolado na Defesa Civil/Prefeitura?		Data de protocolo PAE	
Inspeção de Segurança Regular - ISR realizada?		Data de conclusão ISR	
Inspeção de Segurança Especial - ISE realizada?		Data de conclusão ISE	
Nível de Segurança da Barragem			

Parte II: Matriz de Classificação

Instruções gerais: A Matriz de Classificação abaixo refere-se ao Anexo II da Resolução Normativa nº 696, de 15 de dezembro de 2015. Para cada um dos itens a seguir, selecionar a opção conforme a realidade do barramento em análise.

1. CATEGORIA DE RISCO:

1.1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT

Altura (a)		
Comprimento (b)		
Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c)		#N/D
Tipo de fundação (d)		#N/D
Idade da Barragem (e)		
Vazão de Projeto (f)		#N/D
Casa de Força (g)		#N/D

Σ CT	#N/D
-------------	------

1.2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (h)		#N/D
Confiabilidade das Estruturas de Adução (i)		#N/D
Percolação (j)		#N/D
Deformações e Recalques (k)		#N/D
Deterioração dos Taludes / Paramentos (l)		#N/D
Eclusa (m)		#N/D
Σ EC		#N/D

1.3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - PS

Existência de documentação de projeto (n)		#N/D
Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem (o)		#N/D
Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p)		#N/D
Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q)		#N/D
Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r)		#N/D
Σ PS		#N/D
Σ CT+ Σ EC+ Σ PS		#N/D
CATEGORIA DE RISCO		#N/D

2-DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA

Volume Total do Reservatório (a)		
Potencial de perdas de vidas humanas (b)		#N/D
Impacto ambiental (c)		#N/D
Impacto sócio-económico (d)		#N/D
Σ DPA		#N/D
DANO POTENCIAL ASSOCIADO		#N/D

CLASSE DA BARRAGEM	#N/D
--------------------	------

ENQUADRAMENTO A RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 696/2015

Altura do maciço maior ou igual a 15 metros?	Sim	→ Enquadrada na Resolução Normativa ANEEL n° 696/2015? Observação: Avaliação preliminar e sujeita a revisão da fiscalização.	#N/D
Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³?	Sim		
Categoria de dano potencial médio ou alto?	#N/D		

Parte III : Declarações

Instrução geral: Marcar os campos abaixo ao concordar com a declarações apresentadas.

Anotação de Responsabilidade Técnica - ART

Declaro que as ações conduzidas pelo responsável técnico para a classificação da categoria de risco e dano potencial da(s) barragem(s) e/ou do(s) dique(s) e demais informações prestadas neste documento tiveram o devido recolhimento de anotação de responsabilidade técnica – ART específica ou de cargo e função, em atendimento ao parágrafo 2°, do Art. 18 da Resolução Normativa n° 696, de 15 de dezembro de 2015.

Declaração do Representante Legal:

Declaro, para fins de direito, sob as penas da lei e em atendimento à Resolução Normativa n° 696, de 15 de dezembro de 2015, que as informações prestadas neste documento são verdadeiras, autênticas e condizentes com a realidade da(s) barragem(s) e/ou do(s) dique(s) da central geradora em referência.
 Nada mais a declarar, e ciente das responsabilidades pelas declarações prestadas, firmo a presente declaração.
 Fico ciente através desse documento que a falsidade dessa declaração configura crime previsto no Código Penal Brasileiro, e passível de apuração na forma da Lei.

Local [REDACTED]

Data [REDACTED]

Nome do Representante Legal da Empresa
CPF do Representante Legal da Empresa
Cargo/Função do Representante Legal da Empresa

Nome do Responsável Técnico pela segurança da barragem, com registro do CREA
N° CREA do Responsável Técnico pela segurança da barragem
CPF do Responsável Técnico pela segurança da barragem
Cargo/Função do Responsável Técnico pela segurança da barragem

Anexo IV

Questionário de Validação - Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação Estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens

Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB

1. Identifique seu barramento quanto ao porte de geração.

- CGH
- PCH
- UHE

Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB

2. Identifique seu barramento quanto ao tipo construtivo.

- Terra
- Enrocamento
- Concreto

Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB

3. Em qual região do país seu barramento está localizado?

- Norte
- Nordeste
- Centro Oeste
- Sudeste
- Sul

Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB

4. A Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012, estabeleceu um conjunto de critérios gerais para efeito de categorização do barramento quanto ao risco a ele associado. Esses critérios (fatores de risco) estão subdivididos em três grupos: Características Técnicas, Estado de Conservação e Planos de Segurança.

Conforme sua percepção, classifique em ordem decrescente de importância os fatores de risco estipulados para o grupo Características Técnicas.

<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Altura
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Comprimento
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Tipo de Barragem quanto ao material de construção
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Tipo de fundação
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Idade da Barragem
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Vazão de Projeto
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Casa de Força

Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB

5. Conforme sua percepção, classifique em ordem decrescente de importância os fatores de risco estipulados para o grupo Estado de Conservação.

<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Confiabilidade das Estruturas Extravasoras
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Confiabilidade das Estruturas de Adução
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Percolação
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Deformações e Recalques
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Deterioração de Taludes / Paramentos
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Eclusa

Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB

6. Conforme sua percepção, classifique em ordem decrescente de importância os fatores de risco estipulados para o grupo Planos de Segurança.

<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Existência de documentação de projeto
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança de Barragem
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem
<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação

Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB

7. No seu entendimento, assumindo a possibilidade de aprimoramento da Política Nacional de Segurança de Barragens, algum dos fatores de risco dentre os elencados anteriormente é descartável?

- Não
- Sim (especifique)

Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB

8. No seu entendimento, assumindo a possibilidade de aprimoramento da Política Nacional de Segurança de Barragens, algum dos fatores de risco dentre os elencados anteriormente merece ser revisado?

- Não
- Sim (especifique)

Avaliação dos Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco estabelecidos na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB

9. Considerando a possibilidade de aprimoramento do sistema de categorização de barragens, indique abaixo temas que considere relevante (Marque até 3 caixas).

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Instrumentação | <input type="checkbox"/> Alterações de uso, características ou instalações da barragem existente |
| <input type="checkbox"/> Assoreamento | <input type="checkbox"/> Qualificação dos agentes responsáveis |
| <input type="checkbox"/> Erosão | <input type="checkbox"/> Controle de pragas de natureza animal ou vegetal |
| <input type="checkbox"/> Deslizamentos | |
| <input type="checkbox"/> Outro (especifique) | |