



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

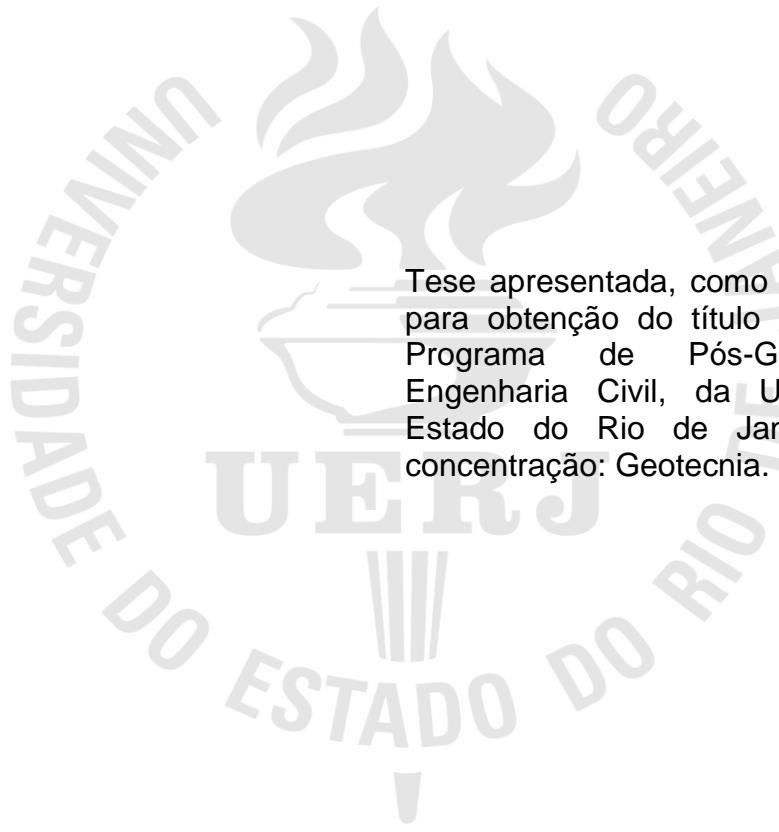
Rafaela Baldi Fernandes

**Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore
de eventos e análise FMEA**

Rio de Janeiro
2020

Rafaela Baldi Fernandes

Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA



Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Profa. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

F363 Fernandes, Rafaela Baldi.
Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA / Rafaela Baldi Fernandes. – 2020.
241f.

Orientadora: Ana Cristina Castro Fontenla Sieira.
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Barragens e açudes - Segurança - Teses. 3. Falhas estruturais - Teses. 4. Avaliação de riscos - Teses. I. Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 627.82

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

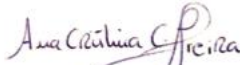
Rafaela Baldi Fernandes

**Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e
análise FMEA**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 26 de novembro de 2020.

Banca Examinadora:




Profa. Dra. Ana Cristina Castro Fontenla Sicira – Presidente / Orientadora
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho
Faculdade de Engenharia – UERJ



Profa. Dra. Maria das Graças Gardoni de Almeida
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG



Profa. Dra. Flavia Peres Nunes
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC-MG

Rio de Janeiro

2020

DEDICATÓRIA

Aos meus pais por toda amor e incentivo durante a minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

À minha família e ao meu marido, por entenderem toda a ausência e os nervos a flor da pele para o desenvolvimento dessa tese. Obrigada por tudo.

À minha orientadora, Ana Cristina, que foi sempre tão delicada nos seus posicionamentos e assertiva nas cobranças, agradeço por todo o estímulo para a conclusão deste trabalho.

À professora Maria das Graças Gardoni, que é uma amiga e sempre está por perto das minhas conquistas, agradeço por todas as conversas e por compartilhar comigo um pouco do seu conhecimento e da sua experiência de vida.

Aos meus clientes e alunos, obrigada por serem objeto dos desafios constantes que encontro nessa Geotecnia.

Aos meus colegas do doutorado, especialmente ao Lennon que fez parte de todo esse momento de uma forma bem especial e que hoje é meu companheiro de trabalho, obrigada pelo companheirismo.

À UERJ, Universidade que me acolheu de braços mais que abertos para o Doutorado, compreendendo a minha necessidade de conciliar a academia com a vida profissional. Aos professores que fizeram parte desta trajetória, especialmente Armando Prestes, exemplos de muita sabedoria e humildade, meu eterno agradecimento.

À todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

Todo o conhecimento genuíno tem origem na experiência direta.

Mao Tse-Tung

RESUMO

FERNANDES, Rafaela Baldi. *Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA*. 2020. 241f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Alguns estudos que analisam o risco de falha consideram que entre 2016 e 2025 devem ser esperadas cerca de 30 grandes tragédias e, se avaliarmos os dados entre 1900 e 2014, tem-se uma média de três rupturas a cada dois anos, considerando somente as rupturas divulgadas e investigadas. Pode-se dizer que as falhas, potencialmente, são e serão impulsionadas pela economia, uma vez que o custo tem sido a principal variável considerada no projeto, construção, operação, monitoramento e fechamento dessas estruturas. À medida que as empresas reduzem os investimentos em manutenção, gestão de riscos e prevenção de falhas, tem-se o fomento à recuperação econômica, competitividade do valor de produto e redução de dívidas, exigidas pelos investidores. O resultado tem sido uma perda de mão de obra, a ponto de as empresas não terem mais conhecimento suficiente sobre as habilidades de engenharia e operacionais que se aplicam ao gerenciamento de rejeitos e água. O aprendizado com as tragédias de barragens é praticamente inexistente, não sendo uma exclusividade brasileira, trazendo uma consequência ambiental e social catastrófica. As falhas ocorrerão enquanto a tendência é que sejam vistas e tratadas como imprevisíveis, sem gestão do risco. A frequência e severidade das falhas estão aumentando globalmente, sendo que a maioria seria evitável se observada uma correta diligência por parte dos proprietários e operadores de barragens. Existe o conhecimento técnico para permitir que barragens sejam construídas e operadas com baixo risco, mas a frequência das rupturas nos remete a lapsos na aplicação consistente de perícia durante toda a vida de uma instalação e por falta de atenção aos detalhes. No Brasil, a prática profissional e a orientação regulatória permitem a confiança desenfreada no Método Observacional, um processo contínuo, gerenciado e integrado de projeto, controle de construção e monitoramento das estruturas. Em muitas das rupturas, os relatórios indicam uma série de falhas construtivas nos sistemas de filtros e drenos, galerias de concreto, desvios e afins, além de questões operacionais críticas ao longo dos anos de operação. As melhores práticas, os melhores conhecimentos e as melhores técnicas disponíveis precisam ser diretrizes principais, assumidas sobre planejamento, projeto, construção, operação, monitoramento e fechamento de barragens. À medida que essas diretrizes se tornam claras, e são aplicadas, a indústria deixará de depender apenas das suposições acerca de métodos observacionais, que consideram a expertise e o ponto de vista particular de engenheiros e consultores para tomar decisões importantes que afetam o risco. O Método Baldi, desenvolvido na presente Tese, considera as informações de inspeção e instrumentação, identificando os riscos a partir de árvores de eventos, separadamente em, riscos intoleráveis, toleráveis e aceitáveis. Os riscos intoleráveis são conduzidos para análise de falha do tipo FMEA, onde são avaliadas as falhas severas, intermediárias e brandas. O objetivo é possibilitar a elaboração de um plano de ação assertivo e efetivo para Gestão de Segurança de Barragens.

Palavras-chave: Barragens; Rupturas; Gestão de risco; Gestão de falhas.

ABSTRACT

FERNANDES, Rafaela Baldi. *Methodology for risk management in dams from the Event Tree and FMEA Analysis*. 2020. 241f. Thesis (PhD in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Some studies that analyze the risk of failure consider that between 2016 and 2025 about 30 major tragedies should be expected and if we evaluate the data between 1900 and 2014, there is an average of three ruptures every two years, considering only the ruptures disseminated and investigated. It can be said that failures are potentially and will be driven by the economy, since cost has been the main variable considered in the design, construction, operation, monitoring and closing plan of these structures. As companies reduce investments in maintenance, risk management and failure prevention, there is an incentive for economic recovery, competitiveness of product value and debt reduction, required by investors. The result has been a loss of labor, to the point that companies no longer have sufficient knowledge about the engineering and operational skills that apply to tailings and water management. Learning from the dams' tragedies is practically non-existent, not being a Brazilian exclusivity, bringing a catastrophic environmental and social consequence. Failures will occur as long as the tendency is for them to be seen and treated as unpredictable, without risk management. The frequency and severity of the failures are increasing globally, the majority of which would be preventable if observed due diligence on the part of dam owners and operators. Technical knowledge exists to allow dams to be built and operated at low risk, but the frequency of ruptures leads to lapses in the consistent application of expertise throughout the life of an installation and due to a lack of attention to detail. In Brazil, professional practice and regulatory guidance allow unbridled confidence in the Observational Method, a continuous, managed and integrated design process, construction control and monitoring of structures. In many of the failures, the reports indicate a series of constructive breaches in the filter and drain systems, concrete galleries, concrete bypass channels, in addition to critical operational issues over the years of operation. The best practices, the best knowledge and the best available techniques need to be main guidelines, assumed about planning, design, construction, operation, monitoring and closing plan of dams. As these guidelines become clear, and are applied, the industry will no longer depend on assumptions about observational methods, which consider the expertise and particular point of view of engineers and consultants to make important decisions that affect risk. The Baldi Method, developed in this Thesis, considers the information of inspection and instrumentation, identifying risks from event trees, separately, intolerable, tolerable and acceptable risks. The intolerable risks are conducted for FMEA-type failure analysis, where severe, intermediate and mild failures are assessed. The objective is to enable the development of an assertive and effective action plan for Dam Safety Management.

Keywords: Dams; Failures; Risk management; Failure management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo idealizado deposição de rejeitos arenosos e lama. (a) areia; (b) lama remoldada e (c) corpo de prova de lama intacta. Fonte: Morgenstern <i>et al.</i> (2016).....	43
Figura 2 - Curvas típicas de adensamento para areias (cinza) e lamas (vermelha). Fonte: Morgenstern <i>et al.</i> (2016).....	44
Figura 3 - Processo idealizado da deposição de rejeitos Fonte: Adaptado de Morgenstern <i>et al.</i> (2016).....	44
Figura 4 - Rupturas e Incidentes em barragens de água e rejeito por modo de falha. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001).....	52
Figura 5 - Falhas em barragens de rejeito por data. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001).....	53
Figura 6 - Falhas em barragens de rejeito em relação à altura. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001).....	53
Figura 7 - Tipos de barragens de rejeitos e incidentes. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001).....	54
Figura 8 - Modos de falha em barragens de rejeitos. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001).....	55
Figura 9 - Número de produção de minas x crescimento no preço de cobre. Fonte: Adaptado de Chambers e Bowker (2017a).....	58
Figura 10 - Crescimento da severidade e frequência de rupturas de barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de Chambers e Bowker (2017a).....	58
Figura 11 - Comparativo dos incidentes em barragens de rejeito em relação aos status. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001).....	59
Figura 12 - Descaracterização da barragem Elwha. Fonte: NPS (2020).....	71
Figura 13 - Descaracterização da barragem B8. Fonte: Vale (2020).....	72
Figura 14 – Diagrama F-N para relação de fatalidades e probabilidade de falhas. Fonte: Adaptado de Lacasse (2019).....	74
Figura 15 - Probabilidade anual de falhas e suas consequências. Fonte: Adaptado de Whitman (1984).....	74
Figura 16 - Tensão cisalhante na distribuição normal. Fonte: Adaptado de Lacasse (2019).....	77

Figura 17 - Margem de segurança considerando a probabilidade de falha. Fonte: Adaptado de Londe (1993).....	78
Figura 18 - Pequenas e grandes incertezas na margem de segurança. Fonte: Adaptado de Londe (1993).....	78
Figura 19 - Fator de segurança x Probabilidade. Fonte: Adaptado de Lacasse (2019)	78
Figura 20 - Índice de confiabilidade x Probabilidade de falha. Fonte: Adaptado de Lacasse (2019).....	79
Figura 21 - Variação do fator de segurança em relação ao atrito. Fonte: Adaptado de Leps (1970)	80
Figura 22 - Causas de rupturas em barragens, 1915 a 2016. Fonte: Adaptado de Chambers (2017b)	82
Figura 23 - Volume liberado e perdas de vida em rupturas. Fonte: Adaptado de Santamarina (2019).....	83
Figura 24 - Processo de gestão e risco. Adaptado de Oliveira (2009)	87
Figura 25 - Fluxograma típico do processo HAZOP. Fonte: Elaborado pela autora..	93
Figura 26 - Árvore de Eventos sob o cenário do galgamento para o barramento em construção (4a) e em operação (4b). Fonte: RESAG (2017)	96
Figura 27 - Triângulo de riscos. Adaptado de Brazendale e Bell (1994)	97
Figura 28 - Matriz FMEA. Fonte: Elaborado pela autora	100
Figura 29 - Valores de nível d'água associados ao volume dos reservatórios. Fonte: Elaborado pela autora	104
Figura 30 - Modelo de curva chuva-vazão. Fonte: Elaborado pela autora	106
Figura 31 - Modelo de tempo de concentração. Fonte: Elaborado pela autora.....	106
Figura 32 - Vista da Barragem de Tucuruí. Fonte: Prefeitura de Tucuruí (2018)	108
Figura 33 - Vista da Barragem de Três Gargantas. Fonte: Consórcio Três Gargantas (2018).....	109
Figura 34 - Tipos de vertedouros e classificação. Fonte: Adaptado de Cicarelli (2008)	110
Figura 35 - Bolas de sombra em reservatório de Los Angeles. Fonte: Goniadis (2015)	111
Figura 36 - Esquema de erosão interna e <i>piping</i> . Fonte: Adaptado de Luthi (2011)	114

Figura 37 - Modelo da falha por erosão interna e <i>piping</i> em sequenciamento. Fonte: Adaptado de Foster <i>et al.</i> (2000).....	115
Figura 38 - Trajetória de tensões para carregamento não drenado e descarregamento drenado de uma areia. Fonte: Adaptado de Morgenstern <i>et al.</i> (2016).....	123
Figura 39 - Definição do parâmetro de estado para tensão constante. Fonte: Adaptado de Morgenstern <i>et al.</i> (2016).....	124
Figura 40 - Mudança no parâmetro de estado. Fonte: Morgenstern <i>et al.</i> (2016) ...	125
Figura 41 - Exemplo de parâmetros de estado para amostras de rejeitos arenosos. Fonte: Adaptado de Morgenstern <i>et al.</i> (2016).....	126
Figura 42 - Critério de liquefação de Robertson para F-02. Fonte: Adaptado de Morgenstern <i>et al.</i> (2016)	126
Figura 43 - Resistências de escoamento para dados de CPT em depósitos arenosos. Fonte: Adaptado de Morgenstern <i>et al.</i> (2016).....	127
Figura 44 - Trajetórias de tensões durante carregamento cíclico. Fonte: Adaptado de Morgenstern <i>et al.</i> (2016)	130
Figura 45 - Resultado típico de ensaio de extrusão lateral em areias. Fonte: Adaptado de Morgenstern <i>et al.</i> (2016).....	132
Figura 46 - Modos de falha em barragens de água e rejeitos dos Estados Unidos. Fonte: Adaptado de ASDSO (2018)	142
Figura 47 - Causas de rupturas em barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de Blight (2010).....	145
Figura 48 - Grandes barragens de água por estado e região no Brasil. Fonte: CBDB (2020).....	160
Figura 49 - Barragens de rejeito inseridas na PNSB, por Estado. Fonte: ANM (2019)	163
Figura 50 - Barragens de rejeito inseridas na PNSB por método construtivo. Fonte: ANM (2019).....	163
Figura 51 - Uso principal das barragens, conforme Relatório ANA (2018).....	169
Figura 52 - Infográfico do processo de Gerenciamento de Risco em Barragens. Fonte: Adaptado de FEMA (2015).....	176
Figura 53 - Matriz FMEA da USACE. Fonte: adaptado de USACE (2014)	178
Figura 54 - Matriz FMEA para o exemplo da Tabela 49. Fonte: elaborado pela autora	195

Figura 55 - Matriz FMEA da Barragem A. Fonte: Elaborado pela autora	217
Figura 56 - Matriz FMEA da Barragem B. Fonte: Elaborado pela autora	217
Figura 57 - Matriz FMEA da Barragem C. Fonte: Elaborado pela autora	218

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Legislação aplicada a barragens. Fonte: Elaborado pela autora	49
Tabela 2 - Determinação do tempo de recorrência para fechamento de barragens. Fonte: Adaptada de Szymanski e Davies (2004)	64
Tabela 3 - Determinação do tempo de recorrência em projetos de fechamento de barragens. Fonte: Adaptado de Szymanski e Davies (2004)	65
Tabela 4 - Classificação das barragens quanto à dimensão. Fonte: Adaptado de Pinheiro (2011).....	66
Tabela 5 - Classificação das barragens quanto ao potencial de risco. Fonte: Adaptado de Pinheiro (2011).....	66
Tabela 6 - Critérios de cálculo de cheia de projeto de vertedouros, conforme CBDB. Fonte: Adaptado de Pinheiro (2011)	67
Tabela 7 - Valores de risco hidrológico em função do tempo de retorno e vida útil da estrutura. Fonte: Elaborado pela autora.....	68
Tabela 8 - Categorias de Frequências de acordo com cenários. Fonte: Adaptado de Cardella (2008).....	90
Tabela 9 - Categorias de Severidade dos riscos identificados. Fonte: Adaptado de Cardella (2008).....	91
Tabela 10 - Matriz de Risco da APP ou APR. Fonte: Adaptado de Cardella (2008) .	92
Tabela 11 - Triângulo de riscos. Adaptado de Brazendale e Bell (1994)	98
Tabela 12 - Probabilidade, em percentual, da ocorrência de um evento. Fonte: Elaborado pela autora	107
Tabela 13 - Estatísticas das falhas em barragem de rejeito ao longo dos anos, por tipo de ruptura ou incidente. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016).....	135
Tabela 14 - Falhas por tipo construtivo ou funcionalidade das barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)	136
Tabela 15 - Tipos de rupturas e incidentes por país. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016).....	137
Tabela 16 - Ranking dos países em termos de rupturas e incidentes de barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)	138
Tabela 17 - Falhas ocorridas no Brasil até setembro de 2016. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016).....	138

Tabela 18 - Modos de falhas de barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016).....	139
Tabela 19 – Tipos de barragens nas rupturas de barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)	140
Tabela 20 - Maiores barragens no mundo. Fonte: Adaptado de ICOLD (2020)	144
Tabela 21 - Probabilidade de ruptura de barragens, considerando dados de 1831 a 1965. Fonte: Adaptado de Cenderelli (2000)	144
Tabela 22 - Resumo da coletânea de rupturas de barragens de água e rejeito. Fonte: Elaborado pela autora	146
Tabela 23 - Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora	147
Tabela 24 - Estudo Completo das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora	156
Tabela 25 - Conclusão dos estudos de rupturas de barragens. Fonte: Elaborado pela autora	158
Tabela 26 - Tipos de grandes barragens de água no Brasil. Fonte: Adaptado de CBDB (2020).....	161
Tabela 27 - Barragens de Rejeito no Brasil. Fonte: Adaptado de ANM (2019)	162
Tabela 28 - Classe de barragens ANM conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANM (2019).....	162
Tabela 29 - Barragens de Energia no Brasil. Fonte: Adaptado de ANEEL (2018) ..	164
Tabela 30 - Classe de barragens ANEEL conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).....	164
Tabela 31 – Compilado da ANA para as Barragens de Rejeito no Brasil. Fonte: Adaptado de ANA (2018)	165
Tabela 32 – Compilado da ANA para as Barragens de Água para Energia no Brasil. Fonte: Adaptado de ANA (2018)	165
Tabela 33 – Compilado da ANA para Classe de barragens da ANM conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANA (2018).....	166
Tabela 34 - Compilado ANA para Classe de barragens da ANEEL conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANA (2018).....	166
Tabela 35 - Barragens de Água no Brasil. Fonte: Adaptado de ANA (2018)	167

Tabela 36 - Classe de barragens ANA conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANA (2018)	167
Tabela 37 - Comparativo das estruturas contidas em cada Banco de Dados. Fonte: Elaborado pela autora	168
Tabela 38 - Comparativo das estruturas por órgão. Fonte: Relatório ANA (2018) ..	169
Tabela 39 - Comparativo das estruturas por órgão, conforme Relatório ANA. Fonte: Adaptado de ANA (2018)	170
Tabela 40 - Dados relevantes das barragens do Relatório ANA (2018). Fonte: ANA (2018).....	172
Tabela 41 - Barragens no estado de MG. Fonte: Adaptado de FEAM (2018).....	173
Tabela 42 - Exemplo de Lista de Anomalias, magnitudes e níveis de perigo pelo Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora	183
Tabela 43 - Exemplo de Probabilidades (PA) e os Modos de Falha (MF) para determinadas anomalias, pelo Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora	186
Tabela 44 - Árvore de Eventos para Anomalia B.1.1. Fonte: Elaborado pela autora	188
Tabela 45 - Descritivo probabilístico da Anomalia B.1.1, com base na Árvore de Eventos do Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora	189
Tabela 46 - Índice de Ocorrência (O) – Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora	192
Tabela 47 - Índice de Detecção (D) – Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora	193
Tabela 48 - Índice de Severidade (S) – Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora	193
Tabela 49 - Exemplo de análise FMEA para Barragem, Talude de Montante e Coroamento. Fonte: Elaborado pela autora	196
Tabela 50 - Termos para diversas regiões de barragens. Fonte: Elaborado pela autora	197
Tabela 51 - Anomalias da Barragem A	201
Tabela 52 - Anomalias da Barragem B	202
Tabela 53 - Anomalias da Barragem C	203
Tabela 54 - Anomalias críticas da Barragem A	206
Tabela 55 - Anomalias críticas da Barragem B	207
Tabela 56 - Anomalias críticas da Barragem C	208
Tabela 57 - Ordenamento prioritários dos Riscos Inaceitáveis da Barragem A	211

Tabela 58 - Ordenamento prioritários dos Riscos Inaceitáveis da Barragem B	214
Tabela 59 - Ordenamento prioritários dos Riscos Inaceitáveis da Barragem C	214
Tabela 60 - Resumo das análises realizadas.....	219

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALARP	<i>As low as reasonably practicable</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
APP	Análise preliminar de perigos
APR	Análise preliminar de riscos
AQR	Análise de efeitos e consequências
AS/NZS	<i>Australian/Standard New Zeland</i>
ASDSO	<i>Association of State Dam Safety Officials</i>
ATO	Acompanhamento técnico de obra
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CDA	<i>Canadian Dam Association</i>
CMP	Cheia máxima provável
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CRI	Categoria de Risco
CSL	Linha de estado crítico
CSP2	<i>Center for Science in Public Participation</i>
CPT	<i>Cone penetration test</i>
DAMBRK	<i>Dam Break</i>
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral (extinto)

DPA	Dano Potencial Associado
DPR	Descritivo probabilístico da anomalia
EUA	Estados Unidos da América
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FLDWAV	<i>Flood Wave Dynamic Model</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
HACCP	<i>Hazard Analysis of Critical Control Points</i>
HAZID	<i>Hazard Identification Study</i>
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i>
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICI	<i>Imperial Chemical Industries</i>
ICMM	<i>International Council on Mining and Metals</i>
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
IFC	Corporação Financeira Internacional – Banco Mundial
IGAM	Instituto de Gestão das Águas
ISE	Inspeção de Segurança Especial
ISSO	International Organization for Standardization
ISR	Inspeção de Segurança Regular
LOPA	Layers of protection analysis
MAC	Melhores práticas elaboradas pelo ICMM
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
NPS	<i>National Protection Park</i>

NWS	<i>National Weather Service</i>
PAE	Plano de Ação Emergencial de Barragens
PAEBM	Plano de Ação Emergencial de Barragens de Mineração
PEAD	Poliestireno de alta densidade
PFMA	<i>Process Failure Mode Effects Analysis</i>
PMP	Precipitação Máxima Provável
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PRAD	Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
PSB	Plano de Segurança de Barragens
RAL	Relatório Anual de Lavra
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
SIGBM	Sistema Integrado de Gestão de Barragens
SIL	Avaliação do Nível de Integridade e Segurança
SMPDBK	<i>Simplified Dam Break</i>
SNISB	Sistema Nacional de Segurança de Barragens
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
USACE	<i>US Army Corps of Engineers</i>
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
USCOLD	<i>United States Committee on Large Dams</i>
WMTF	<i>World Mine Tailings Failures</i>
VESP	Volume de espera
VMP	Vazão máxima provável

LISTA DE SÍMBOLOS

AU	aumentou
B	base
CN	número de curva
CT	características técnicas
coV	coeficiente de variação
D	índice de detecção
DI	diminuiu
DS	desapareceu
e	índice de vazios
E	exposição dos elementos ao risco
EC	estado de conservação
FS	fator de segurança
L	largura
m	metros
m ³	metros cúbicos
M	margem de segurança
M	magnitude
MF	modo de falha
n	número de eventos
N	vida útil de obras hidráulicas
NP	nível de perigo
O	índice de ocorrência
p	probabilidade
p´	tensão efetiva
PA	probabilidade de anomalia
PC	permaneceu constante
Pf	probabilidade de falha
PI	probabilidade de inspeção
PS	plano de segurança
PV	primeira vez
R	risco hidrológico

RP	risco probabilístico
S	índice de severidade
SD	desvio padrão
T	tempo de retorno associado à vazão
TR	tempo de retorno
U	utilidade ou valor do elemento de risco
V	vulnerabilidade aos elementos de risco
VM	volume morto
VU	volume útil
V:H	vertical:horizontal
β	índice de confiabilidade
ψ	parâmetro de estado
%	percentual

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	23
1 PARTICULARIDADES DAS BARRAGENS	35
1.1 Barragens de aterro	40
1.2 Barragens de concreto	40
1.3 Barragens de rejeito.....	41
1.4 Rejeitos arenosos e argilosos.....	42
1.5 Processos de espessamento e filtração	45
1.6 Legislação.....	48
2 ESTATÍSTICAS DE RUPTURAS	50
3 DESCOMISSIONAMENTO E DESCARACTERIZAÇÃO	59
3.1 Estabilidade física	63
3.2 Estabilidade hidrológico-hidráulica.....	64
3.3 Opções para descaracterização.....	68
4 GERENCIAMENTO DE RISCO E FALHA	73
4.1 Análise de risco	84
4.2 Análise de falha	98
4.3 Estudos de <i>Dam Break</i>	100
4.3.1 Galgamento.....	103
4.3.2 Erosão interna e <i>piping</i>	111
4.3.3 Falhas estruturais	117
4.3.3.1 Liquefação e extrusão lateral	120
5 ESTATÍSTICAS DAS FALHAS DE BARRAGENS	134
5.1 Barragens no Brasil	159
5.2 Barragens em Minas Gerais	172
6 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	174
6.1 Árvore de eventos aplicada a inspeções de barragens.....	180
6.2 Análise FMEA aplicada a inspeção de barragens	190
7 APLICAÇÃO DO MÉTODO	198
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	224
8.1 Conclusões sobre o Método Baldi.....	227
8.2 Sugestões para trabalhos futuros	230

REFERÊNCIAS.....	233
------------------	-----

INTRODUÇÃO

O cenário de ruptura de barragem tem sido mais frequente do que o esperado em todo o mundo, sendo, em média, dois eventos por ano, ainda que sejam implantadas novas medidas reguladoras e fiscalizadoras. As principais causas estão relacionadas à dimensionamentos hidrológicos ineficientes, deficiência de investigações geológico-geotécnicas e sistemas de gestão simplificados ou inexistentes, causando perdas de vida humanas, econômicas e, geralmente, devastações ambientais irreversíveis. Nesse sentido, as regulamentações e fiscalizações são parte do processo e, por si só, não constituem garantia de segurança, sendo fundamental a gestão das rotinas na operação e manutenção.

A preocupação mundial com os problemas de gestão direciona os países na elaboração de guias e manuais de boas práticas, que tem sido uma boa referência sobre o assunto. Na literatura disponível, tem-se o Guia de Operação elaborado pela *Mining Association of Canada* - MAC, as Melhores Práticas elaboradas pelo ICMM – *International Council on Mining and Metals*, Requisitos de Segurança do Banco Mundial IFC, boas práticas da *Canadian Dam Association* (CDA), e Critérios de Estabilidade do *Internacional Committee on Large Dams* (ICOLD, 2020).

As barragens proporcionam muitos benefícios para a sociedade como um todo, mas as inundações resultantes das rupturas produzem cenários devastadores, uma vez que a extensão de inundação é grande e coloca a população a jusante em uma zona de risco. De um quantitativo imenso de barragens que falharam ao longo dos anos, há três rupturas que contribuíram significativamente em termos de número de vítimas, sendo Vajont, na Itália (1963) com 2,6 mil vítimas, Johnstown, na Pensilvânia (1889) com 2,2 mil e Machhu II (1974), na Índia, com 2 mil vítimas. Costa (1985) relata que o número médio de mortes em rupturas de barragem é 19 vezes maior quando não há sistema de alerta implantado.

Segundo a *Bureau of Reclamation* (1988), as perdas de vida podem variar entre 0,02% da população em risco, quando o tempo de alerta é de 90 min, para 50% da população em risco quando o tempo é inferior a 15 min. Os fatores que determinam o número de vítimas resultante de uma ruptura, dentre outros fatores, podem ser separados basicamente em:

- Tipo de estrutura e seus alteamentos;
- Causa e tipo de ruptura da barragem, basicamente, modo de falha;

- Número de pessoas em áreas de risco;
- Tempo para alerta da ruptura e evacuação;
- Conformação do vale de jusante;
- Profundidade e velocidade da mancha de inundação, resultante do modo de falha;
- Período do dia e da semana em que a falha pode ocorrer. Em períodos noturnos as pessoas estão dormindo e, em finais de semana, há maior concentração de pessoas nas residências;
- Temperatura do ar e condições pluviométricas;
- Condições físicas das pessoas que habitam o vale de jusante; e
- Plano de evacuação.

Um bom sistema integrado de gestão de riscos geotécnicos deve considerar o envolvimento de pessoas, com equipes de alta *performance*, qualificadas e dedicadas. Em relação aos processos utilizados, precisam conter elementos de gestão de segurança, quando são estabelecidas as rotinas de operação e manutenção e gestão de emergência, definindo quais as diretrizes a serem seguidas para cada nível emergencial identificado nas situações de risco. Ainda, deve basear-se em uma gestão de risco detalhada, geralmente suportada por sistema de informação que auxiliam no controle de dados.

Conscientizar sobre a importância da gestão da segurança de barragens e difundir a necessidade de qualidade para as ações de disposição de rejeitos e acumulação de água é um desafio constante. O entendimento sobre as técnicas a serem aplicadas, bem como o funcionamento das estruturas, deve ser discutido em todas as esferas, entendendo-se que os requisitos mudam com o passar dos anos e em relação à vida útil das estruturas. Alguns dos aspectos mais relevantes para ações de gestão de segurança de barragens são:

- Compromisso da alta administração da empresa;
- Operação estruturada, considerando elementos de curto e longo prazo;
- Elaboração de um projeto adequado;
- Supervisão especializada de construção;
- Construção compatível com os requisitos de projeto;
- Manuais de Operação, com inspeções e avaliações periódicas de segurança;

- Formação e capacitação de equipes, com educação e treinamento;
- Atendimento aos aspectos ambientais;
- Avaliação e gestão permanente de riscos;
- Adoção de um Plano de Ações Emergenciais (PAE ou PAEBM); e
- Adoção de um Plano de Fechamento.

A falta de compromisso da alta administração da empresa, geralmente, é perceptível pela implantação de procedimentos de gestão inadequados. Não existe gestão eficiente sem suporte de recursos físicos e financeiros, sendo que a aplicação de boas práticas somente é alcançada se tiver apoio das categorias do topo administrativo. Para as barragens de rejeito, espera-se que o cenário ainda seja pior, uma vez que os resíduos constituem uma parcela recusada de recursos, que não contempla retorno financeiro direto das ações ligadas à sua disposição. Há uma tendência contínua em reduzir os custos ao mínimo, reduzindo equipes, não realizando pesquisas e não investindo em monitoramento e segurança. Os programas de qualidade total são priorizados para o produto e não para a situação dos reservatórios e estruturas de contenção. Entretanto, no caso de rupturas, os custos de indenizações e reparações, a perda de prestígio junto à sociedade, e a redução do valor de mercado da empresa, são muito maiores do que a economia feita ao se negligenciar as boas técnicas e práticas.

A ausência de planejamento é outro fator frequente, facilmente observada em algumas situações práticas. Geralmente, o projeto de um novo reservatório tem que ser feito às pressas, para acomodar um volume de rejeitos a ser depositado, ou ampliar a geração de energia elétrica e captação de água. Com isso não há tempo hábil para realização de sondagens, amostragens, ensaios de campo e de laboratório, ampliando as variáveis desconhecidas e submetendo o dimensionamento a uma imprevisibilidade arriscada. Para atender demandas meramente produtivas, etapas de análise de dados e estudo de alternativa são negligenciadas, assim como testes piloto de materiais, processo racional de contratação e maturação das análises das variáveis que precisam ser consideradas. O processo de licenciamento é crítico na implantação, quando não são avaliadas todas as condicionantes.

Durante a execução de uma obra e vida útil da estrutura, novas solicitações podem surgir e, sem um planejamento estruturado, não haverá tempo suficiente para a correção. O resultado é uma estrutura deficiente, que exigirá mais manutenção, com uma operação delineada por altos riscos. Um projeto adequado deve atender as melhores práticas da engenharia, aplicadas ao caso particular de cada projeto, com as devidas considerações, ampliações ou reduções de critérios. Devem-se realizar estudos hidrológicos, hidráulicos, geológico-geotécnicos, de sedimentologia, caracterização dos rejeitos, dentre outros. A especificação de boas técnicas construtivas e de um adequado projeto de instrumentação também é essencial para garantir uma excelente *performance* das estruturas. A deficiência no atendimento a esses requisitos tem sido a causa de muitas rupturas de barragens e, mesmo para aquelas que não se rompem, muitas tem custo operacional elevado requerendo mais atenção no tratamento das anomalias.

Em um bom projeto de engenharia as análises de estabilidade devem considerar todos os tipos de ruptura em função dos carregamentos impostos, bem como a verificação das referências propostas. Nesse sentido, os Fatores de Segurança (FS) não devem ser pré-definidos como sendo valores únicos e exatos. Na medida em que avaliar a estabilidade requer estar em conformidade com as incertezas de comportamento de cada material da estrutura, é necessário que sejam estabelecidas faixas de segurança, avaliadas caso a caso.

O método construtivo adotado pode potencializar alguns aspectos sobre os quais as incertezas são ainda maiores. Os critérios de projeto mais usuais originam-se de diretrizes para barragens convencionais de concreto, cujo método construtivo permite grande controle sobre o comportamento mecânico do material do maciço, além de elevada homogeneidade. Quanto maior a homogeneidade, maior a representatividade do monitoramento e, quanto mais controle perde-se em relação a esses dois parâmetros, em função do método construtivo e da variabilidade do material de construção, maior deve ser a faixa de segurança admissível.

O sistema de drenagem interna possui um papel essencial na estabilidade das barragens de solo, pois tem função de aliviar a subpressão, disciplinar o fluxo que é percolado pela estrutura da barragem a um destino seguro, além de evitar o carreamento de materiais finos que podem ocasionar problemas de erosão interna. Os projetos convencionais consideram, geralmente, a concepção de um filtro vertical e do tapete drenante na fundação, com a utilização de materiais como brita e areia.

Especificamente em barragens de rejeito, os tapetes drenantes suspensos sofrem recalques diferenciais no centro do vale, em relação às ombreiras. Sendo assim, quanto mais “encaixado” é o vale, maior é essa condição de subadensamento na região central do vale. Os valores de subadensamento podem chegar a 20 m/ano, no início das atividades de operação. Esse fator é bem relevante se considerado que o fluxo no tapete tende a se concentrar na zona central, devendo ser considerado como um critério de projeto para tapetes assentados sobre materiais propensos a recalques.

Ainda, em relação aos critérios para dimensionamento de drenagem interna, destaca-se a análise das curvas granulométricas de filtros e dos princípios de colmatação. As curvas granulométricas de um determinado material não são homogêneas e sofrem variação considerável, mesmo para materiais teoricamente bem definidos. A prática de realizar ensaios em três amostras de um material macroscopicamente “muito semelhante,” resulta em valores de condutividade hidráulica com diferenças de até cinco vezes, entre as amostras. Dessa forma, considerar essa variação textural in loco tem é um diferencial na execução de projetos. Ainda, há que se considerar a colmatação física e química dos materiais, que conduzem a uma perda local da capacidade de escoamento nos drenos ao longo do tempo. Desta forma, adotam-se fatores de redução nos critérios de desempenho utilizados para o dimensionamento de filtros e drenos, considerando esse fenômeno na situação de estabilidade de uma estrutura.

A liquefação é um fenômeno que vem sendo pesquisado ao longo do tempo em função dos diversos eventos catastróficos que ocorreram no mundo, causando perdas de vidas humanas, enormes prejuízos econômicos e impactos ambientais irreversíveis. No contexto da mineração, a possibilidade de ocorrência da liquefação nos rejeitos granulares, quando saturados, é uma preocupação relevante que deve ser considerada na avaliação da segurança de barragens de rejeitos, principalmente quando associada às rupturas de barragens alteadas para montante ou construídas com a técnica de aterro hidráulico. A liquefação é um fenômeno que ocorre em solos granulares saturados quando submetidos a carregamentos suficientemente rápidos para produzir um grande acréscimo das poropressões com a consequente redução das tensões efetivas e da resistência ao cisalhamento. Pode ser ativada tanto por carregamentos dinâmicos, tais como aqueles provocados por terremotos, quanto por carregamentos estáticos, como, por exemplo, a construção

de um dique de alteamento parcialmente apoiado no reservatório de uma barragem de rejeitos. As análises a serem efetuadas considerando esse fenômeno devem abordar a suscetibilidade à liquefação, o gatilho da liquefação e a estabilidade relativa à ruptura em fluxo por liquefação.

Uma boa prática desses estudos de liquefação compreende a metodologia que utiliza correlações entre valores de resistência à penetração de SPT e/ou CPT corrigidos e razões de resistência ao cisalhamento, obtidas pela retroanálise de casos históricos de ruptura por liquefação, e analisadas conjuntamente a resultados de ensaios triaxiais não drenados.

Nesse sentido, é desejável que os projetos de barragens considerem, inclusive:

- Adequado tratamento de dados de leituras piezométricas, que devem considerar a leitura da pressão no interior do maciço;
- Realização de análises de estabilidade considerando movimentos de massa além do deslizamento, tais como escoamento e expansão lateral, inclusive liquefação;
- Ensaios que considerem o estado real das obras em termos de densidade, permeabilidade, resistências, tensões aplicadas e a química dos fluidos, dentre outros fatores, tanto em termos de amostras deformadas quanto indeformadas;
- Consideração de todos os instrumentos da estrutura na Carta de Risco, e não somente os da seção crítica;
- Estabelecimento da relação entre os níveis de prontidão (atenção, alerta e emergência) e as anomalias observadas na inspeção visual, como por exemplo, deficiências no sistema de drenagem superficial;
- Execução de ensaios para verificação dos parâmetros de resistência dos materiais que constituem a estrutura;
- Análises de estabilidade que considerem a deformação dos materiais e, no caso de fundações rochosas, a anisotropia e os ângulos de foliação;
- Influência da água subterrânea, principalmente na geração de subpressões;
- Forças de origem sísmica e danos induzidos por desmonte e escavações; e
- Influência de concentração de tensões induzidas devido às variações nos níveis dos reservatórios.

Durante a construção de barragens, é primordial que haja supervisão especializada, principalmente na fase de tratamento de fundações e compactação de aterros. Mesmo quando os locais são devidamente investigados, durante as etapas de escavação, podem ser revelados aspectos que não foram devidamente considerados no projeto e, dessa forma, podem ser incorporados. É por esse motivo que se deve exigir a elaboração de projetos “*As built*”, contendo o diagrama de todas as etapas construtivas e desenhando todo o detalhamento da estrutura, pós-construção. Para o caso das estruturas já existentes, é comum a elaboração de projetos “*As Is*”, que compilam as informações do estado atual da estrutura.

As estruturas alteadas no método por montante condicionam fortemente os aspectos de segurança de barragens. À medida que requerem uma fundação bem consolidada, principalmente nos reservatórios de rejeito, é essencial que seja garantida a resistência dessa camada antes da aplicação de sobrecargas. Sem um programa investigativo robusto e, principalmente, sem o acompanhamento das etapas de ocupação do reservatório ao longo dos anos, tem-se um alto risco associado a essa configuração. Aspectos como largura mínima de praia, borda livre mínima, sequenciamento de disposição de resíduos, detalhes de operação da estrutura extravasora, locais de descarga e controle de clarificação são itens primordiais que precisam ser detalhadamente observados e descritos.

A ausência de um Manual de Operação que descreva os requisitos de operação considerados no projeto, no que diz respeito às rotinas de inspeção e tratamento de dados de instrumentação, faz com que a equipe de campo tenha que improvisar, sem o conhecimento adequado das premissas adotadas. Essa condição é de risco até mesmo para equipes capacitadas e treinadas. Em alguns casos, quem opera as barragens não possui qualificação adequada e, é importante que esteja preparado e capacitado para tal. Os modos de falha são, geralmente, iniciados em pequena magnitude e a sua progressão ao longo prazo pode ser significativa.

A dificuldade de obtenção de licenças ambientais nos prazos requeridos pode estar condicionada a aspectos no âmbito do empreendimento ou do relacionamento da empresa com os órgãos licenciadores. Atrasos na obtenção da licença também podem gerar situações de risco, principalmente na manutenção da borda livre dos reservatórios.

Os Planos de Ação Emergencial – PAE são ferramentas de gestão com um teor altamente técnico, que objetiva assegurar padrões para medidas preventivas e

corretivas, principalmente no tratamento de anomalias e dados de instrumentação. Os planos contextualizam todo o histórico construtivo da estrutura, contabilizado o que deve ser feito para prevenção de situações de risco. Além disso, estabelece os procedimentos a serem seguidos em situações de normalidade, atenção, alerta e emergência, estabelecendo as diretrizes para cada setor e profissional que atua no empreendimento. Com base no estudo de ruptura hipotética, define rotas de fuga e planos de evacuação, com o principal objetivo de salvaguardar vidas. O documento também apresenta o que deve ser considerado como estratégia de recuperação e reparação de danos, para o caso de rupturas. Os treinamentos e simulados de emergência são especificados como uma parte essencial do PAE, devendo ser realizados rotineiramente para que seja implantado em sua efetividade.

Para a elaboração de estudos de ruptura hipotética (*Dam Break*), a modelagem da brecha e a quantificação dos percentuais de materiais contidos no reservatório são essenciais para uma mancha de propagação adequada. Deve-se verificar a natureza geotécnica dos materiais do reservatório e maciço, inclusive topografia, considerando todos os modos de falha passíveis de ocorrência. Dessa forma, será possível estimar o tempo, a velocidade, a altura e a abrangência da inundação, obtendo todos os requisitos para um plano de evacuação adequado, inclusive rotas de fuga e pontos de encontro. A elaboração de um PAE não pode ser simplesmente o cumprimento de um protocolo legislativo e precisa ser atualizado constantemente, monitorando todos os pontos que podem ser melhorados. Além disso, é necessário ter um cadastro atualizado da população que vive a jusante, principalmente considerando as particularidades de serem homens, mulheres, crianças, idosos ou deficientes. O bom relacionamento com a comunidade do entorno é essencial na implantação de um PAE (Fernandes, 2017).

Todas as estruturas possuem uma vida útil e, ao final, devem contemplar os requisitos apresentados no Plano de Fechamento. Ao descomissionar a estrutura, paralisam-se as atividades de disposição de resíduos e captação de água, mas o monitoramento deve ser contínuo, assim como a garantia de estabilidade em face da incidência do regime pluviométrico da região, nascentes e drenagens. O Plano ainda pode considerar, por exemplo, a descaracterização da estrutura, que contempla técnicas de escavação ou tamponamento do reservatório, desmonte do maciço e recuperação das áreas degradadas. É essencial que o planejamento do fechamento

seja realizado junto às etapas de projeto, construção e operação do empreendimento.

Quando comparamos as estruturas de armazenamento de rejeitos e de contenção de água, inclusive para geração de energia elétrica, outro fator deve ser avaliado. Estatisticamente, as barragens de rejeito têm sido consideradas menos seguras, com a média de um caso de ruptura de barragens de rejeitos para mil casos de barragens de acumulação de água, sendo que, para as hidrelétricas, a frequência é 10 vezes menor, na proporção de um caso para 10 mil. As estruturas de rejeitos possuem uma metodologia construtiva que comporta alterações e sucessivos alteamentos ao longo dos anos e, em contrapartida, nas estruturas de água, esse prazo construtivo é curto, algo em torno de cinco anos. O longo prazo de construção é um desafio para a gestão de segurança de barragens de rejeito, mas não pode ser uma justificativa para que nada seja feito para ampliar a confiabilidade desse tipo de barragem. A responsabilidade da gestão precisa ser reavaliada no sentido de não ser atrelada somente ao final da hierarquia de produção. A segurança da barragem deve ser o objetivo principal da gestão, que deve ter autonomia para autorizar a realização de investimentos necessários à segurança da estrutura, no curto e longo prazo, com autoridade de parar a produção em casos críticos, mesmo que isso acarrete prejuízos à empresa. Nesse sentido, prover condições necessárias para o depósito dos rejeitos é secundário.

O grande desafio no Brasil tem sido o que fazer com as barragens de rejeitos já construídas fora do padrão e que, ano a ano tornam-se menos estáveis e com graus de risco inaceitáveis. Como fazer para desativar? Onde depositar o rejeito que será retirado do reservatório? Como ampliar o entendimento sobre novos processos e tecnologias? A análise do risco é essencial, assim como a devida gestão desses riscos e dos potenciais modos de falha.

Motivação

As recentes rupturas de barragens tem demonstrado uma fragilidade do sistema regulatório do setor, haja visto que as tecnologias se desenvolvem mas o número de falhas ainda é bem significativo. Com uma bibliografia escassa sobre o tema, a dificuldade em criar diretrizes de projeto e operação destas estruturas amplia a

necessidade de discutir mais sobre o tema. O aprendizado sobre as rupturas históricas precisa ser melhor conhecido e divulgado, e as técnicas de gestão de segurança de barragens devem ser mais específicas para as características e particularidades de cada tipo de estrutura. Nesse sentido, a criação de um método específico para análise de riscos em barragens, considerando os modos de falha mais significativos das lições aprendidas em rupturas anteriores, traz uma maior assertividade para a gestão de segurança, à medida em que prioriza determinadas ações. Esta priorização não é feita somente em um cenário subjetivo e, à medida em que se tem um controle estatístico e probabilístico da ocorrência de cada anomalia ao longo da vida útil da estrutura, é possível reduzir custos e ampliar a assertividade das decisões em todos os níveis hierárquicos.

Objetivos

Este trabalho objetiva criar e divulgar um método específico para análise de risco e falha de barragens, com análises determinísticas, que reduzem a subjetividade do preenchimento das fichas de inspeção de barragens.

Como objetivos específicos, ampliar a bibliografia sobre os modos de falha de rupturas de barragens de armazenamento de água e rejeito, contribuindo para o conhecimento sobre os gatilhos de ruptura, sua ocorrência e consequências. Ainda, objetiva ser um modelo de gestão a ser implantado nas empresas, além de ampliar a precisão das análises realizadas por profissionais das áreas, no sentido de criar uma gestão robusta de segurança de barragens e reduzir o número de falhas, principalmente as catastróficas.

Estrutura da Tese

O presente capítulo apresentou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, um breve resumo dos trabalhos que foram realizados ao longo dos anos e uma breve descrição do conteúdo deste trabalho.

No Capítulo 2 são apresentadas algumas considerações sobre as particularidades de barragens, tanto de rejeitos como de água, contemplando a

diferenciação entre os materiais construtivos, tipos de rejeitos, processos de espessamento e filtragem. Ainda, considerações sobre a legislação vigente, principalmente em relação ao sistema de classificação de barragens.

No Capítulo 3 faz-se uma análise das estatísticas de rupturas ao longo dos anos, baseando-se em diversos estudos nacionais e internacionais, e mapeando os principais fatores que afetam a estabilidade de barragens.

No Capítulo 4 são descritos os macro processos para descaracterização e descomissionamento de barragens, considerando estabilidade física, hidrológico-hidráulica e alguns exemplos de casos já realizados.

O Capítulo 5 apresenta uma descrição das características dos modelos de estudo de risco e falha, considerando as análises qualitativas e quantitativas disponíveis na literatura. Há referências sobre a aplicação destes métodos para cálculo do fator de segurança em barragens, bem como o levantamento dos modos de falha característicos destas estruturas. Neste tópico, são descritas as etapas e as metodologias de análise de risco, bem como para as análises de falha. Ainda, há um subitem referente a estudos de *Dam Break*, fundamental para o entendimento da propagação de onda no vale de jusante proveniente de um estudo de falha em seu último nível, que é a ruptura. O galgamento, erosão interna e *piping* e as falhas estruturais são particularizadas como modos de falha a serem considerados nos estudos, tendo sido inserido um item especial referente ao fenômeno da liquefação.

No Capítulo 6, o levantamento de rupturas realizado no capítulo três foi ampliado, haja visto que a bibliografia do tema é restrita e controversa. Foi realizando um estudo independente para 159 rupturas de barragens de água e rejeito, sendo que 40 mais aprofundadas, evidenciando que os modos de falha previstos para o Método Baldi foram devidamente mapeados. Ainda, apresenta-se um levantamento do número de barragens no Brasil, contemplando os dados compilados das agências reguladoras, com atenção especial para o caso de Minas Gerais que possui legislação própria e um universo elevado em número de barragens.

No Capítulo 7 é apresentado o Método Baldi, que considera a aplicação da árvore de eventos como análise de risco de uma barragem, tendo como base a ficha de inspeção de campo. Com a aplicação do Método, é possível levar as anomalias inaceitáveis para a análise de falha, do tipo FMEA, priorizando em um plano de ação aquelas que indicam um maior potencial de Risco Intolerável.

No Capítulo 8 apresenta-se a aplicação do Método Baldi em casos reais para três barragens: uma em solo para acumulação de água, uma em concreto para geração de energia e uma terceira em solo para acumulação de rejeitos. Para os três casos, são elaboradas as análises de risco e falha, apresentando ao final a priorização do plano de ação para as anomalias mais críticas.

Finalmente, no Capítulo 9, são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

1 PARTICULARIDADES DAS BARRAGENS

As questões relacionadas a projeto, construção, operação e manutenção de barragens são bem específicas e dependem de variáveis que devem ser exaustivamente analisadas e avaliadas ao longo da vida útil da estrutura.

De uma forma geral, a princípio, a escolha do local onde haverá a implantação da estrutura é de fundamental importância. Os rejeitos, por exemplo, são geralmente transportados em pasta, com grande percentual de água, e por meio de tubulações, para que possa se economicamente viável o caminhamento em longas distâncias a partir da planta. Tal situação oferece múltiplas possibilidades para escolha do local que, basicamente, deve possuir tamanho adequado para receber os rejeitos por um determinado tempo. As taxas de alteamento do barramento devem ser compatíveis com os volumes de rejeito produzidos, que são uma parcela da produtividade mineral de cada empreendimento.

O programa de investigação geológico-geotécnica é um conjunto de procedimentos de campo e laboratório que permitem identificar as características dos materiais que serão utilizados e estarão disponíveis para determinado projeto, tanto em barragens de rejeito como de acumulação e água. Geralmente, feita por amostragem, deve ser bem especificada, para que sejam minimizadas as variáveis decorrentes da imensa diversidade dos tipos de solos e rochas, bem como das solicitações impostas. Por meio dos mapeamentos, das sondagens e dos ensaios de campo e de laboratório, é possível caracterizar os materiais em termos de composição e resistência, dentre outros fatores, obtendo parâmetros que permitem avaliar o comportamento a curto e longo prazo, e subsidiar os estudos na fase de elaboração de projetos.

Já na etapa da elaboração dos projetos, são feitas diversas simulações para obtenção de um *design* que objetive o maior aproveitamento dos recursos disponíveis, ao mesmo tempo que garanta a estabilidade da estrutura. Em todos os tipos de projeto, sejam eles conceituais, básicos e executivos, deve-se atentar para os critérios de estabilidade da estrutura, conforme o nível de estudos que deve ser elaborado. As simulações hidrológicas avaliam a influência das precipitações na área de projeto, assim como dos lençóis freáticos e das bacias de contribuição. Já as avaliações geológicas permitem o mapeamento da fundação e previsão dos tipos de tratamento que serão necessários para um melhor desempenho dos materiais,

assim como a caracterização das potenciais jazidas de empréstimo. Complementar a essas atividades, têm-se os estudos geotécnicos, onde são estabelecidas as relações de todas as variáveis, no sentido de ter uma estrutura tecnicamente exequível, dentre os parâmetros de estabilidade necessários e as necessidades do projeto. Em paralelo, são avaliadas as necessidades de escavações, reforços estruturais, dispositivos de vertimento, drenagens internas e superficiais, instrumentação, dentre diversos outros fatores, dependentes da experiência, competência e comprometimento da projetista. É também na fase de projeto que são especificadas as diretrizes para construção e operação da estrutura.

No caso das barragens de mineração, no geral, os rejeitos em polpa são transportados por uma tubulação ou, às vezes, em uma calha aberta, onde o fluxo pode ser causado apenas pela gravidade, exigindo que o local do descarte possa estar economicamente a alguma distância da planta de processamento. Essa metodologia oferece uma escolha bastante ampla para o local de disposição dos rejeitos, bem como do traçado do sistema. O local selecionado deve ter tamanho adequado para que os rejeitos possam ser depositados durante toda a vida do represamento, com taxas seguras de subida do aterro e com um volume final para satisfazer o volume previsto de extração mineral. Há ainda sistemas de separação sólido-líquido, que constituem etapas de espessamento e filtragem do material, tornando o rejeito um material mais espesso antes mesmo da disposição.

O sistema de drenagem interna é uma estrutura crítica e, muitas vezes, é negligenciada, resultando em superfícies freáticas elevadas no interior do maciço da barragem de rejeitos durante a operação. As ombreiras são extremamente sensíveis à variação dos níveis freáticos e, uma ascensão capilar acima da freática pode fazer com que os rejeitos nessa zona fiquem bem perto da saturação total. Essa condição pode produzir elevações inesperadas da freática, mesmo com pequenas taxas pluviométricas.

A especificação adequada dos pontos de disposição dos rejeitos ao longo dos anos garantirá que o sistema seja mais estável em relação a falhas e desgastes, reduzindo os custos com manutenções e fazendo com que a água sobrenadante seja armazenada com segurança, garantindo uma borda livre segura. Essa condição é ainda mais importante durante os primeiros anos de operação, quando o material está sendo depositado na base do reservatório, que será a fundação dos depósitos subsequentes, para o caso de alteamentos por montante. Para as construções do

tipo baias, os rejeitos devem sempre ser lançados nos pontos mais externos, distante do barramento, para que a água liberada seja direcionada para o centro e os alteamentos das paredes sejam mais seguros, mesmo no caso de se utilizar hidrociclones. Para os depósitos convencionais, a disposição deve considerar um comprimento de praia mínimo, ou seja, as porções de rejeito menos saturadas devem ser garantidas mais próximas ao barramento e os materiais mais finos e mais saturados, ao fundo do reservatório.

O controle efetivo e o monitoramento do processo de construção em conformidade com as especificações de projeto, principalmente do dique de partida, permitem um maior controle da estabilidade em longo prazo dessas estruturas, em relação à estanqueidade do reservatório, drenagem adequada do filtro e controle da instrumentação.

As barragens de rejeito, geralmente, têm uma vida útil significativa, em torno de 20 a 30 anos, mas o gerenciamento inadequado das condições de operação e manutenção pode reduzir esses valores drasticamente. Os procedimentos devem ser periodicamente revistos e adaptados às mudanças que ocorrem diariamente na estrutura. O gerenciamento de segurança de barragens é um processo que deve englobar um bom sistema de gestão de riscos, objetivando a redução de falhas e orientação para a tomada de decisões. A garantia de estabilidade das barragens é diretamente relacionada ao tipo de monitoramento que se utiliza, principalmente em relação à importância que é dada às inspeções visuais e aos dados de instrumentação.

Robertson (2011) demonstra que a quantidade de rejeitos tem aumentado significativamente, em uma proporção de 10 vezes a cada 30 anos, o que significa que cada vez mais tem-se a necessidade de estruturas maiores, em um curto espaço de tempo. Em 1900 a capacidade diária de rejeitos era em torno de 100 toneladas por dia, tendo sido ampliada para mil em 1930, 10 mil em 1960, 100 mil em 2000 e, atualmente, com valores da ordem de 670 mil toneladas por dia. A estimativa é que, até 2030, seja da ordem de milhões de toneladas ao dia. Esse mesmo estudo aponta que a altura média das barragens dobra a cada 30 anos. Em 1900, era cerca de 30 m, sendo ampliada para 60 m em 1930, 120 m em 1960 e 240 em meados dos anos 2000.

Índices de Fatores de Segurança adequados podem estar relacionados a um aumento de custo para manutenção da estrutura, portanto, um equilíbrio deve ser

alcançado entre custo e segurança. A redução de riscos com uma boa relação custo x benefício envolve a definição dos níveis de risco aceitáveis, reduzindo os potenciais de falha e implantando procedimentos de gerenciamento satisfatórios. Como exemplo, abordagens para redução de riscos podem incluir melhorias estruturais na barragem, ampliação do sistema de monitoramento e manutenção, preparação de mapas de inundação e elaboração de procedimentos específicos de situações de emergência para operação de cada estrutura.

Nas barragens de água, o volume aprisionado no reservatório e, até mesmo o decorrente de uma inundação, possui uma parcela de escoamento e drenagem superior aos rejeitos que, quando liquefeitos, fluem pelo vale de jusante e deixam rastros difíceis de serem reparados. O peso próprio da mistura água + rejeito é bem elevado e, em velocidade, possui poder devastador considerável.

As empresas projetistas e os consultores devem buscar o aperfeiçoamento constante de sua equipe, uma vez que é fundamental que haja conhecimento técnico aprofundado ao se estabelecer critérios de dimensionamento de qualquer tipologia de barragem. Ter a atuação de profissionais com alto grau de especialização afeta diretamente na qualidade do produto desenvolvido, principalmente no que diz respeito à senioridade para estabelecer comparativos em projetos similares com materiais semelhantes.

A construção de barragens nem sempre consegue ser fiel ao especificado em projeto pelo fato de que há muitas variáveis associadas que requerem um acompanhamento de campo efetivo durante as etapas construtivas. Por se tratar de obras extensas, com um grande volume de materiais associados, torna-se impossível caracterizar esses materiais em sua plenitude na fase de elaboração dos estudos e projetos. Soma-se a esse fato que alguns projetos aguardam meses para serem executados, e as variáveis construtivas mudam com o passar do tempo. Por exemplo, ao realizar uma escavação obrigatória, pode-se deparar com um material geológico diferente do que foi amostrado e investigado, ou então, ao coletar os materiais especificados, percebe-se que os volumes disponíveis precisam ser revistos. Ainda, topograficamente, pode-se verificar em campo um eixo mais atrativo em função de uma nova disponibilidade de área, sendo até mesmo necessário revisar os estudos em função de uma nova necessidade de volumes e áreas.

Por esse motivo é importante que aconteça o Acompanhamento Técnico de Obra – ATO, por parte da empresa projetista, para que sejam avaliadas e emitidas

as revisões de projeto necessárias para o bom andamento da construção, sem afetar a estabilidade da barragem. Esse acompanhamento deve ser feito por profissionais qualificados e integrantes de uma equipe multidisciplinar, que possuam pleno conhecimento dos estudos que foram realizados para a emissão dos projetos, podendo assim, atuar nas demandas específicas de cada etapa da implantação. Durante o acompanhamento de campo, são emitidos desenhos e especificações complementares que, ao final da obra, comporão a documentação de “*As built*” da estrutura. Garantir que um projeto está sendo executado conforme os requisitos estabelecidos nas avaliações e estudos técnicos prévios é fundamental para que a estrutura atinja os potenciais máximos de operação e segurança.

Os procedimentos de operação devem ser reavaliados periodicamente, na medida em que são obtidos dados dos instrumentos instalados na estrutura e que há alterações nos tipos de materiais lançados no reservatório, nos pontos de captação, na geometria dos barramentos, dentre outros. A avaliação das leituras de medidores de nível d’água, piezômetros e medidores de recalque permitem identificar potenciais problemas em decorrência da operação, direcionando a intervenção antes que a anomalia se agrave. Nesse sentido, também devem ser previstas inspeções visuais periódicas de segurança para coleta de dados e previsão das manutenções periódicas. Na operação de uma estrutura é necessário que haja um grande comprometimento do empreendedor, no sentido de estar atento às alterações das solicitações de campo no decorrer do tempo, e atuar na redução dos potenciais gatilhos de instabilidade.

No caso das barragens de água, os principais períodos de observação são a construção da barragem (principalmente, em relação às condições *in situ*), o primeiro enchimento e o período de resposta do barramento ao enchimento inicial. A manutenção e os reparos se tornam mais importantes na medida em que as estruturas expostas, tais como vertedouros, envelhecem e se desgastam. Já nas barragens de rejeito, além do período construtivo da barragem e das condições *in situ*, é importante monitorar as características dos rejeitos que são produzidos na planta de beneficiamento, bem como a estrutura como um todo durante toda sua vida útil. O armazenamento de rejeitos deve considerar o mínimo de água aprisionada e, para isso, deve-se prever o bombeamento da água liberada à medida que o rejeito adensa. A água aprisionada entre os vazios do rejeito também deve ser considerada (água adsorvida) e, nesse caso, podem ser previstas camadas de

drenagem durante a construção ou drenos profundos. Há diversos artigos e trabalhos publicados que mencionam o efeito químico da água na densidade dos rejeitos durante a sedimentação, além dos efeitos dos coloides na água. Vaughan (1999) verificou que a aplicação de vibrações de áudio durante a sedimentação pode aumentar a densidade dos depósitos.

Por fim, e não menos importante, têm-se as questões associadas à fiscalização dos empreendimentos, que passa, basicamente, por critérios associados à elaboração do Plano de Ações Emergenciais (PAE ou PAEBM, sendo este último específico para barragens de mineração) e do Plano de Segurança de Barragens (PSB). A depender do porte da estrutura, dos materiais comportados e do dano potencial associado, assim como outros itens dos sistemas de classificação, tem-se uma severidade maior ou menor nas ponderações a serem feitas nesse tipo de documentação.

1.1 Barragens de aterro

A denominação de barragens de aterro é comumente utilizada para estruturas que possuem a finalidade de contenção de água. Ainda que as barragens de rejeito também possam ser construídas de aterro, há uma sutil separação técnica entre os termos, uma vez que as barragens de aterro possuem uma finalidade lucrativa ao passo de que as barragens de rejeito, na maioria das vezes, são para armazenamento de rejeitos não aproveitados. A literatura clássica também define que as barragens de aterro são geralmente construídas em etapa única. Para questões relacionadas a sazonalidade do maciço, drenagens, vertedouros e estruturas acessórias, valem as mesmas considerações feitas para as barragens de rejeito.

1.2 Barragens de concreto

As barragens de concreto geralmente são destinadas à acumulação de água e podem ser subdivididas em diferentes categorias, sendo as mais amplamente citadas como do tipo gravidade, contrafortes e em arco. Para as barragens de gravidade, a condição de projeto é de que o peso próprio da estrutura deve ser tal para que resista ao momento atuante, no caso, a força da água que atua

hidrostaticamente em sua face de montante. Para as barragens em contrafortes, a subpressão é aliviada para a menor base da estrutura, fazendo com que a força hidrostática sobre o paramento de montante seja perfeitamente equilibrada. Em contrapartida, os esforços de compressão aumentam sobre os contrafortes. Já as barragens em arco, curvam-se na direção do fluxo de água, fazendo com que as pressões atuantes sejam transferidas para as ombreiras.

1.3 Barragens de rejeito

As barragens de rejeito são estruturas construídas com o objetivo de armazenar resíduos provenientes do beneficiamento do minério. Geralmente, são estruturas que utilizam solo compactado para construção do maciço ou, até mesmo, porções de rejeito, podendo apresentar núcleos mais argilosos, filtros e tapetes drenantes em areia, espaldares em enrocamento, revestimento de concreto ou geomembranas, e diversas outras tipologias. A altura, a inclinação e o comprimento são definidos no projeto geotécnico, que também verifica o posicionamento ideal para vertedouro, pontos de disposição de resíduos e estruturas de captação de água. Os sistemas de drenagem superficial geralmente contemplam canaletas, escadas e descida d'água, direcionando todo o fluxo para áreas fora da influência da barragem. A vida útil da barragem também pode ser planejada para que contemple alteamentos na estrutura, ampliando a capacidade de reserva de rejeitos na medida em que haja maior produtividade na planta.

No caso das barragens construídas com o material proveniente da usina de beneficiamento, é importante que a água seja devidamente removida, o que pode acontecer por um processo de ciclonagem onde somente as partículas mais grossas são utilizadas para o barramento. O fato de o material granular ter maior permeabilidade faz com que a drenagem seja adequada e, os finos, que ainda possuem água aprisionada nos poros e são geotecnicamente mais instáveis, estejam em pontos mais distantes do maciço.

No caso das barragens construídas e alteadas pelo método por montante, utilizando o rejeito como material construtivo, as partículas mais grossas devem estar próximas da crista, com a redução do tamanho das partículas ocorrendo na medida em que há o avanço da praia, levemente inclinada, para porções mais extremas do reservatório. Essa é também a condição ideal a ser observada no

lançamento de rejeitos no interior do reservatório. Em ambos os casos, a ideia é que a água seja visível somente na lagoa, distante do barramento, para que a superfície freática seja a menor possível no maciço.

As variações de tamanho de partículas de rejeito durante o adensamento fazem com que o reservatório apresente comportamento anisotrópico em relação à permeabilidade. Ou seja, as linhas equipotenciais não serão totalmente verticalizadas, o que pode resultar em estimativas imprecisas da posição da freática medida por meio de piezômetros. O valor da permeabilidade varia consideravelmente com o adensamento, grau de saturação e, particularmente, com as tensões efetivas. Além disso, camadas de baixa permeabilidade podem produzir superfícies de fluxo bem diferentes do convencionalmente avaliado, sendo essencial para a estabilidade da barragem que a superfície freática seja o mais afastado possível do barramento.

É importante ressaltar que cada barragem possui sua peculiaridade e é essencial uma boa base de investigação geotécnica para definição dos requisitos de fundação e dos materiais constituintes da estrutura. Nesse sentido, cada barragem possui um projeto único, com variáveis representativas de especificidade do local e propósito de armazenamento, que devem garantir a estabilidade da estrutura em curto e longo prazo.

1.4 Rejeitos arenosos e argilosos

No caso específico dos rejeitos, geralmente, a divisão é realizada por areias não coesivas e lamas coesivas, conforme Figura 1. Os materiais são, geralmente, distintos em cor, sendo as areias de coloração mais cinza e a lama com coloração vermelha. As areias possuem um percentual elevado de silte e, as lamas, praticamente partículas argilosas, mas essa configuração varia a depender do tipo de depósito, processo de beneficiamento e características particulares de cada região. Ressalta-se que as lamas podem apresentar proporções de materiais convencionais de argila, ilita e caulinita, sendo esses últimos argilominerais que influenciam significativamente no comportamento geotécnico do material. Para os casos dos resíduos de minério de ferro, por exemplo, a lama possui alta densidade dos grãos, com baixa plasticidade e permeabilidade.

Enquanto os dois materiais na forma indeformada são facilmente de serem distintos com base nas propriedades medidas em laboratório, eles encontram-se, geralmente, misturados nos depósitos de rejeitos, sendo difícil particularizá-los sem uma boa técnica de caracterização. Uma das propriedades mais interessantes para o estudo do comportamento geotécnico dos materiais dispostos em reservatórios de rejeitos é a deformabilidade. A lama é mais mole e mais compressível (Figura 2), o que pode ser um fator central para o desencadeamento da liquefação nas areias.

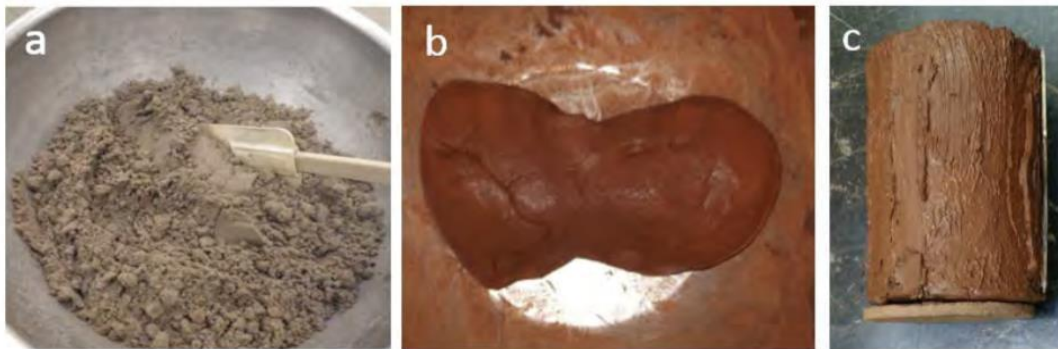
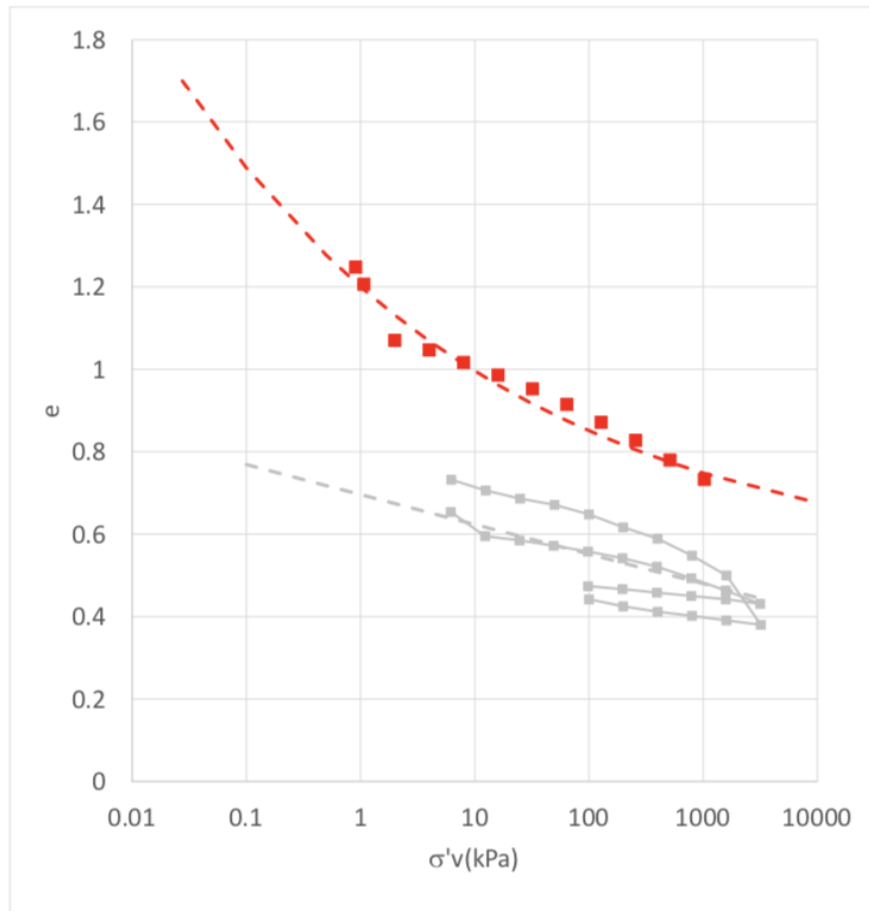


Figura 1 - Processo idealizado deposição de rejeitos arenosos e lama. (a) areia; (b) lama remoldada e (c) corpo de prova de lama intacta. Fonte: Morgenstern *et al.* (2016)

O processo de deposição dos rejeitos determina como areias e lama são distribuídas em área e profundidade. A Figura 3 ilustra esse processo de forma idealizada quando as areias são lançadas em uma praia acima da superfície da água, contendo água represada com lama em suspensão. O espigotamento deposita exclusivamente rejeitos arenosos na praia, enquanto predominantemente, a lama sedimenta-se em água represada a uma maior distância. Entre essas duas áreas existe uma zona intermediária onde as areias e a lama se misturam, principalmente quando as areias estão sendo lançadas. Quando o lançamento da areia é temporariamente suspenso ou transferido para outros locais, camadas depositadas de lama acabam se intercalando com os materiais contidos nessa zona de materiais misturados.



**Figura 2 - Curvas típicas de adensamento para areias (cinza) e lamas (vermelha).
Fonte: Morgenstern *et al.* (2016)**



**Figura 3 - Processo idealizado da deposição de rejeitos Fonte: Adaptado de
Morgenstern *et al.* (2016)**

O processo de disposição real é dinâmico e em constante mutação. A localização da interface entre a praia e a água represada depende tanto da profundidade de água, que varia de acordo com as vazões de precipitação e de água escoada, como da quantidade de rejeitos atingindo naquele local a partir da tubulação de lançamento de descarga de areia, que é regularmente reposicionada. Assim, as dimensões das três zonas estão sempre mudando e, pelas mesmas razões, elas mudam em profundidade à medida que o material depositado aumenta. A água represada com lama em suspensão pode ser facilmente identificada por sua cor vermelha. A condição de livre drenagem dos rejeitos arenosos, quando utilizados para construção de maciços não pode ser prejudicada pela deposição de lamas de baixa permeabilidade, o que é garantido com a segregação física e lançamento separado dos rejeitos arenosos e lama na porção mais a montante do reservatório.

O controle da taxa de alteamento é fundamental para a estabilidade do processo, principalmente no caso de maciços sendo construídos por rejeitos ciclados e alteados por montante. As taxas ideais são dependentes de diversas características, principalmente de adensamento, mas devem estar dentro de uma faixa teórica de 0,4 a 1,0 m ao mês, por exemplo.

1.5 Processos de espessamento e filtração

A separação sólido/líquido na mineração é uma etapa bem importante durante a separação de minerais, sendo um processo crítico que pode onerar o custo de disposição de resíduos e reduzir os lucros com venda mineral. De um modo geral, apenas com essa etapa, há um consumo energético que varia de 15% a 40% do total gasto em todas as etapas do beneficiamento. Esse processo tem por objetivo recuperar, preparar e desaguar, quando necessário, polpas, concentrados e rejeitos diversos e que sejam constantes na matéria principal que está em processo de preparo para que seja dada a continuidade ao procedimento em questão. Existem muitas formas de se promover uma separação sólido-líquido eficiente, e o melhor processo para cada caso depende das propriedades do rejeito.

As operações unitárias de separação sólido-líquido predominantes nas usinas de beneficiamento de minérios são o peneiramento, a ciclonação, a centrifugação, o espessamento, a filtração, a evaporação e a secagem. A aplicação industrial de uma ou outra operação dependerá principalmente das características do minério e

de avaliações técnicas e econômicas do processo como um todo. Centrifugação, evaporação e secagem, muito empregadas no beneficiamento do caulim, por exemplo, não são aplicadas no minério de ferro.

Os espessadores são tanques que agrupam sedimentações ao longo do processo de separação sólido líquido, que é o processo de espessamento. A principal aplicação é quando se deseja recuperar água proveniente das polpas e podem ser utilizados diferentes tipos de espessadores no processo. Comumente, utiliza-se o espessamento como etapa preliminar de processos de flotação e moagem, sendo o grau de eficiência do espessamento medido em termos de viscosidade, densidade, temperatura e forma das partículas. As finalidades do espessamento são:

- Obter polpas mais adequadas e melhor concentradas às etapas subsequentes;
- Possibilitar um descarte mais eficiente de rejeitos;
- Recuperar sólidos que são utilizados em etapas e processos hidrometalúrgicos; e
- Reutilizar a água gasta em processos industriais internos.

No Brasil, os rejeitos de beneficiamento mineral são normalmente dispostos em forma de polpa em estruturas de contenção denominadas barragens. Em outros países, existe uma grande tendência para o adensamento dos rejeitos previamente à deposição. A disposição de rejeitos na forma de polpa de alta densidade, pastas minerais ou tortas apresenta vantagens consideráveis e representa uma alternativa às práticas convencionais.

A pasta mineral representa um estágio intermediário entre uma polpa de alta densidade e tortas, apresentando-se como um fluido homogêneo, no qual não ocorre segregação granulométrica das partículas e não apresenta drenagem significativa de água. Para a formação de pasta, é necessária uma proporção significativa de partículas finas (geralmente, mínimo de 20% das partículas menores que 20 μ m). Uma torta é o resultado da operação de filtração da polpa, sendo composta principalmente de partículas sólidas, sem a presença de água livre.

As plantas de filtração consideram técnicas e métodos para geração de rejeitos com baixo teor de umidade, possibilitando a disposição em pilhas. Os filtros,

geralmente possuem elementos filtrantes cerâmicos que utilizam como força de filtração a diferença de pressão entre a atmosfera e o vácuo no interior das placas cerâmicas, onde essas possuem pequenos canais que permitem somente a passagem da água deixando em sua superfície a massa de rejeito aderida. A filtração cerâmica consome cerca de 90% menos energia em relação à filtração convencional a vácuo, o que depende do modelo específico de cada fabricante dos equipamentos.

No sistema convencional de disposição de rejeitos em polpa, o transporte até a barragem é realizado por gravidade ou através de bombeamento (bombas centrífugas). Sendo assim, é esperado que as frações mais grossas de sólidos sejam sedimentadas próximo ao ponto de lançamento e, a lama, direcionada para o fundo do reservatório. Dessa forma, a superfície não se solidifica totalmente, mesmo após vários anos.

No sistema de disposição de rejeitos espessados é feita uma preparação da polpa que a faz se comportar como homogênea. O transporte até a área de disposição é realizado por bombas de deslocamento positivo e não ocorre a segregação das partículas, sendo que a água atinge a superfície por capilaridade e evapora. A superfície torna-se firme, compactada e pronta para ser recuperada.

Na disposição de rejeitos após filtração, na forma de tortas, é necessário o uso de caminhões ou transportadores de correia para o seu transporte e empilhamento.

A demanda por sistemas eficientes de separação sólido-líquido nas operações de processamento mineral de rejeitos tem crescido nos últimos anos e a busca por sistemas de filtração que permitam atingir baixo teor de umidade na torta, elevada produtividade e baixo consumo energético é cada vez maior na indústria mineral.

De um modo geral, processos de disposição com espessamento e secagem requerem que o material seja espessado até a máxima densidade bombeável, uma vez que quanto maior a declividade, maior a drenagem e maior a evaporação. Já nos processos de filtração, filtros do tipo tambor costumam ser eficientes para materiais com 50-60% de sólidos e filtros prensa para até 80% de sólidos, o que deve ser anteriormente avaliado em um teste piloto com o fabricante antes da especificação.

O controle da taxa de alteamento é fundamental para a estabilidade do processo, principalmente no caso de maciços sendo construídos por rejeito ciclados e alteados por montante. As taxas ideais são dependentes de diversas características, principalmente de adensamento, mas devem estar dentro de uma faixa teórica de 0,4 a 1,0 m ao mês, por exemplo.

1.6 Legislação

O sistema legislativo referente à Segurança de Barragens é constituído pelas leis elaboradas pelo Congresso Nacional e sancionadas pela Presidência da República.

As leis nacionais são uma referência para os órgãos fiscalizadores, como no caso da Agência Nacional de Mineração - ANM (extinto DNPM) e Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, no que diz respeito a normatização do gerenciamento de disposição de rejeitos e acumulação de água, sendo que a FEAM abrange somente o estado de Minas Gerais. As Deliberações Normativas do COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental são regionais, sendo aplicáveis a FEAM na regulação da disposição de rejeitos. Já as Resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH são nacionais, aplicáveis em conformidade com as Leis Nacionais para água e rejeitos. As portarias do extinto DNPM e Resoluções ANM são nacionais e referem-se a rejeitos, sendo que para o gerenciamento das barragens de acumulação de água, tem-se as Deliberações Normativas da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e Agência Nacional de Águas - ANA, também em âmbito Nacional. A Tabela 1 apresenta um descritivo da legislação vigente aplicada a barragens, de todas as tipologias.

Tabela 1 - Legislação aplicada a barragens. Fonte: Elaborado pela autora

LEGISLAÇÃO	APLICAÇÃO	PRINCIPAL PONTO	
LEI Nº 9.433, 8 DE JAN 1997	Nacional	Rejeitos e Água	Criação do CNRH
LEI Nº 9.984, 17 DE JUL 2000	Nacional	Rejeitos e Água	Criação da ANA
PORTARIA DNPM Nº 237, 18 OUT 2001	Nacional	Rejeitos	Publica as NRM's
DN COPAM Nº 62, 17 DEZ 2002	Estadual	Rejeitos e Água	Crítérios para classificação de barragens e Auditorias
RESOLUÇÃO CNRH Nº 37, 26 MAR 2004	Nacional	Água	Outorga de Recursos Hídricos
DN COPAM Nº 87, 17 JUN 2005	Estadual	Rejeitos e Água	Crítérios classificação de barragens e Auditorias
DN COPAM Nº 124, 9 OUT 2008	Estadual	Rejeitos e Água	Revisão dos critérios de Auditoria
LEI Nº 12.334, 20 SET 2010	Nacional	Rejeitos e Água	Estabelecimento da PNSB - PSB e PAE
RESOLUÇÃO ANA Nº 91, 02 ABR 2012	Nacional	Água	Itens a serem considerados no PSB e revisão periódica
RESOLUÇÃO CNRH Nº 143, 10 JUL 2012	Nacional	Rejeitos e Água	Crítérios gerais de classificação de barragens - CRI e DPA
RESOLUÇÃO CNRH Nº 144, 10 JUL 2012	Nacional	Rejeitos e Água	Diretrizes mínimas para elaboração do PSB
PORTARIA DNPM Nº 416, 3 SET 2012	Nacional	Rejeitos	Cadastro de barragens e Inspeções
PORTARIA DNPM Nº 526,9 DEZ DE 2013	Nacional	Rejeitos	Itens a serem considerados no PSB e revisão periódica
RESOLUÇÃO ANEEL Nº 696, 15 DEZ2015	Nacional	Água	Itens a serem considerados no PSB e revisão periódica
RESOLUÇÃO ANA Nº 132, 22 DE FEV 2016	Nacional	Água	Complementa os critérios de classificação da Resolução 91
DECRETO Nº 46.993, 2 DE MAIO DE 2016	Estadual	Rejeitos	Auditoria extraordinária para barragens de Montante
RESOLUÇÃO CNRH Nº 178, 29 JUN 2016	Nacional	Rejeitos e Água	Altera a 144 - Diretrizes mínimas para elaboração do PSB
RESOLUÇÃO ANA Nº 236, 30 JAN 2017	Nacional	Água	Tópicos para elaboração do PSB e do PAE
PORTARIA DNPM Nº 70.389, 17 MAI 2017	Nacional	Rejeitos	Revoga os textos da 416 e 526 e complementa o sistema de fiscalização
MP Nº 789, 25 JUL2017	Nacional	Rejeitos	Altera Compensação Financeira - CFEM
MP Nº 790, 25 JUL2017	Nacional	Rejeitos	Altera o Código de Mineração
MP Nº 791, 25 JUL2017	Nacional	Rejeitos	Criação da ANM
DN COPAM Nº 228, 28 NOV 2018	Estadual	Rejeitos	Altera diretrizes sobre licenciamento
RESOLUÇÃO Nº 1, 28 JAN2019	Nacional	Rejeitos e Água	Recomenda ações de resposta à ruptura de Brumadinho
RESOLUÇÃO ANM Nº 4, 15 FEV 2019	Nacional	Rejeitos	Diretrizes para barragens alteadas por montante - Proibição
LEI Nº 23.291, 25 FEV 2019	Estadual	Rejeitos e Água	Política Estadual de Segurança de Barragens + Licenciamento
PORTARIA IGAM Nº 02, 26 FEV 2019	Estadual	Água	Política de Segurança de Barragens , com Inspeções, PAE e PSB
PORTARIA IGAM Nº 03, 26 FEV 2019	Estadual	Água	Cadastro das barragens no sistema próprio
RES. SEMAD/FEAM Nº 2.784, 21 MAR 2019	Estadual	Rejeitos	Descaracterização das barragens de montante
RES. SEMAD/FEAM Nº 2.789, 29 MAR 2019	Estadual	Rejeitos	Alterando a anterior
RES. SEMAD/FEAM Nº 2.810, 24 MAI 2019	Estadual	Rejeitos	Alterando a anterior
RESOLUÇÃO ANM Nº 13, 8 AGO 2019	Nacional	Rejeitos	Crítérios de descomissionamento e descaracterização
RESOLUÇÃO ANM Nº 32, 11 MAI 2020	Nacional	Rejeitos	Altera a Portaria 70.389, complementando o que já estava na Res.13
RESOLUÇÃO ANM Nº 40, 06 JUL 2020	Nacional	Rejeitos	Altera artigo 7 e define prazos para monitoramento e vídeo
LEI Nº 14.066, 30 SET 2020	Nacional	Rejeitos e Água	Altera a Lei nº 12.334 - PNSB

2 ESTATÍSTICAS DE RUPTURAS

As rupturas de barragens liberam um quantitativo de água e resíduos que podem atingir grandes extensões de áreas, alcançando a população e o meio ambiente a jusante. Tida como um cenário, em geral, catastrófico, requer que medidas de controle sejam integradas ao gerenciamento de risco e emergência, principalmente na identificação dos possíveis modos de ruptura, suas consequências e medidas para que sejam controlados e mitigados.

Em 1964, o *International Commission on Large Dams* – ICOLD aprovou uma proposta de "Estudo de falhas e incidentes decorrentes de fundações rochosas em barragens", que teve o título modificado entre 1965-1966 para "Incidentes em grandes barragens", incluindo incidentes ocorridos durante a construção e grandes reparos. Na Reunião Executiva da *United States Committee on Large Dams* - USCOLD, em 1973, o Comitê foi autorizado a prosseguir analisando eventos em barragens dos EUA no período de 1960 a 1972. Tal documento exclui barragens de rejeito e resíduos e os formulários investigativos foram enviados a um grande número de proprietários de barragens entre 1966 e 1973, resultando em informações sobre 349 rupturas e incidentes significativos, que foram catalogados em oito tipos, sendo:

- F1: falha grave de uma barragem durante a operação, resultando em completo abandono;
- F2: falha grave de uma barragem durante a operação, que pode ser reparada;
- A1: ruptura em barragem que estava em operação há algum tempo, que passou por alterações antes da falha;
- A2: ruptura durante o enchimento inicial;
- A3: ruptura antes do início do enchimento;
- RA: ruptura no reservatório durante a operação, que não causou maiores danos a estrutura;
- DDC: danos em barragem parcialmente construída; e
- MR: reparos importantes necessários, devido à deterioração, ou para atendimento a padrões mais robustos de estabilidade.

O objetivo de tal documento era compreender o comportamento das barragens na época e subsidiou vários estudos e publicação de métodos mais aprimorados de projeto e construção de barragens (ICOLD, 2001). Durante os estudos, verificou-se que a progressão das rupturas já estava em declínio ao longo dos anos, sendo que:

- Durante os 50 anos de 1850 a 1900, ocorreram 13% de rupturas;
- Durante a década de 1900 a 1910, houve 7% de rupturas;
- Durante a década de 1910 a 1920, o percentual era de 4,8%;
- Durante a década de 1920 a 1930, de 2%;
- De 1930 a 1940 e 1940 a 1950, houve menos de 1%; e
- Durante a década de 1950 a 1960, houve, aproximadamente, 0,2%.

A relutância dos proprietários de barragens de rejeito em fornecer dados para estudo similar fez com que o comitê buscasse dados na literatura publicada e na mídia, para que fosse possível ter um panorama similar ao que estava sendo elaborado para as barragens de água. Foram coletados 185 casos, que foram publicados em 1994 juntamente ao Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - UNEP. Tais casos eram referentes a 52 empresas em 18 países, sendo que somente 23 proprietários concordaram em receber os questionários, retornando 20 respostas. No total, foi compilada uma listagem de 26 rupturas, e o estudo foi complementado com dados do USCOLD que, ao final, totalizou 221 casos.

Ao todo, 517 casos foram devidamente avaliados, sendo 53 dos 570 levantados não puderam ser analisados por ausência de informações significativas para ordenamento das falhas. As falhas compreendem as rupturas e os incidentes, sendo esse último evento considerado em casos onde não houve o rompimento da estrutura. As barragens de aterro para acumulação de água compreendiam, aproximadamente, 73% das barragens em operação, e muitas das falhas registradas foram relacionadas a esse tipo de estrutura. Aproximadamente 24% das falhas totais foram relativos a rupturas, sendo 42% devido a incidentes com reparos e 34% descritos como fatalidades. Na Figura 4 tem-se um levantamento dos tipos de falhas em 517 casos avaliados, sendo que a maioria das rupturas está associada ao *overtopping* e, os incidentes, aos vertedouros e estruturais, sendo:

- Estruturais – aproximadamente 145 eventos (28%);
- Vertedouro – cerca de 110 eventos (21%);
- Galgamento – aproximadamente 75 eventos (15%)
- Erosão – cerca de 60 eventos (12%);
- Fundação – aproximadamente 53 eventos (10%);
- Instabilidade de taludes – cerca de 40 eventos (8%); e
- Desconhecidas – aproximadamente sete eventos (7%).

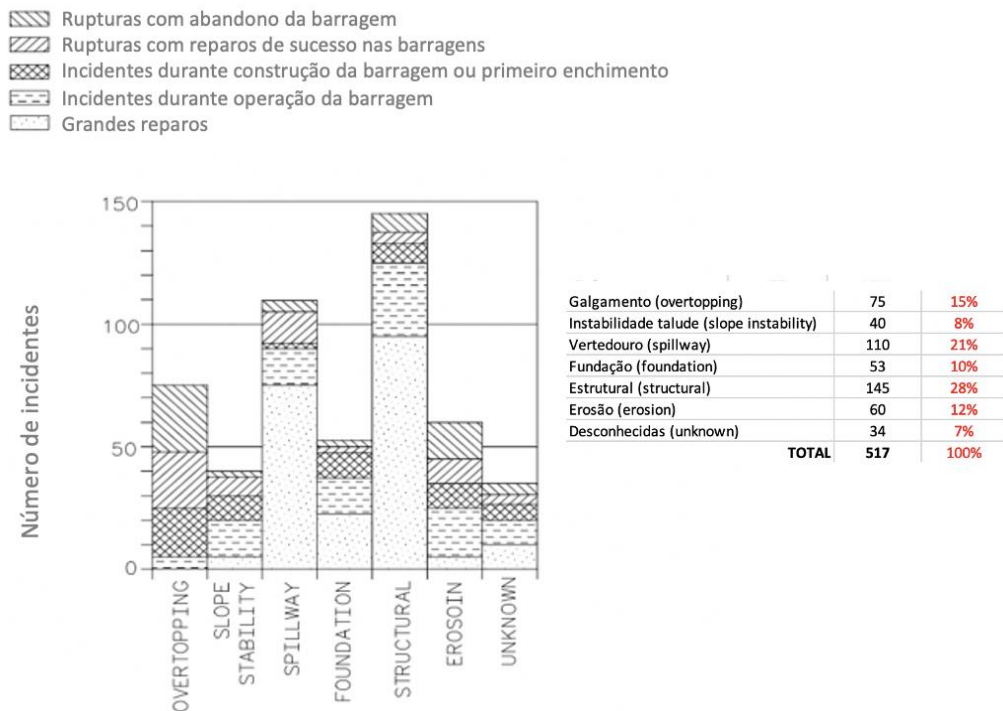


Figura 4 - Rupturas e Incidentes em barragens de água e rejeito por modo de falha.

Fonte: Adaptado de ICOLD (2001)

Na Figura 5, tem-se um comparativo das falhas em barragens de rejeito e observa-se uma elevação a partir de 1960, provavelmente, quando esse tipo de estrutura começou a ser mais recorrente. Para os 211 casos avaliados, cerca de 60% das falhas ocorreram entre 1975 e 2000. Já na Figura 6, tem-se aproximadamente 53% das falhas ocorreram em barragens com menos de 20m de altura.

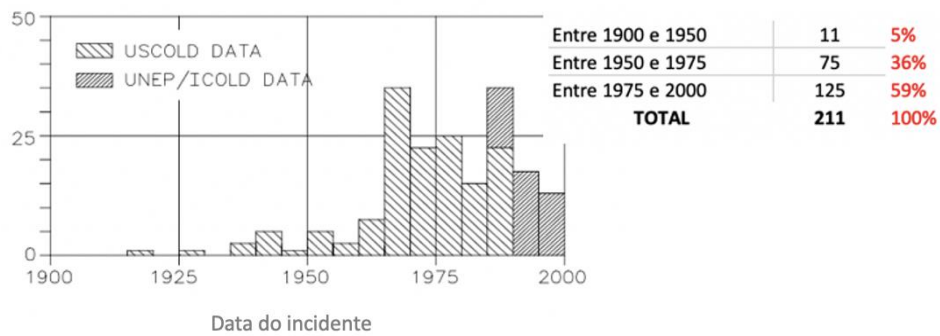


Figura 5 - Falhas em barragens de rejeito por data. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001)

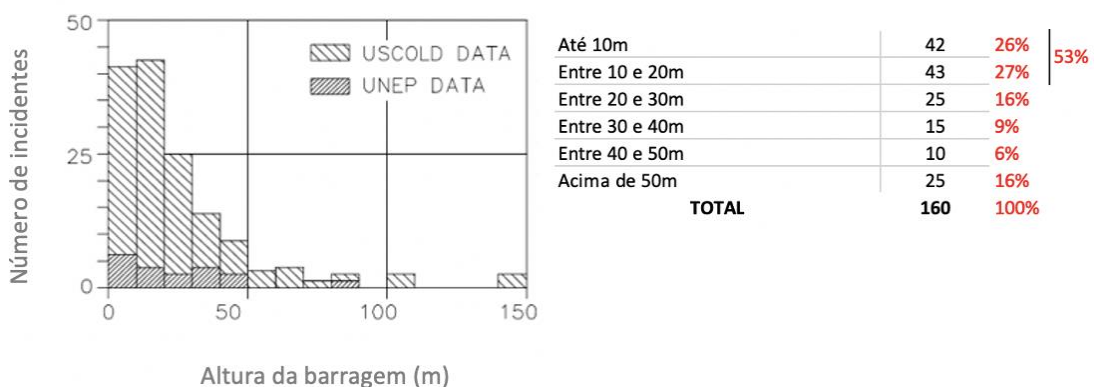


Figura 6 - Falhas em barragens de rejeito em relação à altura. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001)

Um dos tipos de construção mais antigos de barragem de rejeitos é o método por montante, que foi documentado na África do Sul a partir de 1900. Esse método, como apontado por Mittal e Morgenstern (1977), foi utilizado bem antes das técnicas de investigação de fundação e estabilidade de taludes terem sido desenvolvidas. Karl Von Terzaghi foi um engenheiro austríaco que iniciou sua carreira dedicando esforços na busca de um método racional que fosse suficiente para entender a Engenharia de Solos e Fundações. Em 1925, publicou o estudo *Erdbaumechanik*, iniciando o primeiro programa norte americano sobre Mecânica dos Solos no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, o que fez com que essa ciência fosse convertida em uma matéria fundamental na Engenharia Civil. Aposentou-se em *Harvard*, onde desenvolveu suas atividades entre 1938 e 1953. Seu livro *Soil Mechanics in Engineering Practice (Terzaghi e Peck, 1967)*, escrito em parceria com Ralph B. Peck, é de consulta obrigatória para os profissionais da engenharia geotécnica, sendo considerado um dos mais destacados engenheiros civis do século

XX. Dentre outros feitos, ficou conhecido pela analogia que realizou com um sistema contendo água e uma mola, com confinamento lateral, para explicar o efeito do adensamento do solo.

Em função do risco de ruptura da metodologia por montante, principalmente quando sujeito a sismos, desenvolveu-se o método por jusante e, posteriormente, um híbrido dos dois, que é o por linha de centro. Na Figura 7, tem-se um registro do número de falhas em barragens de rejeito por metodologia construtiva. No caso por montante, que representam aproximadamente 41% das falhas totais, tem-se que 64% das falhas foram rupturas e 34% refere-se a incidentes e 2% relativos a lençol freático.

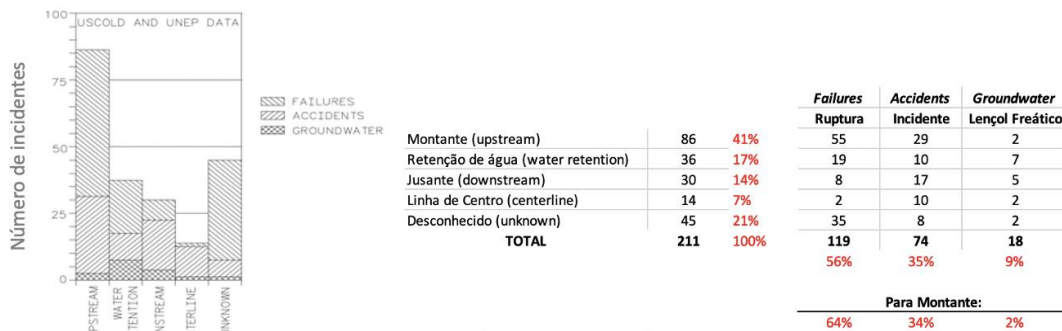


Figura 7 - Tipos de barragens de rejeitos e incidentes. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001)

Na Figura 8 tem-se o total de falhas em barragens de rejeito avaliado pelo ICOLD, separados por tipo de barragem e modos de falha, onde os principais estão relacionados à instabilidade de taludes (24%), terremoto (17%) e galgamento (15%). Para cada tipo de estrutura, há uma alternância entre maiores e menores incidências de cada modo de falha.

Desse estudo realizado pelo ICOLD e da análise das falhas das barragens de armazenamento de água, tem-se que os principais fatores de projeto que interferem na estabilidade da estrutura estão relacionados com condições climáticas, eventos pluviométricos extremos, dimensionamento de vertedouros e terremotos, além de condições específicas tais como fundações das estruturas.

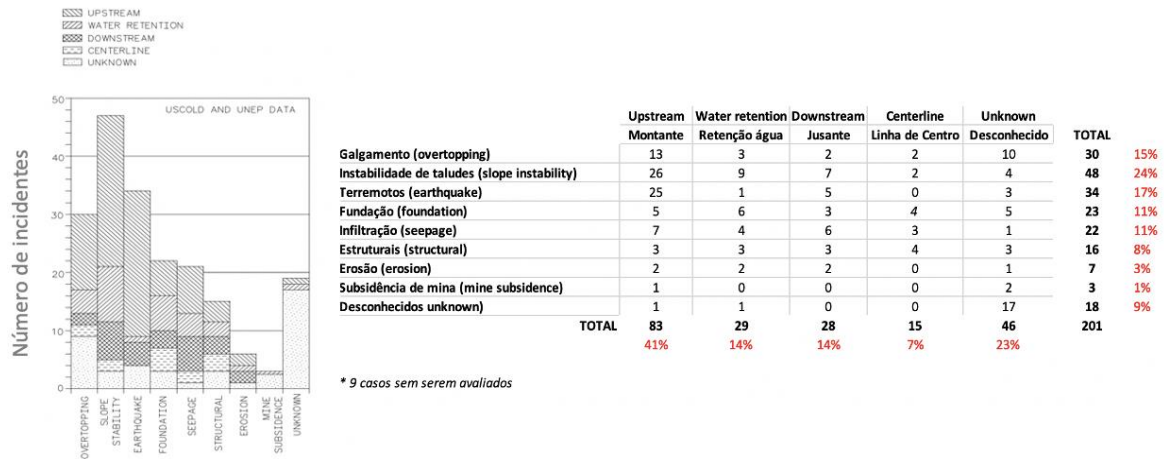


Figura 8 - Modos de falha em barragens de rejeitos. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001)

A etapa inicial de projetos em barragens, onde são levantadas questões críticas e essenciais, afetam significativamente a segurança em longo prazo de uma barragem de rejeitos e, se negligenciadas, serão uma parcela significativa dos problemas ao longo da vida útil da estrutura. As principais características que afetam o projeto de uma barragem de rejeitos e, conseqüentemente a sua estabilidade ao longo da vida útil, são:

- A taxa de disposição de rejeitos e possíveis alterações ao longo dos anos;
- As propriedades dos rejeitos e a variabilidade dos parâmetros ao longo dos anos, principalmente em relação ao adensamento;
- A influência de aditivos nas propriedades flocculantes e espessantes;
- A resistência da fundação, na barragem e região do entorno (principalmente ombreiras);
- Possível influência de carregamentos sísmicos;
- Taxas de precipitação e evaporação; e
- Taxas de infiltração e percolação, no maciço e fundação.

Do ponto de vista da estrutura propriamente dita, os principais fatores que podem afetar a estabilidade de uma barragem estão diretamente relacionados a:

- Condições detalhadas da fundação;
- Altura máxima e inclinação;
- Taxa de deposição e propriedades físico-química dos rejeitos;
- Previsão adequada da infiltração;

- Influências sísmicas; e
- Controle hidrológico, principalmente para evitar galgamento e elevação da freática.

No que diz respeito às atividades de planejamento e gerenciamento, é importante atentar para as questões associadas ao:

- Treinamento de equipe;
- Estreita relação com projetistas e consultores;
- Planejamento dos ciclos de disposição de resíduos, considerando as taxas de adensamento;
- Planejamento e controle da geometria de praia do reservatório;
- Controle da geometria da barragem;
- Planejamento de manutenções;
- Planejamento de atividades de inspeção visual e controle de instrumentação;
 - Volumes e propriedades dos rejeitos,
 - Nível de borda livre,
 - Volumes de água liberada pelos rejeitos,
 - Posição da linha freática, e
 - Taxas de infiltração e volumes percolados.
- Planos de respostas de Ações Emergenciais, como por exemplo, o PAE ou PAEBM; e
- Planos de contingência para situações de emergência.

É importante ressaltar que a avaliação dos dados de inspeção visual e instrumentação deve considerar a possibilidade de condições extremas de carregamentos, principalmente em relação a eventos meteorológicos, em que a estrutura ainda deve ter uma resposta satisfatória de estabilidade. A avaliação de estabilidade deve ser cuidadosa, considerando todos os componentes críticos, principalmente em uma análise probabilística de falha decorrente das variações de cada componente.

No caso da mineração metálica, a história econômica global é melhor e mais frequentemente descrita com quatro variáveis principais: (1) volume de metais

produzidos a partir de minas, (2) preço realizado para esse volume, (3) custos para produzir e (4) grau de minério para beneficiamento (Chambers e Bowker, 2017a). Nos últimos 100 anos, a principal dinâmica da mineração de metálicos em todo o mundo, foi a queda das taxas e o declínio dos preços pontuados por alguns superciclos de curto prazo. Como as taxas produtivas caíram em todos os metais descobertos, reservas e teores, a viabilidade econômica e a possibilidade de lucro concentraram-se principalmente na economia da produção de minério, possibilitada pela mineração a céu aberto. O custo para mover uma tonelada do minério da mina para o beneficiamento é completamente independente da classificação e do preço final que resultará. Isso traz duas variáveis-chave adicionais na análise da alta frequência e severidade de falha: (1) volume de produção de minério, e (2) o custo de mineração por tonelada de minério. À medida que um projeto avança para o estágio de desenvolvimento pleno, a sobrevivência fica totalmente dependente das flutuações de preço.

A Figura 9 apresenta uma compilação de dados de Aguirregabiria e Luengo (2016) para o cobre, sendo que no período entre 1992 e 2010, a participação ativa entre as 330 minas estudadas aumentou de 144 (44%) para 226 (68%). É nesse aumento de reentrada, e de expansões tecnicamente frágeis, que a tendência para o aumento de falhas manifestou-se.

Em resposta às demandas dos investidores para que as mineradoras reduzissem o débito, ocorreu uma campanha agressiva para “limpar” essas minas dos portfólios dos principais produtores. Muitos economistas do setor concordam que essa foi uma reestruturação saudável, no nível da empresa. Entretanto, do ponto de vista do interesse público, essa limpeza generalizada é problemática, pois quaisquer riscos que tenham se acumulado ao longo dos processos podem permanecer sem exame adequado, à medida que há uma baixa técnica no quadro operacional e em investimentos para manutenção.

A Figura 10 demonstra que o número absoluto de grandes falhas e a severidade dessas grandes falhas, indicada como uma taxa cumulativa por década, tem aumentado progressivamente. Entre 2006 e 2015, tem-se a parte mais íngreme, ou seja, coincidente com os aumentos de preço do superciclo entre 2000 e 2010. É importante observar que a escala de severidade (mensurada em volumes de lançamento e distância percorrida) é quase paralela à inclinação da linha de

gravidade (mensurada em volumes de liberação e distância percorrida). Isso indica uma mesma linha de tendência, para eventos de gravidade mais baixos e altos.

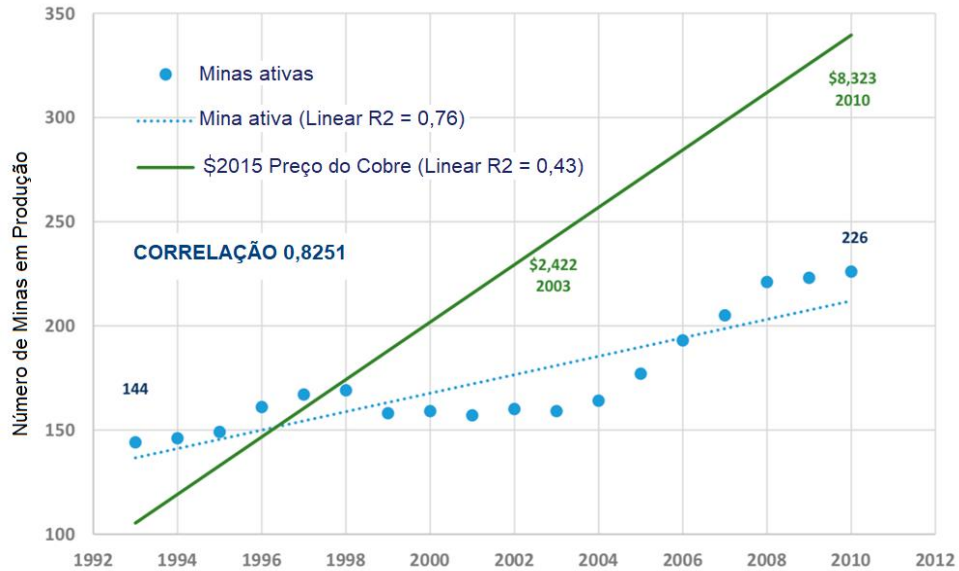


Figura 9 - Número de produção de minas x crescimento no preço de cobre. Fonte: Adaptado de Chambers e Bowker (2017a)

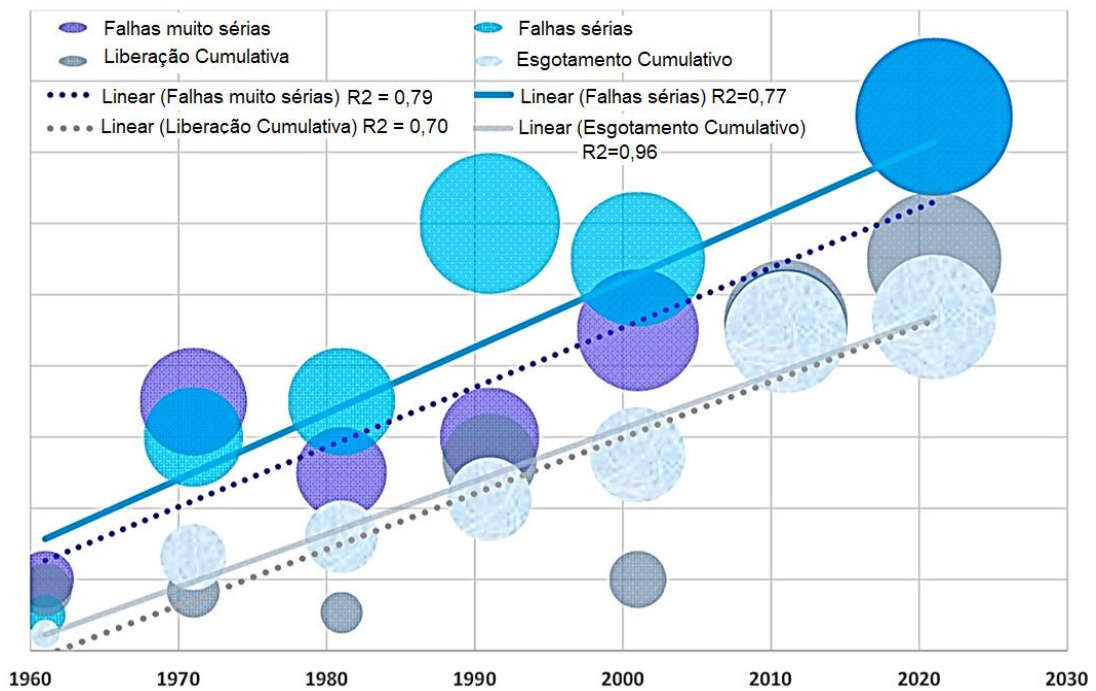


Figura 10 - Crescimento da severidade e frequência de rupturas de barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de Chambers e Bowker (2017a)

3 DESCOMISSIONAMENTO E DESCARACTERIZAÇÃO

Quando uma barragem está completamente cheia ou quando a produção de rejeitos cessa, ou finaliza-se o processo de captação de água, a barragem é tida como inativa. O descomissionamento ocorre a partir do momento em que não se tem mais o lançamento de resíduos, no caso das barragens de rejeito e, a captação de água, nos casos das barragens de água. Entretanto o descomissionamento não torna as estruturas imunes às rupturas ou falhas, como apresentado pelo ICOLD na Figura 11, onde se tem um valor variável entre 2 e 10 incidentes por tipologia, no caso das barragens descomissionadas (inativas). O comparativo entre os incidentes entre barragens ativas e inativas demonstra que em barragens ativas a instabilidade de taludes, galgamento e terremotos são mais significativas. Já no caso das inativas, o galgamento e terremoto são mais frequentes.

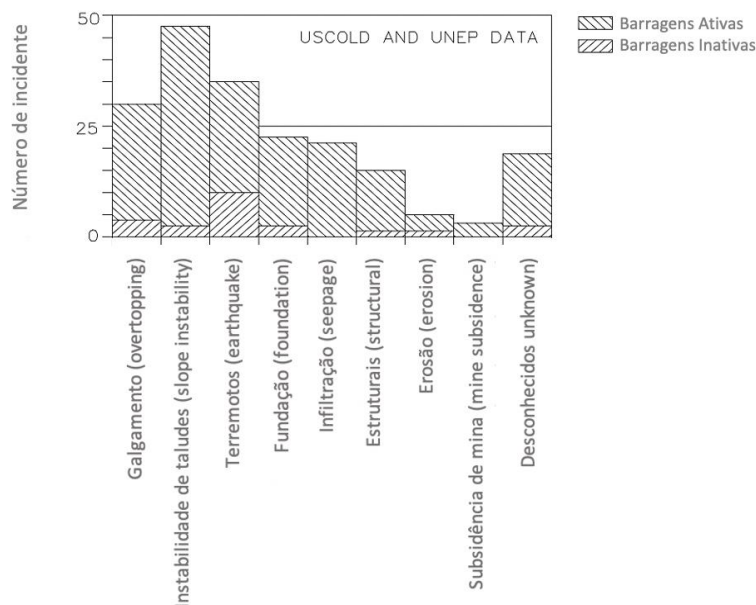


Figura 11 - Comparativo dos incidentes em barragens de rejeito em relação aos status. Fonte: Adaptado de ICOLD (2001)

Uma causa provável de falhas em barragens inativas é associada ao aumento do nível d'água do reservatório aproximando-se da crista da barragem e, assim, aumentando a freática no maciço e talude de jusante, levando a deslizamentos e escorregamentos. A construção de diques internos ao reservatório, que distam da

crista, pode reduzir esse afluxo de água, permitindo que ainda possa garantir uma sobrelevação no reservatório em decorrência de chuvas extremas. Entretanto deve ser avaliada a resistência do maciço para essa elevação no carregamento.

Nesse sentido, é importante prever alguma atividade de descaracterização das estruturas, parcial ou total, com o objetivo de reduzir, e até eliminar, os riscos associados a rupturas de barragens inativas. Entende-se como descaracterização a completa remoção do maciço, reestabelecimento da drenagem superficial no terreno impactado e reintegração da região nos quesitos ambientais. O custo de se manter equipamentos não funcionais (como bombas, comportas, tubulações e afins) após o descomissionamento das estruturas, além de toda uma rotina de inspeção e monitoramento, geralmente é mais elevado do que a descaracterização da estrutura.

Para o processo de descaracterização de uma barragem o Brasil apresenta uma escassez de normas, legislações e bibliografias sobre o tema. No entanto, é necessário que sejam considerados quesitos mínimos de segurança e, para isso, é importante que seja realizada inspeção de segurança especial (ISE) com consideração das alterações das condições a montante e a jusante da barragem. Ainda, deve-se elaborar documentação específica que contenha projeto de descaracterização bem detalhado, inclusive com as operações de descomissionamento.

Uma divisão clara entre as atividades de descomissionamento e descaracterização, mesmo que sejam complementares, é facilitada do ponto de vista do monitoramento e manutenção. Estruturas descomissionadas ainda necessitam de intenso monitoramento, bem como atividades permanentes de manutenção. Já para as estruturas descaracterizadas, o monitoramento e atividades de manutenção vão sendo reduzidos à medida que se tem a remoção da estrutura, mantendo-se nos primeiros meses após a reintegração e, com espaçamentos cada vez maiores. Para desenvolver um bom sistema de monitoramento e manutenção durante o fechamento é preciso considerar possíveis colapsos no maciço, fundação e ombreiras, principalmente em termos de deslizamento, liquefação e processos de erosão interna e *piping*. O regime pluviométrico, possíveis ataques de vandalismo e deterioração dos sistemas também devem ser contemplados em projetos de descomissionamento.

De uma forma geral, todo esse processo pode ser denominado de Plano de Fechamento, que contempla o processo de descomissionamento e as etapas de

descaracterização, quando necessárias. O fechamento de uma barragem pode ser permanente, parcial ou temporário e, uma questão comum em todos esses modelos é que se faz necessário um planejamento bem delineado em termos das questões geológicas, geotécnicas e hidrológico-hidráulicas. O primeiro critério para definição do processo de fechamento, e as etapas que devem contemplar, é a segurança e estabilidade da construção, sendo expresso em termos da probabilidade de risco e falha, como já discutido anteriormente. Posteriormente, devem ser avaliados critérios econômicos e de aceitação social da estrutura no entorno de determinadas comunidades.

O Plano de Recuperação de Áreas Degradadas – PRAD é um documento integrante do processo de licenciamento de atividades degradadoras ou modificadoras do meio ambiente, também solicitado após alguma atividade de degradação ambiental. Ainda que contenha medidas que propiciam a área degradada condições de estabelecer um novo equilíbrio dinâmico, é uma mitigação e não recupera a densidade dos danos ambientais.

Geologicamente, deve-se atentar para a condição dos maciços rochosos com a intervenção construtiva da barragem, haja vista que com possíveis atividades de remoção e paralisação de atividades de captação ou disposição de resíduos, todo o sistema solo-rocha ainda estará em atividade. O monitoramento das condições de pressão, saturação e adensamento devem ser mantidos até a total descaracterização da estrutura para que seja garantida a sua estabilidade do ponto de vista geotécnico. Medidas para controle de erosões durante o processo de fechamento também são um fator que requer atenção especial. As análises devem ser baseadas na performance da barragem ao longo de sua vida útil, com a variação dos parâmetros de resistência e permeabilidade ao longo dos anos.

Para as questões hidrológico-hidráulicas deve-se atentar para o volume de água retido, bem como o fluxo de drenagens superficiais e profundas, sendo nesse último caso importante compreender as questões associadas ao lençol freático. O processo de deplecionamento do reservatório deve ser lento e gradual, para que a distribuição de tensões ao longo do processo seja controlada. Além disso, o sistema de drenagem pluvial deve considerar o fluxo de água incidente na bacia afetada pela construção.

O Plano de Fechamento da barragem deve ter como cerne principal o cumprimento das obrigações, de forma que todo o planejamento e todas as ações a

serem projetadas e executadas garantam a estabilidade da estrutura e adequada reintegração da área. Nesse sentido, o fechamento assume fundamental importância no processo de gestão de segurança dessas estruturas, sendo recomendado que as ações de fechamento sejam consideradas ainda na fase de concepção do projeto, permitindo assim uma implantação progressiva.

Quanto à estabilidade física de barragens, dois fatores devem ser previamente avaliados: a segurança física, pautada na avaliação da geometria do maciço, e a segurança hidráulica, com base no dimensionamento de dispositivos de drenagem/vertimento. Os quesitos quanto à segurança para casos de descaracterização não possui normativa específica, além dos itens considerados na ABNT NBR 13028:2017 – Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. A segurança da barragem pode ser comprovada por meio das análises de sua estabilidade física contemplando os prováveis cenários de desmonte e demolição da estrutura, analisando os fatores de segurança obtidos e comparando-os com os aplicáveis ao longo da vida útil do empreendimento. Também devem ser incluídas no projeto as análises de segurança quanto aos mecanismos de ruptura referentes ao galgamento, erosão interna e liquefação (quando aplicável).

O atendimento ao quesito de inspeção de segurança especial (ISE) é regulamentado pelas portarias, deliberações normativas e resoluções de cada órgão legislados, a depender da tipologia da estrutura. Basicamente, a inspeção de segurança especial é de responsabilidade do empreendedor, visando avaliar as condições de segurança da barragem em situações específicas, devendo ser realizada por equipe multidisciplinar de especialistas. O produto final da ISE é um parecer conclusivo sobre as condições de segurança da barragem, contendo recomendações e medidas detalhadas para mitigação e solução dos problemas e/ou prevenção de novas ocorrências.

Em termos de fechamento, Mao e Kam (2011) afirmam ser necessário considerar o cenário de longo prazo (drenado) no processo de avaliação da estabilidade de barragens descomissionadas. O cenário de carregamento sob condições não drenadas (curto prazo) deve ser analisado para assegurar que a estabilidade da estrutura seja mantida imediatamente após a execução das obras de descomissionamento, sendo mantida durante as atividades de descaracterização.

Em relação ao tipo de carregamento, o cenário estático engloba a análise da estabilidade física da barragem em termos das características do material de construção e fundação, considerando ainda o comportamento da superfície freática no interior do maciço. O cenário pseudo-estático, por sua vez, inclui, a esses fatores, a consideração de movimentos sísmicos. A superfície freática normal deve ser admitida para as condições normais de funcionamento da drenagem interna em regime permanente, previsto em projeto e, a superfície freática crítica, admitida para as condições de não funcionamento da drenagem interna, por exemplo.

3.1 Estabilidade física

Szymanski e Davies (2004) afirmam que não existem orientações específicas quanto à avaliação da estabilidade física de barragens de rejeito para a fase de fechamento, dada à complexidade relacionada ao tema. Nesse contexto, sugerem o intervalo entre 1,5 a 1,8 para o fator de segurança mínimo de projeto, especificamente no que diz respeito à fase de fechamento da estrutura, em contrapartida ao valor de 1,5 comumente aplicado. Entretanto tais autores deixam evidente a arbitrariedade dessa sugestão, ressaltando que a definição do critério a ser utilizado deve ser pautada no conhecimento do projeto e dos diversos processos que poderão afetar a segurança física da barragem no longo prazo.

No que tange à geometria do maciço, Mao e Kam (2011) consideram que os taludes devem apresentar inclinação global entre 1V:2,5H a 1V:3H. Para conduzir o escoamento superficial, Pinheiro (2011) recomenda, como critério de projeto, que a declividade transversal das bermas deve variar entre 5 a 10%. Trabalhos desenvolvidos sobre o tema fechamento de barragens no Brasil têm considerado como aceitável, frente à ausência de atividade sísmica no país, a configuração do maciço com inclinação do talude entre bermas de 1V:2H; e bermas com, no mínimo, 6 m de largura, sendo o ideal a largura em torno de 8 m, dotadas de leira de proteção e com declividade transversal de 5% voltada para o interior. Nos projetos, tem-se observado ainda a adoção de 0,5% de inclinação longitudinal nos dispositivos de drenagem instalados ao longo das bermas e a proteção dos taludes com vegetação rasteira, de modo a minimizar a ocorrência de processos erosivos e a conseqüente perda de solo.

3.2 Estabilidade hidrológico-hidráulica

O projeto do sistema extravasor para o cenário de fechamento deve considerar a vazão efluente calculada com base na Precipitação Máxima Provável (PMP), sem borda livre. Para projetos de dimensionamento de drenagem superficial, é indicada a utilização de quantis de chuva associados a 100 anos de tempo de retorno para dispositivos de pequenas vazões, tais como canaletas de bermas e descidas d'água, e 500 anos de tempo de retorno para dispositivos de grandes vazões, tais como canais de coleta e condução de água. Ainda, é desejável que sejam empregados, na construção desses dispositivos, materiais que possam se integrar ao meio ambiente. Na Tabela 2 tem-se uma estimativa proposta por Szymanski e Davies (2004) para determinação do tempo de recorrência em projetos de fechamento de barragens.

Chambers e Higman (2011) correlacionam os principais modos de falha à longo prazo em barragens de rejeito, e citam a ausência de controle hidrológico como uma das causas mais prováveis de ruptura, embora tenham concluído que a orientação para a determinação do tempo de recorrência a ser considerado no projeto das estruturas de vertimento tem evoluído com o passar do tempo. Alguns critérios para dimensionamento de sistemas extravasores foram revistos pela ICOLD em 2001, no Boletim 139, que considera a vida útil da barragem para a adequada escolha do evento de precipitação, além da classificação da consequência de ruptura para a região do vale de jusante.

Tabela 2 - Determinação do tempo de recorrência para fechamento de barragens.

Fonte: Adaptada de Szymanski e Davies (2004)

Consequência	Tempo de Retorno (Operação)	Tempo de Retorno (Fechamento)
Baixa	200 a 500 anos	PMP*
Moderada	500 a 1.000 anos	PMP
Alta	1.000 a PMP	PMP

*PMP (Precipitação Máxima Provável): maior precipitação de água sobre a área de drenagem considerada, com determinada duração, que produziria fluxos inundatórios sem possibilidade de serem excedidos

Szymanski e Davies (2004) concluíram que a associação das consequências da ruptura em termos de potencial de vidas perdidas também deve ser um fator avaliado para a escolha adequada do tempo de retorno de extravasores no período de fechamento. Nesse sentido, a cheia Máxima Provável (CMP), que é um dos critérios mais rigorosos em termos de inundações, deve ser considerada sempre que houver probabilidade de perda de uma ou mais vidas (Tabela 3). A CMP é resultante da transformação chuva-vazão do evento da PMP.

Robertson e Shaw (2004) afirmam que a adoção de eventos hidrológicos de grande magnitude em projetos de fechamento de barragens é bem razoável e frequente, sendo que as consequências decorrentes de falhas estruturais seriam de grande magnitude. Logo, para esse cenário, indicam a adoção do período de 10 mil anos como o tempo de recorrência. Estruturas com baixo grau de impacto em decorrência de uma falha são, normalmente, concebidas para acomodar chuvas relacionadas a 100 anos de inundação e, as barragens com impactos de uma ruptura caracterizados como grandes (e não catastróficos) são, normalmente, concebidas para o evento hidrológico relacionado a mil anos de recorrência. Os termos “catastrófico”, “baixo” e “grande”, para a caracterização dos impactos decorrentes da ruptura de uma barragem, não encontram-se definidos no artigo publicado pelos autores.

Tabela 3 - Determinação do tempo de recorrência em projetos de fechamento de barragens. Fonte: Adaptado de Szymanski e Davies (2004)

Potencial de Vidas Perdidas	Tempo de Recorrência
1 ou mais*	Cheia Máxima Provável
0	Para a determinação do critério, considerar as perdas econômicas, os impactos ambientais, bem como as perdas sociais e culturais

*Moradores à jusante e os profissionais em locais de trabalho com períodos de exposição significativos

Para Pinheiro (2011) a recomendação é de que a cheia de projeto de vertedouros deve ser avaliada em função da dimensão da estrutura (Tabela 4) e do

nível de risco à jusante (Tabela 5), em caso de incidentes com rompimento do maciço.

Tabela 4 - Classificação das barragens quanto à dimensão. Fonte: Adaptado de Pinheiro (2011)

Dimensão	Altura - H (m)	Volume - V (x10⁶ m³)
Pequena	5 < H < 15	0,005 < V < 1,0
Média	15 < H < 30	1,0 < V < 50
Grande	H > 30	V > 50

Tabela 5 - Classificação das barragens quanto ao potencial de risco. Fonte: Adaptado de Pinheiro (2011)

Risco	Perdas de Vida	Perdas Econômicas
Baixo	Nenhuma esperada (nenhuma estrutura permanente para habitação humana)	Mínima (região não desenvolvida em benfeitorias e cultivos ocasionais)
Médio	Até cinco (nenhum desenvolvimento urbano e não mais do que um pequeno número de estruturas habitáveis)	Apreciável (terras cultivadas, benfeitorias industriais e casas)
Alto	Mais do que cinco	Excessiva (comunidades, indústrias e agriculturas extensas)

Os estudos foram adaptados para a realidade brasileira, conforme os critérios empregados pelo CBDB, a partir das recomendações do ICOLD (Tabela 6). Em função da carência de estudos de PMP pontual no Brasil, tem sido adotado o cálculo da CMP a partir do evento de chuva decamilenar.

Em relação ao dimensionamento dos dispositivos de drenagem superficial é usual a determinação da vazão de projeto a partir do risco hidrológico admissível durante o período total estimado. O risco hidrológico associado a uma obra hidráulica é função de sua vida útil e do tempo de retorno adotado para o dimensionamento. Visando a quantificar o risco hidrológico inerente à implantação de uma dada obra hidráulica, apresenta-se a Equação (1):

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

(T) denota o tempo de retorno associado à vazão de projeto, em anos;

(n) denota a vida útil estimada para a obra hidráulica, em anos; e

(R) denota o risco hidrológico, que significa a probabilidade de ocorrer pelo menos um evento superior à vazão de projeto no período de n anos.

Tabela 6 - Critérios de cálculo de cheia de projeto de vertedouros, conforme CBDB.

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2011)

Risco	Dimensão	Cheia de Projeto
Baixo	Pequena	Cheia com período de retorno entre 50 e 100 anos
	Média	Cheia com período de retorno de 100 anos e 1/2 CMP
	Grande	1/2 CMP a 1 CMP
Médio	Pequena	Cheia com período de retorno de 100 anos e 1/2 CMP
	Média	1/2 CMP a 1 CMP
	Grande	1 CMP
Alto	Pequena	1/2 CMP a 1 CMP
	Média	1 CMP
	Grande	1 CMP

Na Tabela 7, tem-se o percentual de risco hidrológico para os tempos de retorno mais usuais, em determinadas escalas de vida útil, com a aplicação da fórmula mencionada, sendo um referencial para gestão de riscos para falhas de estruturas hidráulicas. Para o desenvolvimento de projetos de fechamento de barragens, geralmente adota-se como longo prazo o período correspondente a sete vezes a vida útil média de uma barragem (estimada em 35 anos), ou seja, 245 anos (aproximada para 200 anos).

Tabela 7 - Valores de risco hidrológico em função do tempo de retorno e vida útil da estrutura. Fonte: Elaborado pela autora

TR (anos)	Vida útil da obra (anos)						
	1	5	10	20	50	100	200
100	1,0%	4,9%	9,6%	18,2%	39,5%	63,4%	86,6%
500	0,2%	1,0%	2,0%	3,9%	9,5%	18,1%	33,0%
1.000	0,1%	0,5%	1,0%	2,0%	4,9%	9,5%	18,1%
10.000	0,0%	0,1%	0,1%	0,2%	0,5%	1,0%	2,0%

3.3 Opções para descaracterização

Em muitos casos as barragens geram impactos negativos na sociedade e no meio ambiente, e a descaracterização torna-se razoável do ponto de vista do reestabelecimento desse tipo de relação. Além disso, os empreendedores têm visto a remoção completa como uma alternativa preferencial ao gerenciamento de deterioração, instabilidade ou abandono de barragens. A maioria das barragens antigas acaba sendo descomissionadas e, a partir desse momento, o custo para garantia de estabilidade não é compensado pelo uso. As barragens podem trazer um grande benefício para a sociedade, mas também podem alterar processos químicos, físicos e biológicos de um ecossistema, sem considerar os danos causados por eventuais rupturas.

As etapas a serem seguidas para descaracterização de uma estrutura dependem de fatores limitantes de projeto, bem como de fatores associados a custo, técnica e prazo. Existem várias maneiras de se remover as barragens, e o método escolhido dependerá do mapeamento e das variáveis atribuídas a cada um desses fatores. O tamanho e o tipo da barragem, a quantidade de sedimentos e resíduos no reservatório, o fluxo na fundação da estrutura, os anseios do proprietário da barragem e quais são suas prioridades e o prazo de remoção da barragem, geralmente são fatores que afetam o processo de descaracterização. De um modo geral, o custo da remoção é elevado e as despesas normalmente aumentam proporcionalmente quando há preocupações ambientais relevantes. Entretanto o custo da remoção de barragens geralmente é compartilhado por várias partes interessadas e, dessa forma, torna-se algo efetivo. Além disso, mesmo sendo

elevado, é infinitamente menor do que os custos em longo prazo com monitoramento e manutenção, em como pagamento de indenizações e multas ambientais em face de um rompimento da estrutura.

Em todas as opções de descaracterização, é essencial garantir a estabilidade da estrutura durante as intervenções para que, durante o esvaziamento e desmonte de reservatório e maciço, sejam assegurados fatores aceitáveis de segurança. O processo de descaracterização deve ser monitorado do início ao fim para que sejam possíveis ajustes em caso de condições de tensão diferenciada do esperado em projeto.

No caso das barragens de água, um problema comum é avaliar como os sedimentos transportados naturalmente pelo rio são depositados no reservatório e, eventualmente, podem ser caracterizados como lodos. Esse excesso de sedimentos, durante a operação, pode reduzir a capacidade de geração hidrelétrica de um reservatório. Ainda durante a operação e mesmo durante o descomissionamento, os sedimentos podem alterar o canal do rio a jusante, aprisionar sedimentos ricos em nutrientes e ampliar as pressões no talude de montante e ombreiras. Muitas vezes, o sedimento armazenado em um reservatório é excelente para recompor calhas de rios, reconstruindo o habitat dos peixes e fornecer nutrientes para a microbacia. Em outros casos, o sedimento pode aumentar a turbidez do rio, prejudicando a vida aquática, alterando a paisagem e dificultando a implantação de estruturas.

O sedimento pode ser avaliado antes de ser liberado para determinar se será prejudicial à paisagem a jusante da estrutura. Nesse caso, também se inclui as barragens de rejeito que possuem percentual de sólido em suspensão, ou seja, a parcela fluida de material não adensado que se pretende liberar no vale de jusante. A remoção da barragem pode ter consequências adversas se isso não for considerado, principalmente em relação à vida selvagem e à humana residente próximo ao vale de jusante da estrutura.

A solução de abertura de uma brecha na estrutura e liberação gradual dos volumes acumulados é comumente usada por causa de inúmeras vantagens ecológicas. É um método lento no qual o reservatório é drenado por meio de brechas ao longo da estrutura e, novas aberturas são realizadas à medida que o nível do reservatório é rebaixado para que a água seja drenada do reservatório com um fluxo constante e consistente. Nesse caso, para as barragens de água, o

sedimento aprisionado atrás da barragem flui para jusante com uma taxa fixa e proporcional, permitindo que o ecossistema ajuste-se às mudanças. Para a barragem de rejeito, é considerável somente para o caso do percentual do reservatório não adensado. Esse método pode levar meses ou até mais de um ano, mas há na literatura casos de sucesso, como o a recuperação de *Elwha* e Cânion *Glines*.

O projeto de restauração do ecossistema *Elwha*, pertencente ao Serviço Nacional de Parques dos Estados Unidos, consistiu na remoção de duas barragens de água para geração de energia elétrica no Rio *Elwha*, no estado de *Washington*, restaurando o rio a um estado natural (NPS, 2020). Ao todo, foram gastos mais de U\$ 351 milhões de dólares. A remoção da primeira barragem foi iniciada em setembro de 2011, e concluída em março de 2012, sendo a segunda concluída em agosto de 2014. A barragem *Elwha* tinha 33 m de altura e, *Glines* cerca de 64 m, construídas entre os anos de 1910 a 1912 e com potência combinada de 19 mW por ano. Há registro de um evento de ruptura na barragem *Elwha* em 1912, que foi posteriormente reconstruída, mas que nunca recebeu licença federal para operar em função de não ter sido construído sistema satisfatório de escada de peixes. Na Figura 12 tem-se um sequenciamento de como foi o processo de descaracterização, sendo, respectivamente, em setembro de 2011, fevereiro de 2012 e maio de 2013. Após a remoção das barragens, cerca de 10 milhões de toneladas de sedimentos foram liberados pelos dois reservatórios, aumentando 1 m de nível do leito do rio e mudando a morfologia do canal. O sistema fluvial apresentou uma resposta geomorfológica em relação à remoção da barragem de, aproximadamente, 40 anos, caso a barragem não tivesse sido implantada.

A abertura de brechas também pode contemplar a inserção de gabiões para auxiliar no controle de fluxo e ampliar a estabilidade da estrutura. Dessa forma, o fluxo pode ser direcionado e o maciço da barragem removido à medida que se tem a diminuição de volume do reservatório. Ao final, o fluxo de drenagem pluvial do córrego pode ser direcionado por esse canal. Nesse caso, a utilização de bombas para realizar o esvaziamento do reservatório pode ser necessária para um controle maior de estabilidade nos primeiros níveis de esvaziamento. A abertura das brechas deve ser totalmente controlada e deve haver limpeza prévia nos taludes de montante e jusante para verificação da condição da estrutura, antes de iniciar a execução da brecha inicial.



Figura 12 - Descaracterização da barragem Elwha. Fonte: NPS (2020)

Uma segunda opção para descaracterização de barragens é a liberação rápida do material do reservatório, que é um procedimento menos dispendioso, mas apresenta desvantagens significativas. Nessa abordagem, um grande túnel é aberto na base da barragem e, em seguida, conectado ao reservatório, com todo o volume de água sendo drenado por essa abertura em questão de horas. A aplicabilidade dessa técnica é limitada a barragens de água e, nesse caso, a liberação maciça de água e sedimentos pode causar inundações e erosões severas ao longo do vale de jusante. Se o reservatório for relativamente pequeno, o impacto é reduzido, mas ainda deve-se ter cuidado em relação à distribuição de tensões no sistema solo-água.

Os processos de bombeamento do material do reservatório também são técnicas aplicáveis e, para o caso das barragens de água, após o esvaziamento, aguarda-se a secagem do sedimento para posterior retirada. Para as barragens de rejeito, o bombeamento é apenas da água livre e, toda a porção adensada de rejeito deve ser contabilizada para remoção, que pode ser feita por meio de escavadeiras e caminhões. O material seco pode ser estocado em pilhas, por exemplo. Essa é uma técnica lenta, mas bastante aplicável quando os reservatórios de água estão próximos de unidades de geração de energia, ou quando o adensamento de rejeitos é significativo. As barragens que armazenam resíduos tóxicos também requerem a remoção controlada do material, com o descarte em locais seguros e estanques. O plano de bombeamento e remoção de material deve ser realizado com base nas análises de estabilidade de maciço e ombreiras, verificando a taxa que pode ser removida, em determinado período, sem cenários de instabilidade.

Geralmente, utilizam-se balsas de tambor para suportarem bombas de sucção, caso trabalhem simultaneamente. Deve-se considerar a aquisição de mangotes flexíveis, de acordo com a bomba selecionada, para a restituição da água

até o ponto definido. Outros dados devem ser especificados, tais como tipo e quantidade de bombas, especificações do mangote, posicionamento do sistema de esvaziamento e ponto de restituição.

O material de remoção do maciço e do reservatório também pode ser utilizado para recuperação do vale de jusante, adicionado ao plantio de mudas e revegetação. Ainda, podem ser utilizados como matéria prima para construção de tijolos, base para pavimentação, aditivos em tintas, bem como outros usos de reaproveitamento de resíduos.

A literatura apresenta vários casos de descaracterização de barragens de água bem sucedidos, principalmente nos Estados Unidos, descritos a seguir, sendo um apresentado pela Vale (2020) e ilustrado na Figura 13:

- 2018 – Barragem 8B, em Nova Lima;
- 2015 – Barragem de *San Clemente*, na Califórnia;
- 2011 – Barragem *Condit*, em *Washington*;
- 2009 – Barragem *Savage*, no *Óregon*;
- 2008 – Barragem *Milltown*, em *Montana*;
- 2004 – Barragem de *Cuddebackville*, em *Nova York*; e
- 1997 – Barragem *Edwards*, em *Maine*.



Figura 13 - Descaracterização da barragem B8. Fonte: Vale (2020)

4 GERENCIAMENTO DE RISCO E FALHA

Um projeto bem sucedido requer monitoramento e avaliações constantes, através de um exame sistemático das atividades que o compõe determinados processos, auxiliando como uma ferramenta preventiva de potenciais falhas.

O diagrama F-N é uma diretriz teórica para estimativa do número de fatalidades (N) em relação às probabilidades de falha de estruturas similares (F) de barragens, diques e encostas artificiais, em termos de probabilidade de ocorrência e consequências. Os critérios de aceitação de risco são diferentes em cada país, mas, o senso comum, é de que há baixa probabilidade de falha com um grande número de fatalidades, o que não significa que é inexistente, conforme Figura 14.

Risco é definido como o efeito da incerteza nos objetivos, segundo a ABNT NBR ISO 31000. Geralmente associada a um sinônimo de consequência e impacto, o risco também pode ser associado a um cenário positivo (ganhos) ou negativos (perdas). A relação mais utilizada é a de que a causa, ou fonte do risco, está diretamente relacionada a um evento ou fato, gerando uma determinada consequência, ou seja, o efeito.

Historicamente, os primeiros estudos relacionados a esses eventos foram realizados por Whitman (1984), com a percepção da frequência e consequências de falhas de diferentes tipos de construção. A probabilidade anual de falha foi relacionada com as perdas de vida e os custos associados a essas perdas, para falhas em fundações, cavas, barragens e afins, sendo equacionados os critérios de risco em diferentes países (Figura 15). O risco de uma barragem romper nunca é zero, e estar vivo durante uma falha depende das condições de ocupação do vale de jusante e relações populacionais do quantitativo de homens, mulheres, crianças, idosos, deficientes, dentre outros. Segundo algumas estatísticas, a taxa de mortalidade da população, nas mais diversas causas, é elevada nos primeiros anos de vida (cerca de 1%), reduzindo entre os 5 e 15 anos para 10^{-4} e, retomando para 1% e até 10% entre os 20 e 80 anos (WHO, 2020).

Nesse sentido, para ampliar a noção do risco, é essencial que se tenham boas políticas de gestão de risco implantadas, principalmente com a avaliação do quantitativo populacional existente no vale de jusante e que trabalha dentro dos empreendimentos. Além disso, o entendimento técnico das estruturas associadas, bem como suas condições de projeto, operação, manutenção e monitoramento, com

o delineamento com as legislações aplicáveis, é um fator determinante para o gerenciamento de segurança de barragens.

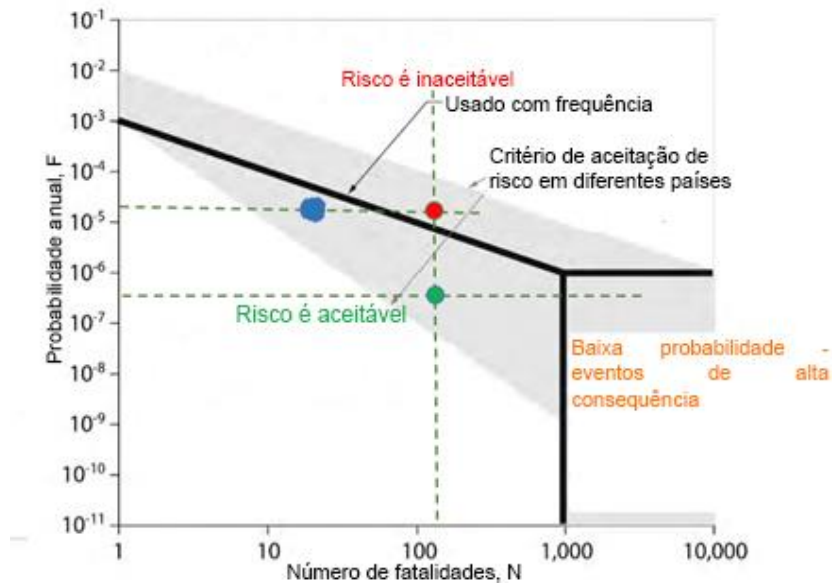


Figura 14 – Diagrama F-N para relação de fatalidades e probabilidade de falhas.

Fonte: Adaptado de Lacasse (2019)

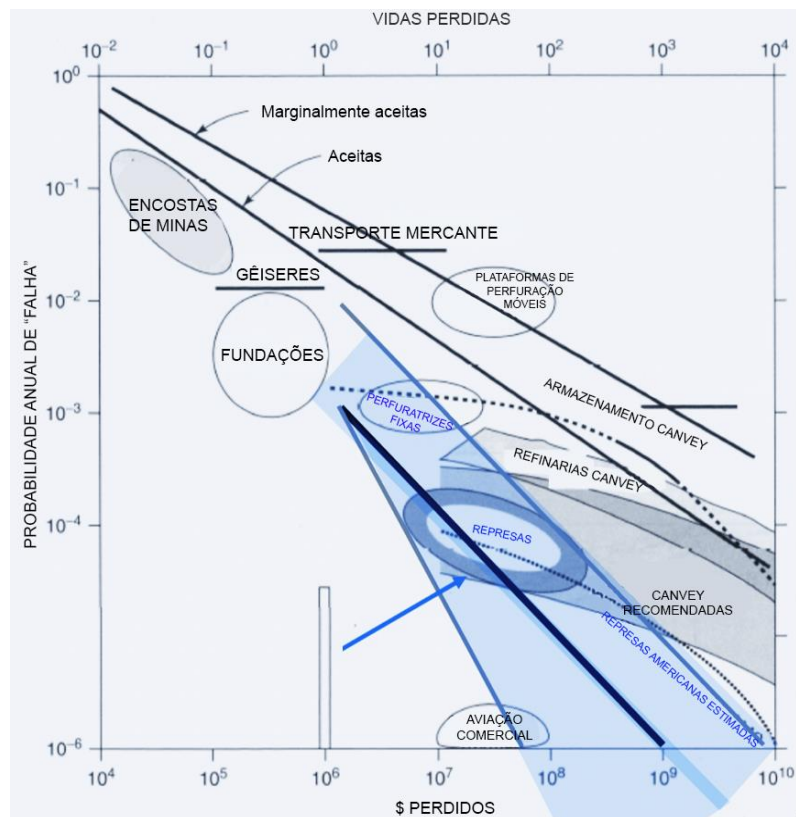


Figura 15 - Probabilidade anual de falhas e suas consequências. Fonte: Adaptado de Whitman (1984)

A condição de perigo é uma situação com potencial para provocar danos humanos ou ambientais, sendo que o evento perigoso envolve um perigo e leva a consequências desastrosas. Já o risco, é a combinação da probabilidade de ocorrência e da consequência de um evento perigoso, sendo uma função da severidade e da frequência de uma dada situação. Em outras palavras, é a relação entre perigo e consequência, sendo perigo definido como a probabilidade temporal da ocorrência de uma ameaça e, consequência a composição de:

- Vulnerabilidade aos elementos de risco – V;
- Exposição dos elementos ao risco – E; e
- Utilidade ou valor do elemento de risco – U.

Acionista de algumas das principais empresas de mineração do mundo, a Igreja da Inglaterra entrou com toda a sua força e prestígio no tema da segurança das barragens de rejeitos. A Igreja Anglicana enviou recentemente um completo questionário às principais companhias mineradoras do mundo exigindo transparência em relação aos depósitos de rejeitos sob responsabilidade de cada empresa. No questionário, a Igreja pede informações sobre quais desses depósitos estão ativos e qual é a classificação dessas estruturas em relação a diferentes “classes”, aparentemente seguindo as definições da CDA (*Canadian Dam Association*), que classifica o nível de risco associado a uma possível falha – incluindo vítimas humanas ou impactos ambientais significativos.

O Chile é o maior produtor de cobre do mundo, além de ser um país onde a indústria de mineração é bastante avançada. Um dos avanços da mineração chilena aconteceu após o rompimento da barragem de *El Cobre*, em 1965, que deixou mais de 200 vítimas fatais. A ruptura aconteceu durante um terremoto, fenômeno bastante comum no Chile. Depois disso, proibiu-se a construção de barragens com alçamento por montante, considerando a vulnerabilidade dessas estruturas ante a ocorrência de sismos de grande magnitude. A propósito, em relação construção de barragens de rejeito alteadas por montante, desde que sejam projetadas de acordo com os princípios geotécnicos básicos e que a construção e operação respeitem o projeto, são viáveis. Barragens de rejeito construídas por montante, com alto grau de confiabilidade e risco reduzido, existem, por exemplo, na Austrália e Canadá.

Dentro da análise de risco é essencial analisar todos os possíveis modos de falha de modo a determinar a probabilidade da ocorrência de cada cenário. O

objetivo das análises de risco é obter a probabilidade de ruptura ou de falha da barragem, para cada modo de falha, identificando os caminhos mais críticos, ou seja, os eventos probabilisticamente mais favoráveis de ocorrência. As empresas devem dar garantias a sociedade em relação a operação dos depósitos de rejeitos e água, definindo limites toleráveis de risco. A *Australian National Committee on Large Dams - ANCOLD*, é uma dessas organizações (Ancold, 2019).

O risco aceitável, ou tolerável, é uma exposição ao risco que é considerada aceitável para um indivíduo, organização, comunidade ou parcela ambiental. Os riscos aceitáveis são definidos em termos de probabilidade e impacto de um risco particular, permitindo definir práticas de gerenciamento de risco. Na prática, o risco costuma ser reduzido a praticamente zero devido a fatores como custo e risco secundário. Para questões de infraestrutura, por exemplo, um abrigo proposto para tsunamis, construído para suportar uma onda de 12 metros, possui modelos que indicam que um comprimento superior a 12 metros atingirá a área a cada 1,3 mil anos e essa avaliação de risco deve ser publicada para a comunidade, sendo parte do processo de aprovação do projeto. No caso dos transportes, se um motor a jato tem uma taxa de falha histórica de 0,4 por milhão de partidas, reguladores e clientes disputarão produtos com níveis menores do que esse risco. Para negócios, se um fabricante de bicicletas depende de um único fornecedor de pneus, sem um suprimento desses pneus, a receita da produção diminuirá e, a probabilidade de uma grande interrupção na oferta pode ser prevista em 0,6% ao ano, sendo que a empresa decide aceitar esse risco. Se um esportista estima uma chance de 20% de ter um osso quebrado, eles podem aceitar esse risco dado o tipo de esporte. No caso das barragens, a definição do risco e da falha é complexa, sendo uma combinação de eventos, totalmente dependentes uma das outras, o que será observado e detalhado a seguir.

As análises determinísticas analisam o caso nominal (um cenário), sem considerar todo o espectro de resultados plausíveis, e não quantifica a probabilidade do resultado. Já a análise probabilística identifica as incertezas que são fundamentais para a segurança e tenta incluir todos os cenários plausíveis, sua probabilidade e suas consequências. Geralmente, representa-se esse tipo de condição de incerteza por uma distribuição normal estatística, e os métodos consideram uma média (*mean*), um desvio padrão (SD) e um coeficiente de

variação, representado pela razão do desvio padrão e da média (coV), como observado na Figura 16.

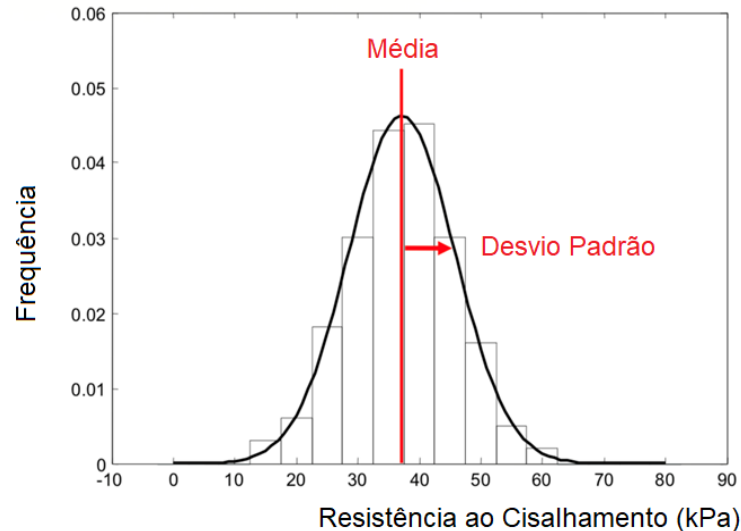


Figura 16 - Tensão cisalhante na distribuição normal. Fonte: Adaptado de Lacasse (2019)

De acordo com Londe (1993), a margem de segurança M é obtida quando se subtrai o carregamento da resistência e, necessariamente, precisa ser maior ou igual a zero para uma condição segura de projeto. Na Figura 17 temos a condição de margem de segurança, considerando a probabilidade de falha (P_f), definida como sendo a função conjunta interna da área sobreposta das distribuições de incerteza de carregamento e resistência, que resulta em uma probabilidade de falha. Em termos de resistência, o fator de segurança é a razão entre os momentos resistentes e atuantes, sendo que os valores maiores que 1,0 representam uma maior capacidade estrutural de resistir às forças instabilizantes, de acordo com sua proporcionalidade.

Dessa forma, é de se esperar que, para cada situação, dada a particularidade de cada projeto, tem-se uma margem de segurança e probabilidades de falha muitos diferentes, para pequenas e grandes incertezas, como apresentado na Figura 18.

A legislação da maioria dos países exige que o fator de segurança de uma barragem seja superior a 1,3 ou 1,5 e, na realidade, o fator de segurança não é o critério mais relevante para assegurar a segurança da barragem, uma vez que ele representa um espectro de probabilidade de falha. Uma barragem com fator de segurança 1,4 pode ser menos vulnerável que outra que tenha fator de segurança

1,79, mas que apresenta maior nível de incerteza, resultando em uma maior probabilidade de falha, conforme mostra a Figura 19.

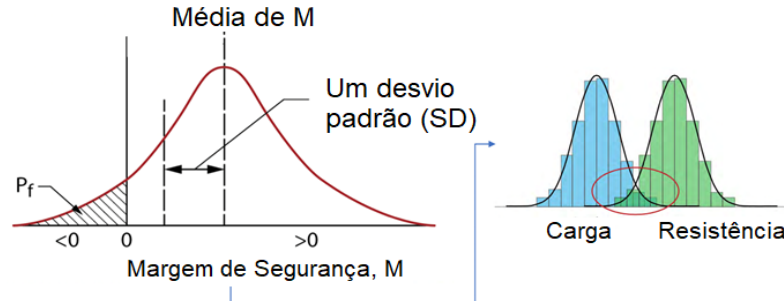


Figura 17 - Margem de segurança considerando a probabilidade de falha. Fonte: Adaptado de Londe (1993)

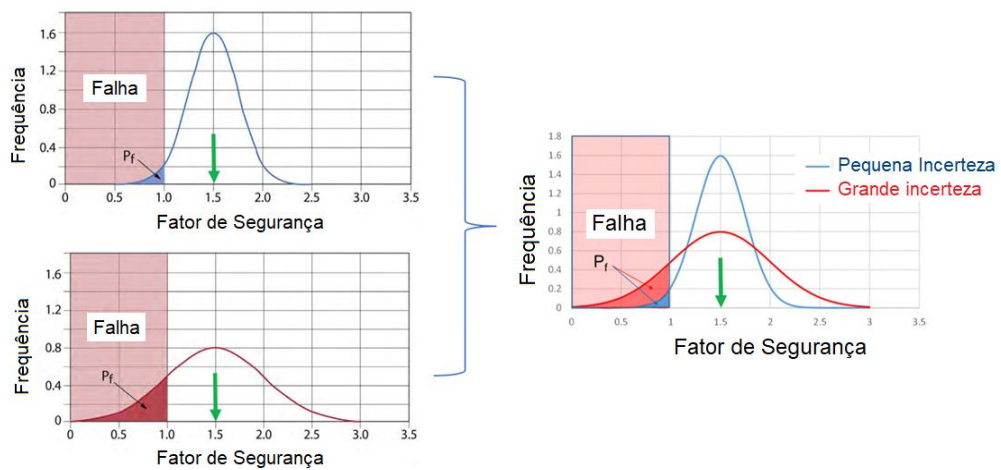


Figura 18 - Pequenas e grandes incertezas na margem de segurança. Fonte: Adaptado de Londe (1993)

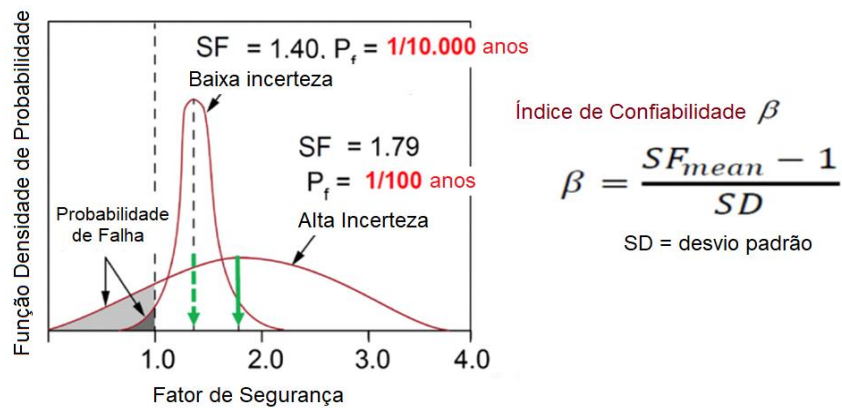


Figura 19 - Fator de segurança x Probabilidade. Fonte: Adaptado de Lacasse (2019)

Numericamente, um maior valor de fator de segurança não significa, necessariamente, uma maior margem de segurança e, deve-se calcular o índice de confiabilidade (β), sendo SD o desvio padrão. Entretanto as incertezas nos parâmetros que definem o fator de segurança não são influência exclusiva na segurança final da barragem. Outros aspectos, que não ficam contabilizados no fator de segurança, são a qualidade da engenharia, da construção e da operação. Um bom projeto, uma execução cuidadosa e uma operação seguindo as recomendações internacionais são fatores que influenciam diretamente no risco da barragem, de forma positiva e favorável.

Nesse sentido, o índice de confiabilidade (β) e a probabilidade de falha (P_f) podem ser relacionados, assumindo uma distribuição normal da probabilidade de falha, onde quanto maior o valor de β , menor a probabilidade de falha (Figura 20).

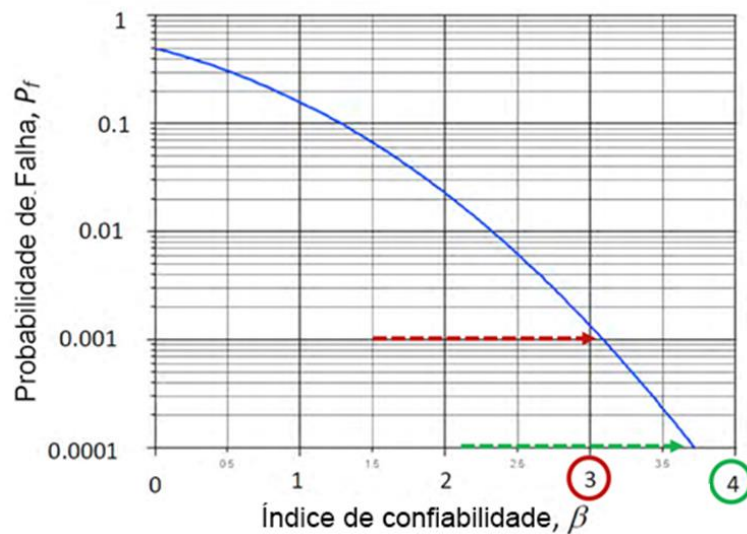


Figura 20 - Índice de confiabilidade x Probabilidade de falha. Fonte: Adaptado de Lacasse (2019)

Dessa forma, levantar a discussão das incertezas sempre leva a uma melhor compreensão do que é importante para o projeto, avaliação de segurança e monitoramento do desempenho, relacionados aos valores de FS aceitáveis ou não. As questões relacionadas a qual deve ser o objetivo de segurança durante a vida útil de uma barragem, bem como avaliações acerca de fatores de segurança determinístico fixo serem apropriados ou não para garantir o mesmo nível de segurança durante toda a vida da barragem, devem ser constantemente avaliadas.

Uma barragem em operação há 50 anos representa, no mínimo, 50 anos de experiência avaliada sob cargas operacionais e ambientais e as incertezas no momento do projeto e da construção terão mudado com o tempo. Nesse sentido, uma probabilidade de falha anual, baseada na performance da estrutura e em dados de monitoramento e inspeção, permitem uma comparação mais consistente do nível de segurança em diferentes momentos da vida de uma barragem do que um fator de segurança preestabelecido e fixo.

Nos estudos de Leps (1970), baseado em uma série de 1000 análises de estabilidade para uma seção típica de barramento, foi verificada duas superfícies de ruptura, denominadas A e B. Nas análises, verificou-se que o valor do ângulo de atrito dos materiais era totalmente dependente da tensão efetiva aplicada e da qualidade dos blocos de enrocamento. Para baixas tensões efetivas, a mesma faixa de variação de ângulos de atrito resultava em uma ruptura mais próxima do talude, ao passo de que para tensões maiores, a superfície de ruptura era mais interna. Para o ângulo de atrito, os maiores valores estavam associados à alta densidade, boa graduação e partículas muito resistentes ou bem compactadas. Já os valores mais baixos são associados à baixa densidade, materiais pouco compactados e mal graduados. Os fatores de segurança variaram entre 1,5 e 1,3, com diferentes probabilidades de falha (Figura 21).

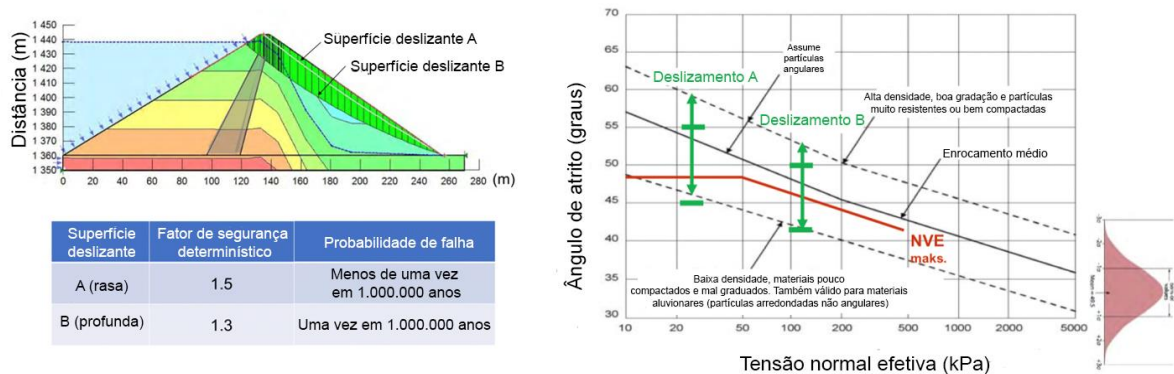


Figura 21 - Variação do fator de segurança em relação ao atrito. Fonte: Adaptado de Leps (1970)

Segundo Chambers e Bowker (2017b), as causas de ruptura de 221 casos avaliados entre os anos de 1915 e 2016, possuem uma distribuição baseada em

instabilidade de encostas e fundações, erosões internas, instabilidades sísmicas e outros fatores, conforme apresentado na (Figura 22) sendo:

- 52 – Desconhecidas: não apresentam documentação suficiente para investigação, especialmente relacionadas a barragens muito antigas;
- 44 – Galgamento: passagem de água no topo da barragem faz com que os materiais dos taludes sejam erodidos, especialmente aqueles com materiais não resistentes;
- 30 – Instabilidade de taludes em falhas estáticas: um carregamento constante causa deformações até que ocorra uma ruptura parcial ou total. Geralmente, ocasionados por saturação parcial em áreas onde a estrutura não apresenta drenagem suficiente;
- 27 – Terremotos e instabilidade sísmica: barragens são projetadas para resistir a terremotos, mas se são de grande magnitude, a estrutura pode se romper com uma vibração;
- 17 – Infiltração e erosão interna (*piping*): erosão do material por meio da passagem de água em áreas da barragem que deveriam se apresentar secas ou com drenagem controlada;
- 16 – Problemas estruturais: erros de projeto ou rupturas em estruturas que não foram projetadas adequadamente, tais como falhas em drenagens;
- 15 – Instabilidade de encostas (taludes): condições estruturais não avaliadas em uma campanha de investigação suficiente, ou negligenciadas. Geralmente associadas a barragens que foram construídas em fundações que não suportam a estrutura como, por exemplo, com camadas de solo mole abaixo da barragem;
- 12 – Múltiplas ocorrências de instabilidade (não listadas na Figura 22);
- 7 – Erosão externa: erosões na face dos taludes, típicas de precipitação e acúmulo de água em regiões localizadas; e
- 1 – Afundamento de mina (subsidiência): quando uma barragem é construída sobre uma mina subterrânea e colapso do subsolo provoca um afundamento e conseqüente ruptura.

Em um artigo publicado na Revista Science, Santamarina *et al.* (2019) apresentam uma perspectiva muito interessante sobre as falhas em barragens de

rejeito, concluindo que a análise histórica das rupturas pode auxiliar consideravelmente na previsão de novas falhas. A situação da ruptura é agravada quando se pondera as consequências enfrentadas pelas populações que vivem a jusante do barramento e, cada incidente, nos leva a obter melhor percepção física, melhorar as práticas de engenharia e implementar regulamentos para minimizar o potencial de futuras catástrofes. Há milhares de barragens de rejeito em todo o mundo e a necessidade de obter uma melhor compreensão dos mecanismos de falhas de barragens de rejeitos e usar esse entendimento para melhorar as práticas de gerenciamento, é mais do que essencial. Tal condição é ilustrada na Figura 23, que apresenta os volumes liberados e as perdas de vida em algumas falhas em barragens de rejeitos.

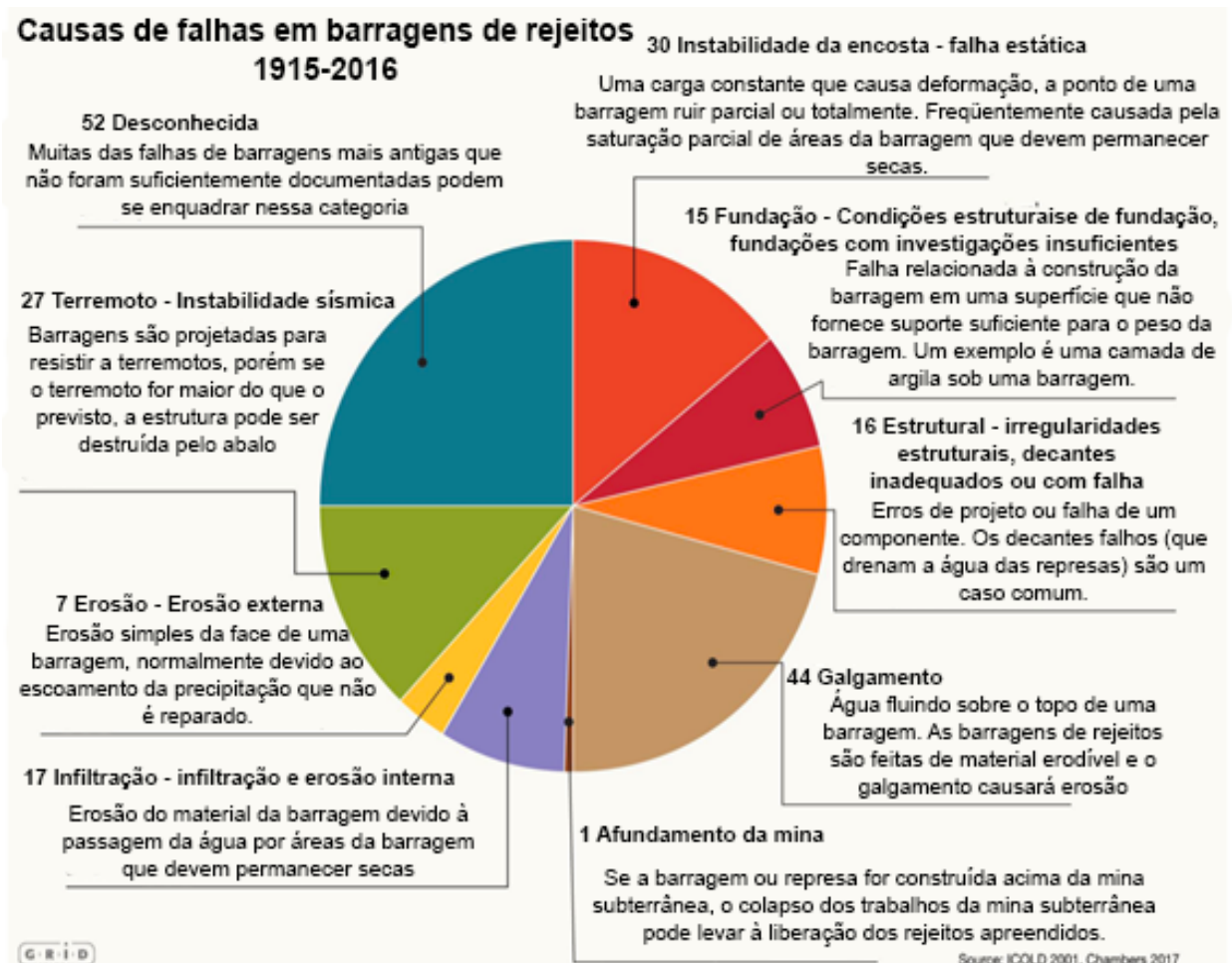


Figura 22 - Causas de rupturas em barragens, 1915 a 2016. Fonte: Adaptado de Chambers (2017b)

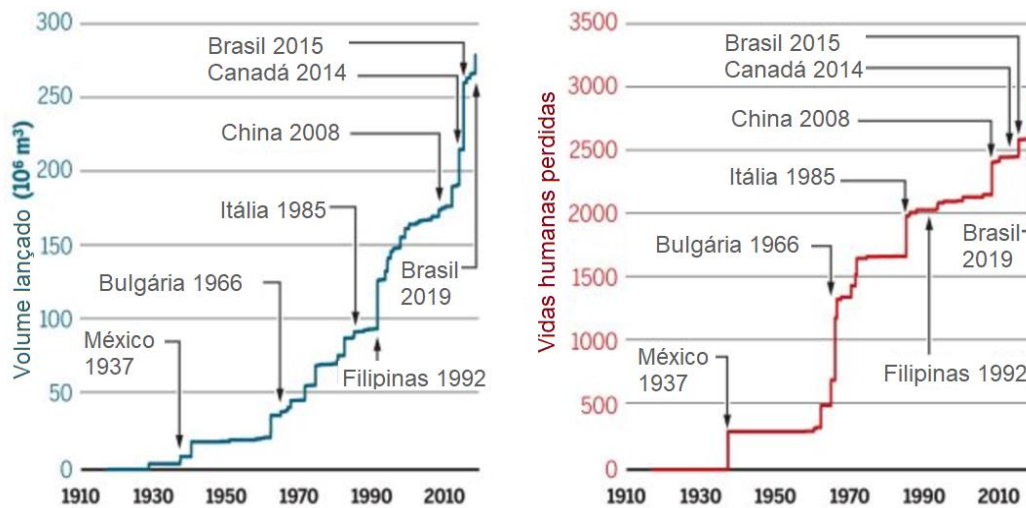


Figura 23 - Volume liberado e perdas de vida em rupturas. Fonte: Adaptado de Santamarina (2019)

Há evidências crescentes de que nossa compreensão dos mecanismos de falha nas barragens de rejeitos pode ser imperfeita. Em particular, o caso de Brumadinho desafia o conceito de que a estabilidade dos rejeitos aumenta com o tempo, dado que o reservatório havia sido desativado três anos antes do colapso e, ainda, apresentava valores de fatores de segurança consideráveis. Parte do desafio consiste em replicar nos processos de laboratório as condições reais ao longo de anos ou mesmo, em décadas. No caso de rejeitos, por exemplo, alguns minerais podem sofrer alterações químicas logo após a deposição, levando os grãos a se solidificarem e preservarem a alta porosidade. Com isso, o material se torna quebradiço e propenso a colapsar, induzindo um processo de liquefação generalizada.

Apesar dessa compreensão imperfeita, tem-se que a maioria das falhas nas barragens de rejeitos é o resultado de má gestão de riscos e regulação. Ainda citando Brumadinho, o enchimento da barragem de rejeitos parece ter prosseguido sem diretrizes muito claras de descarte de rejeitos entre 1976 e 2005, sendo um afastamento visível da prática e da engenharia consolidada nas boas práticas. Há uma crise associada à preocupação com a segurança das barragens de rejeitos e a falta de confiança no seu projeto e desempenho, sendo que a inserção de conceitos de risco e a confiabilidade auxiliam na percepção e cálculo dos fatores de segurança, permitindo atuação nas anomalias e processos que requerem uma

atenção mais imediata. Além disso, as avaliações devem ser ajustadas ao longo de toda a vida útil da barragem para avaliar as mudanças em relação à melhoria das condições instáveis ou sua deterioração. A probabilidade de falha nunca será zero e o fator de segurança, sozinho, não é suficiente para se conhecer a segurança real de uma estrutura, sendo necessário quantificar e lidar com as incertezas. As análises probabilísticas são fundamentais para uma boa análise determinística, reduzindo incertezas e permitindo decisões pautadas em argumentos assertivos.

4.1 Análise de risco

Algumas empresas aceitam o risco passivamente, e outras criam vantagem competitiva pela exposição aos riscos de forma prudente e fundamentada. A definição de risco contempla a possibilidade de perda, dano, desvantagem, impacto negativo, perigo ou ameaça de um determinado evento. Não existe risco zero, e todas as atividades envolvem um determinado grau de risco, que deve ser compreendido e gerenciado, para que seja minimizado ao máximo. A concepção de risco adquiriu amplo destaque social e industrial, constituindo um conceito operacional amplamente utilizado na engenharia e na gestão. Segundo a ABNT NBR ISO 31000, de 2018, o risco está associado a um evento ou acontecimento, sendo uma grandeza que resulta da combinação da probabilidade e da severidade de consequências devido a falhas potenciais.

Os tipos de risco caracterizam-se de três formas, sendo elas o risco humano, o risco técnico ou tecnológico e os riscos incontroláveis. Os riscos humanos são diretos ou indiretos e têm a participação da figura humana, sendo falhas voluntárias, tais como corrupção, desvios e contrabandos, ou relacionadas à negligência, imperícia ou imprudência. Já os riscos técnicos ou tecnológicos são normalmente associados à tecnologia, pois, devido ao seu avanço muitas empresas acabam tornando-se refém desses dispositivos, e todo *software* ou equipamento tem pontos vulneráveis. Além disso, há um investimento de alto valor nessas tecnologias e em treinamento para os funcionários aprenderem a operá-las, o que remete ciclicamente ao risco humano. Os riscos incontroláveis são todos os riscos em que não se tem poder sobre, mas que podem ser mensurados a partir de avaliações técnicas, tais como enchentes, inundações, raios e terremotos. Ainda devem ser considerados riscos mercadológicos, como mudanças na legislação, flutuação de moedas e

exigências do mercado em relação à qualidade dos produtos, como demanda por energia elétrica e teores de minerais.

O gerenciamento do risco deve ser elaborado em etapas, partindo do princípio do conhecimento de qual o risco está sendo considerado. A etapa seguinte, de análise do risco, considera que deve haver a identificação do perigo e suas causas, bem como a estimativa do risco em função da gravidade do dano e da sua frequência de ocorrência. A avaliação do risco identifica o que pode ser feito para a redução dos cenários de risco, sendo seguida da etapa de controle, onde são elaborados e implementados os procedimentos desenvolvidos para redução e mitigação do evento. Por fim, deve-se fazer uma análise dos resultados obtidos, reavaliando as etapas anteriores e verificando se o modelo é satisfatório. Há várias metodologias desenvolvidas para elaboração do gerenciamento de riscos e, a escolha é realizada conforme a preferência do autor. Para Schenini *et al.* (2006), esse processo é dividido em quatro etapas, sendo:

- Etapa 1 - análise e avaliação dos riscos, na qual é realizada a constatação dos potenciais riscos;
- Etapa 2 - identificação das alternativas de ação, na qual se chega-se a um parecer quanto a evitar, reduzir, transferir ou assumir os riscos;
- Etapa 3 - elaboração da política de riscos, para designação dos objetivos e programas de prevenção; e
- Etapa 4 - execução e controle das medidas de segurança adotadas, a fim de concretizar as etapas anteriores e seu controle.

Por sua vez, a Norma AS/NZS 4360 (2004), primeira norma do mundo internacionalmente difundida sobre gerenciamento de riscos, propõe que o processo seja realizado em cinco etapas, conforme apresentado na Figura 24. As etapas do processo de gerenciamento de riscos, proposto pela AS/NZS 4360 são descritas por Oliveira (2009) da seguinte maneira:

- Comunicação e consulta - informar e consultar as partes internas e externas envolvidas em cada etapa do processo de gestão de riscos e em relação ao processo como um todo;

- Estabelecimento dos contextos - estipular o contexto interno, o externo e o da gestão de riscos, bem como os critérios em relação aos quais os riscos serão avaliados e a estrutura da análise;
- Identificação de riscos - identificar conjunturas, combinações de conjunturas e estados de um sistema que possam levar a um episódio indesejável;
- Análise de riscos - identificar e analisar os riscos e controles existentes. Envolve determinar o nível de risco considerando as consequências potenciais, da ocorrência e da probabilidade dos eventos;
- Avaliação de riscos – quantificar os riscos por meio de sua probabilidade e das possíveis consequências expressas em danos pessoais, materiais ou financeiros para que sejam tomadas decisões quanto à extensão, natureza e prioridade das ações necessárias para mitigação desses eventos indesejados;
- Tratamento de riscos - elaborar e colocar em prática estratégias e planos de ação referentes aos riscos detectados, com o intuito de aumentar os benefícios e diminuir os custos potenciais. Para Alberton (1996), essa etapa aborda somente um dos seguintes caminhos: eliminação, redução, retenção ou transferência dos riscos detectados nas etapas anteriores; e
- Monitoramento e análise crítica - monitorar e, caso necessário, proceder as modificações necessárias para garantir a melhoria contínua do processo. Essa fase monitora a eficácia de todas as etapas do processo de gestão de riscos.

As incertezas em barragens que podem afetar a quantificação dos riscos, podem ser divididas em três categorias, sendo associada a fatores naturais ou ambientais, fatores internos e socioeconômicos. Uma vez que é reduzida a possibilidade de atuação de um fator externo, natural ou ambiental, a estrutura fica submetida ao desempenho dos fatores internos, tais como projeto, construção, operação e manutenção. Os fatores socioambientais são riscos externos, como aumento de população e infraestrutura no vale de jusante, bem como ocupação indevida de áreas.

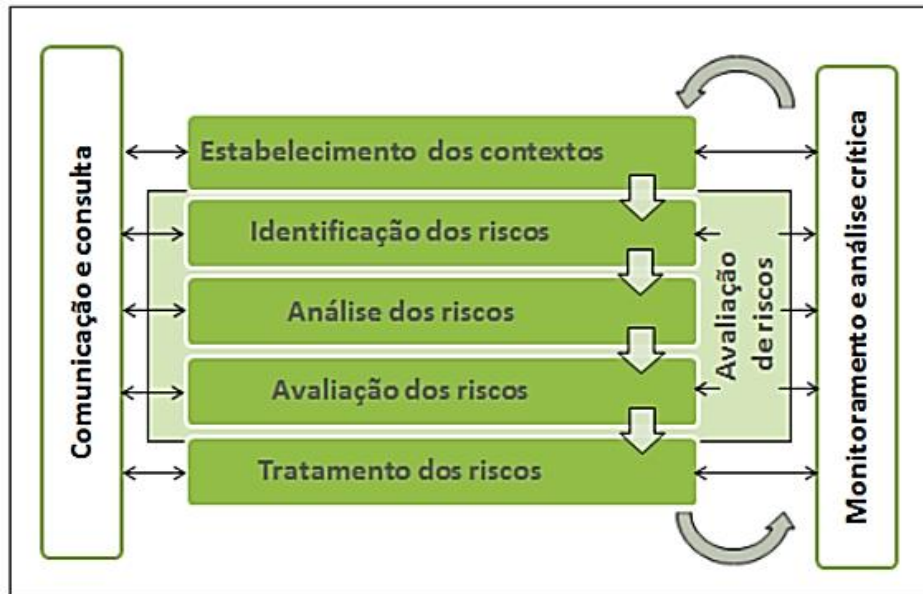


Figura 24 - Processo de gestão e risco. Adaptado de Oliveira (2009)

Para fatores naturais ou ambientais tem-se eventos que estão fora do nosso controle direto, dentre eles o risco hidrológico, sismicidade, escorregamentos de massa em reservatório e ações agressivas. Apesar de não se ter controle sobre tais fatores, é completamente viável o seu monitoramento para que na medida em que sejam iniciados, sejam finalizados ou controlados antes da sua progressão. O risco hidrológico é a probabilidade de falha de uma estrutura hidráulica face à ocorrência de vazão superior para a qual foi dimensionada. A sismicidade no Brasil é modesta quando comparada com a região andina, mas, além dos sismos naturais, há as condições de sismo induzido proveniente das detonações, que precisam ser considerados como um fator de risco. As ações agressivas referem-se às intempéries como, chuva, vento, calor, entre outros, que causam desagregação e envelhecimento dos materiais.

Já os fatores internos são aqueles associados diretamente à barragem, tais como riscos de operação no reservatório (falta de energia, obstruções em equipamentos, entre outros), geológicos (como feições geológicas desconhecidas), estruturais, associados ao monitoramento, técnico-organizacionais, gestão de emergência e risco de ruptura de barragens em cascata. As questões estruturais podem ser atribuídas a definições incorretas de carregamentos e parâmetros de projetos, incertezas nas propriedades dos materiais, variabilidade natural das propriedades, simplificação inadequada de modelos e utilização de métodos

construtivos inadequados. No caso do monitoramento, têm-se inspeções visuais sem conhecimento dos aspectos necessários e, até mesmo, falha na coleta e tratamento de dados. Deve-se considerar como risco técnico-organizacional questões relativas a foco excessivo na economia a qualquer custo, omissão de assuntos relevantes, problemas de comunicação e ingerência. Por fim, na gestão de emergências, têm-se as incertezas na elaboração dos Planos de Ação Emergencial, falhas em planejamento de ações de resposta, e falta de mapas de zoneamento de áreas de risco e de sistemas de alerta de emergência.

As consequências para segurança pública, tais como mortes e doenças, além das consequências ambientais e econômicas, todas referentes a danos e perdas, são, geralmente, associadas aos fatores socioeconômicos.

A identificação correta dos riscos permite ter a noção do que está equivocado, além dos fatos causadores e de suas consequências. Dessa forma, é possível avaliar os riscos, quantificando as probabilidades de ocorrência e gravidade das consequências, avaliando o significado do risco por intermédio do exame e julgamento da situação. O processo decisório de como tratar os riscos identificados é a resposta ao risco, que subsidiará o plano de ação para tratamento dos riscos não eliminados.

Existe uma gama de ferramentas e metodologias de análise de risco que podem ser utilizadas para esses propósitos, auxiliando na definição de um modelo sólido e aplicável. Dentre elas, têm-se:

- Análise Preliminar de Perigos (APP);
- Análise Preliminar de Riscos (APR);
- Metodologia *What-if*;
- Estudo do Perigo e da Operabilidade (HAZOP – *Hazard and Operability Study*);
- HACCP – *Hazard Analysis of Critical Control Points*;
- HAZID – *Hazard Identification Study*; e
- Árvore de Eventos ou Árvore de Decisão, Avaliação do Nível de Integridade e Segurança (SIL).

Independentemente do modelo aplicado, as técnicas de análise podem ser caracterizadas como dedutivas ou indutivas. As técnicas dedutivas consideram o

perigo, aspecto ambiental ou desvio de processo para as causas e consequências com objetivo de propor ações mitigadoras. As técnicas indutivas, ao contrário, investigam os possíveis efeitos de um evento desejado partindo de um desvio ou evento indesejado, para avaliar as causas e consequências e, assim, propor ações mitigadoras.

Uma divisão mais usual é em relação ao aspecto qualitativo e quantitativo do estudo. As técnicas qualitativas são fundamentadas no conhecimento das variáveis envolvidas no processo a ser investigado, podendo-se fazer o uso de bancos de dados para o levantamento dos acontecimentos indesejados. Entretanto, a severidade de tais acontecimentos não é calculada.

Já as técnicas quantitativas têm por objetivo quantificar a fragilidade da área analisada e o efeito em termos de danos materiais, ambientais e físicos aos indivíduos dentro e fora da organização, podendo utilizar-se de modelos matemáticos e simuladores.

É válido considerar que a aplicação das metodologias de análise de risco deve considerar o nível estratégico de uma instituição, com a alta cúpula administrativa e cenários de longo prazo, preparando as empresas para o crescimento. Também devem contemplar um nível tático, com as gerências e análises de curto prazo e, um terceiro nível, operacional, com os riscos imediatos e mais visíveis em função de maiores exposições.

As técnicas qualitativas e indutivas são HAZOP, HACCP HAZID, e *What if*, sendo a APR e APP análises qualitativas dedutivas. Para as análises quantitativas e indutivas, tem-se a SIL. A seguir, serão descritas quatro das principais ferramentas utilizadas para as análises de risco: APP, APR, "*What if*", HAZOP e Árvore de eventos.

A análise preliminar de perigos (APP) é uma metodologia estruturada para identificar os potenciais perigos decorrentes da instalação de novas unidades e sistemas ou da própria operação da planta que opera com materiais perigosos. Já a APR é uma técnica de identificação de perigos e análise de riscos que consiste em identificar eventos perigosos, causas e consequências, estabelecendo medidas de controle. É identificada como "preliminar" pelo fato de ser utilizada como primeira abordagem do objeto de estudo e, em um grande número de casos, é suficiente para estabelecer medidas de controle de riscos. O objeto pode ser uma área, sistema, procedimento, projeto ou atividade, sendo focado em todos os perigos do

tipo evento perigoso ou indesejável. Após a aplicação dessa ferramenta, é feita uma avaliação qualitativa dos riscos associados, identificando-se, dessa forma, aqueles que requerem priorização. Além disso, são sugeridas medidas preventivas e/ou mitigadoras dos riscos a fim de eliminar as causas ou reduzir as consequências dos cenários de ruptura identificados. Geralmente, os dados necessários são demográficos, climatológicos, instalações, premissas de projeto, especificações técnicas de projeto e de equipamentos, *layout* de instalação, descrição dos principais sistemas de proteção e segurança, substâncias envolvidas, propriedades físicas e químicas.

Um cenário crítico é definido como sendo o conjunto formado pelo risco identificado, suas causas e cada um de seus efeitos. Um exemplo é a grande liberação de substâncias tóxicas devido à ruptura de uma barragem de rejeitos. Os cenários devem ser classificados em categorias de frequência, as quais fornecem uma indicação qualitativa da frequência esperada de ocorrência para cada um dos cenários identificados, como apresentado na Tabela 8. Essa avaliação de frequência poderá ser determinada pela experiência dos componentes do grupo ou por banco de dados de rupturas e anomalias.

Tabela 8 - Categorias de Frequências de acordo com cenários. Fonte: Adaptado de Cardella (2008)

Categoria	Denominação	Faixa de frequência anual	
A	Extremamente remota	$f < 10^{-4}$	Possível, mas improvável de ocorrer durante a vida útil do processo/ instalação
B	Remota	$10^{-4} < f < 10^{-3}$	Não se espera que ocorra durante a vida útil do processo/instalação
C	Improvável	$10^{-3} < f < 10^{-2}$	Pouco provável que ocorra durante a vida útil do processo/instalação
D	Provável	$10^{-2} < f < 10^{-1}$	Esperado ocorrer até uma vez durante a vida útil do processo/instalação
E	Frequente	$f < 10^{-1}$	Esperado ocorrer várias vezes durante a vida útil do processo/instalação

Os cenários também devem ser classificados em categorias de severidade, as quais fornecem uma indicação qualitativa da severidade esperada de ocorrência para cada um dos cenários identificados, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Categorias de Severidade dos riscos identificados. Fonte: Adaptado de Cardella (2008)

Categoria	Denominação	Descrição/características
I	Desprezível	Sem danos ou danos insignificantes aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente. Não ocorrem lesões/mortes de funcionários, de terceiros (não funcionários) e/ou pessoas (indústrias e comunidade), o máximo que pode ocorrer são casos de primeiros socorros ou tratamento médico.
II	Marginal	Danos leves aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente (os danos materiais são controláveis e/ou de baixo custo de reparo). Lesões leves em empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade.
III	Crítica	Danos severos aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente Lesões de gravidade moderada em empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade (probabilidade remota de morte). Exige ações corretivas imediatas para evitar seu desdobramento em catástrofe.
IV	Catastrófica	Danos irreparáveis aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente (reparação lenta ou impossível). Provoca mortes ou lesões graves em várias pessoas (empregados, prestadores de serviço ou membros da comunidade).

É importante observar que cada classe de severidade e frequência deve ser adequada ao tipo do sistema e empreendimento analisado, para tomar a análise do risco mais preciso e menos subjetivo. Por fim, é possível estabelecer uma matriz de risco, que é o produto da severidade e frequência dos eventos, conforme Tabela 10.

A metodologia “*What-if*” é uma técnica de simples aplicação que auxilia na identificação e detecção de riscos, em qualquer fase do projeto ou processo. A aplicação da ferramenta consiste em reuniões de uma equipe especializada, conhecedora do processo, que avalia o fluxo o processo, os subprocessos envolvidos, as entradas e saídas e, com base no conhecimento de cada integrante, são levantadas questões do tipo “*What if?*”, ou, em Português, “E se?”. Ao responder à questão levantada, a equipe não precisa, necessariamente, ir fundo na pesquisa e

identificação das causas e consequências. Eventualmente, essas causas e consequências podem ser melhor detalhadas, assim como as medidas de mitigação e prevenção, por meio de outras ferramentas.

Tabela 10 - Matriz de Risco da APP ou APR. Fonte: Adaptado de Cardella (2008)

SEVERIDADE		A	B	C	D	E
		IV	2	3	4	5
III	1	2	3	4	5	
III	1	1	2	3	4	
I	1	1	1	2	3	

Severidade	Frequência	Risco
I Desprezível	A Extr. Remota	1 Desprezível
II Marginal	B Remota	2 Menor
III Crítica	C Improvável	3 Moderado
IV Catastrófica	D Provável	4 Sério
	E Frequente	5 Crítico

O termo HAZOP significa, em inglês *Hazard and Operability Study*, ou Estudo de Perigos e Operabilidade, foi desenvolvido na década de 60 pela *Imperial Chemical Industries Ltd* (ICI), no Reino Unido. Consiste em uma metodologia qualitativa para a identificação de risco ligado ao processo e, esses riscos podem, de fato, afetar pessoas, equipamentos, ambiente e demais elementos contidos. A investigação do processo é feita de maneira aprofundada, detectando as possibilidades de variação do padrão projetado. Outro ponto abordado pela metodologia é o reconhecimento de problemas que possam afetar os resultados da operação e promovam a redução da qualidade. O HAZOP vai além da identificação dos riscos, permitindo também evidenciar as suas causas e consequências, bem como prover ações corretivas e preventivas para as mesmas. Ele é, geralmente, aplicado na fase de planejamento do projeto, então quando os custos para alteração em alguma atividade ainda não são tão altos, se comparado aos da fase pós-implementação. Porém nada impede sua realização em qualquer uma das fases.

O HAZOP possui dois pontos focais: problemas de segurança e problemas de operabilidade. Os de segurança dizem respeito aos riscos corridos pelos

colaboradores e pelo maquinário. Já os de operabilidade não oferecem esses perigos; todavia, comprometem a produção, podendo afetar sua qualidade e eficiência, por exemplo. Para a realização do HAZOP, é necessária, sobretudo, uma equipe multidisciplinar para avaliar o processo sob diversas esferas e sob diferentes pontos de vista. E, para isso, é realizada uma série de reuniões. Na Figura 25 é apresentado um fluxograma com as etapas do modelo e, posteriormente, uma descrição de cada passo.

As causas dizem respeito aos motivos pelos quais o desvio acontece e as consequências relatam os efeitos trazidos pelo desvio em questão. Já as providências são as ações necessárias para que o desvio não ocorra e o processo possa ser seguido como planejado, gerando os resultados dentro das especificações. Na detecção tem-se o modo por intermédio do qual o erro pode ser constatado, como um alarme industrial, por exemplo. Nesse ponto são citadas e descritas as salvaguardas utilizadas para a prevenção e contenção das causas e consequências dos desvios. No ponto de detecção é importante avaliar se as salvaguardas utilizadas são suficientes para a contenção dos problemas. Isso pode ser realizado por meio de outra ferramenta, como a LOPA (*Layers of Protection Analysis*), que considera análises em camadas, ou barreiras. Todas essas informações devem ser consolidadas em algum tipo de planilha, de modo que facilite a identificação e organização das informações por todos os interessados. Outros pontos, como “observações” e “responsável” – que vem a ser a pessoa ou grupo encarregado de realizar as ações planejadas anteriormente – podem ser acrescentados, desde que ajudem na aplicação do método e da organização dos dados obtidos.

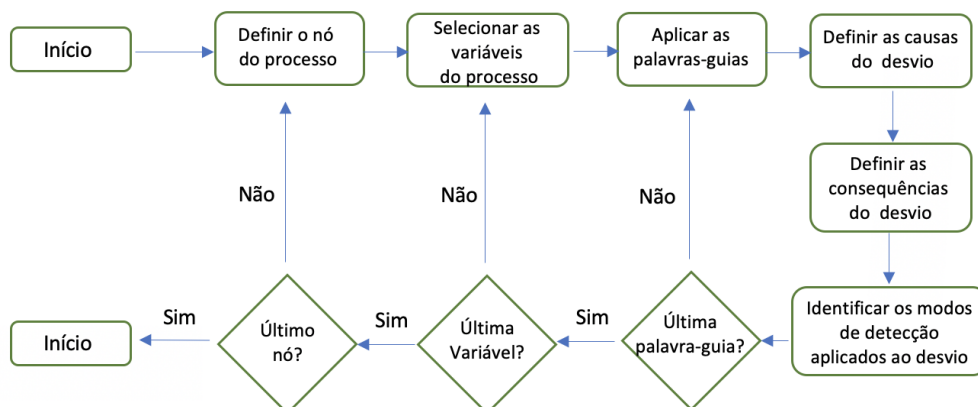


Figura 25 - Fluxograma típico do processo HAZOP. Fonte: Elaborado pela autora

A árvore de eventos é uma das ferramentas mais utilizadas, pela facilidade de sua aplicação, versatilidade e precisão, sendo o princípio básico a definição de uma árvore com “nós” de incerteza e, cada ramificação, tem uma flexibilidade para se adaptar à situação inicial. Uma das vantagens desse método é a flexibilidade em função dessas ramificações. No entanto, se forem muitas extensas, dificultam a avaliação. Uma árvore do evento começa com uma condição identificada de falha e prossegue com uma análise para diante, indutiva, dos relacionamentos causais envolvidos no sistema em consideração. Essa análise para diante segue todas as sequências de eventos possíveis que conjuntamente descrevem todas as consequências do evento da falha. A estrutura diagramática que descreve esses resultados em uma série de eventos discretos conectados entre si constitui-se em uma árvore do evento. Cada ramo representa um estado possível do sistema.

A sequência de eventos nessa análise de consequências permite que sejam identificados os possíveis cenários (sequências de eventos) resultantes de um dado evento inicial. O aprofundamento da árvore em certas direções reflete o grau de detalhamento desejado. Na Figura 26, tem-se um exemplo de árvore para a fase de construção e operação de uma barragem, considerando o galgamento da estrutura.

Após a definição do evento inicial e dos sistemas de segurança (ações) que podem amortecer o efeito do evento inicial, executa-se a combinação em uma árvore lógica de decisão com as várias sequências de acontecimentos que podem surgir a partir do evento inicial. Uma vez construída a árvore, calculam-se as probabilidades associadas em cada ramo do sistema, que sempre deve fechar em 1, ou seja, 100%. Geralmente, é difícil determinar as probabilidades de forma objetiva por se tratar de probabilidades condicionais, dependentes da ocorrência dos eventos precedentes. A natureza inerentemente binária do método, com cada ramo indicando uma dicotomia “falha, não-falha” poderia, em princípio, ser superada. Mesmo assim, o método continuaria limitado, pois sistemas degradam frequentemente sem experimentar falha repentina. A introdução de tais modalidades de falha introduziria, no entanto, uma complexidade considerável na árvore do evento. As correlações estatísticas entre eventos podem afetar as probabilidades da sequência, e são difíceis de avaliar com os dados disponíveis. A probabilidade final do evento é calculada com a multiplicação de todas as probabilidades de cada processo, no ramo desejado. Em linhas gerais, os passos para uma árvore de eventos consistente devem considerar, sequencialmente:

- a) Inspeção de campo;
- b) Análises dos modos de falha potenciais, tais como erosões internas, deslizamentos nos taludes naturais e artificiais, galgamento, falhas na fundação e, inclusive, erros humanos de operação. Também devem ser avaliados gatilhos externos, tais como inundações, nevascas, tremores, sabotagem, dentre outros;
- c) Definição das incertezas associadas a cada modo de falha;
- d) Construção da árvore;
- e) Avaliação das probabilidades;
- f) Avaliação dos resultados; e
- g) Iteração.

O processo de avaliação dos perigos obtidos na árvore é centrado na compreensão da probabilidade de ocorrer um evento, e nas consequências associadas a esse perigo, podendo ser avaliados com base em algumas definições:

- Consequências
 - Catastróficas: com perdas de vida;
 - Críticas: danos severos;
 - Marginal: danos menores; e
 - Negligenciável: danos superficiais.
- Probabilidade
 - Frequente, Provável, Ocasional, Remoto, Improvável e Impossível.

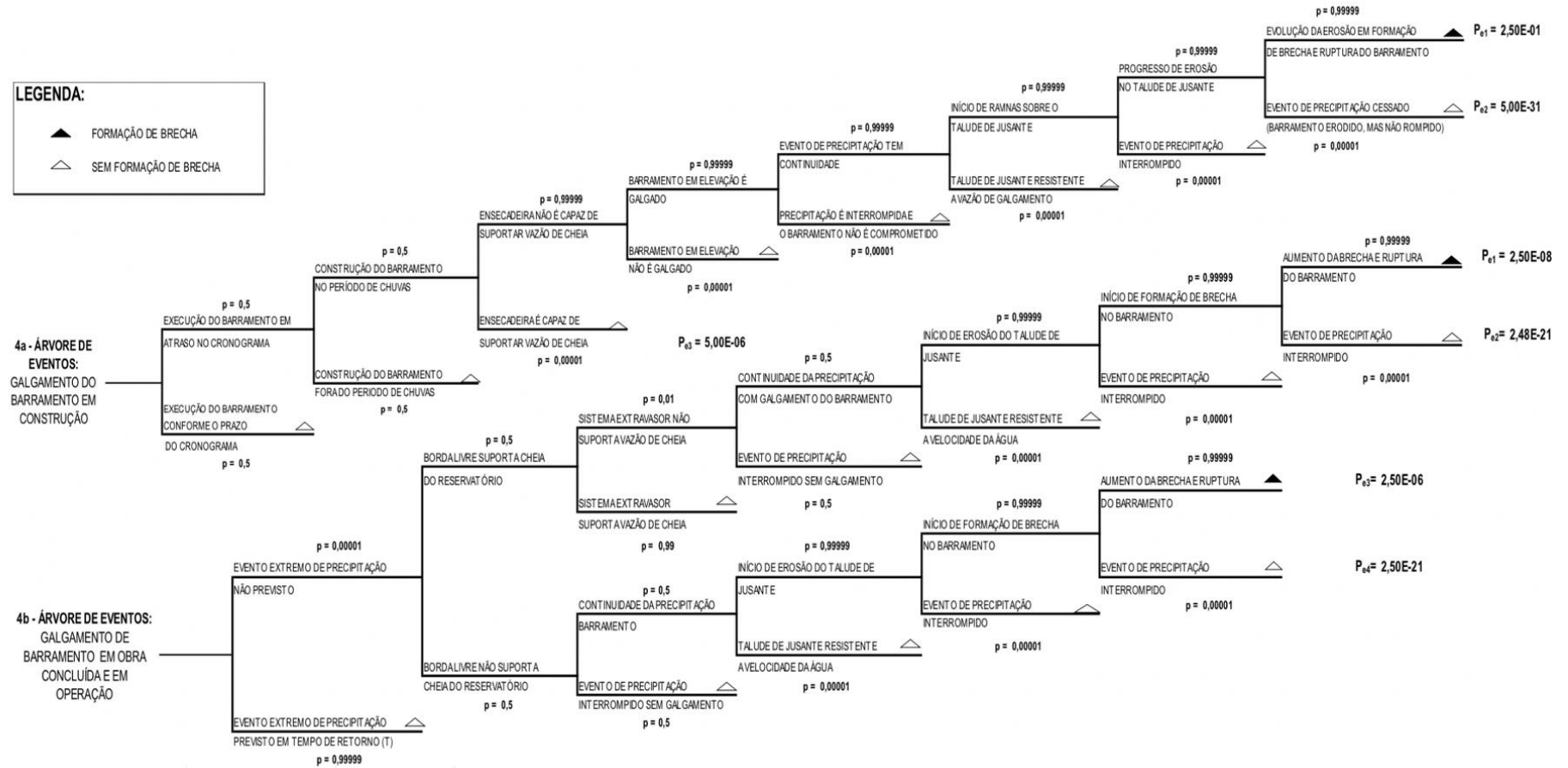


Figura 26 - Árvore de Eventos sob o cenário do galgamento para o barramento em construção (4a) e em operação (4b). Fonte: RESAG (2017)

Brazendale e Bell (1994) definem as consequências como uma margem entre o aceitável e o inaceitável, sendo a interface intermediária denominada de *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP), e atribuída aos eventos com maior probabilidade de acontecer e que devem ter os níveis mais baixos possíveis. Os riscos inaceitáveis são aqueles que ameaçam a vida humana em que o sistema deve ser projetado de modo que tais riscos não possam surgir ou, se ocorrerem, os recursos do sistema garantam que sejam detectados antes que causem um grande dano. Os riscos tão baixos quanto razoavelmente práticos são aqueles que têm consequências menos sérias ou que são sérios, mas têm uma probabilidade muito baixa de ocorrência. O sistema deve ser projetado de forma que a probabilidade de um incidente surgir devido a um risco seja minimizada, sujeita a outras considerações, como custo e entrega. Um risco ALARP para uma bomba de insulina, por exemplo, pode ser a falha do sistema de monitoramento de *hardware*. As consequências disso são, na pior das hipóteses, uma “subdosagem de insulina” a curto prazo, e uma situação que não levaria a um incidente grave. Os riscos aceitáveis são aqueles em que os incidentes associados normalmente resultam em danos menores. Os projetistas devem tomar todas as medidas possíveis para reduzir os riscos "aceitáveis", desde que não aumentem os custos, o tempo de entrega ou outros atributos. Para os inaceitáveis, a consequência é um incidente com danos severos e, para o nível aceitável, deve-se evitar que surjam erros. Na Figura 27 tem-se o triângulo de riscos que evidencia as regiões propostas por Brazendale em 1994. As probabilidades podem ser estimadas em alta, média e baixa, conforme exemplos na Tabela 11.

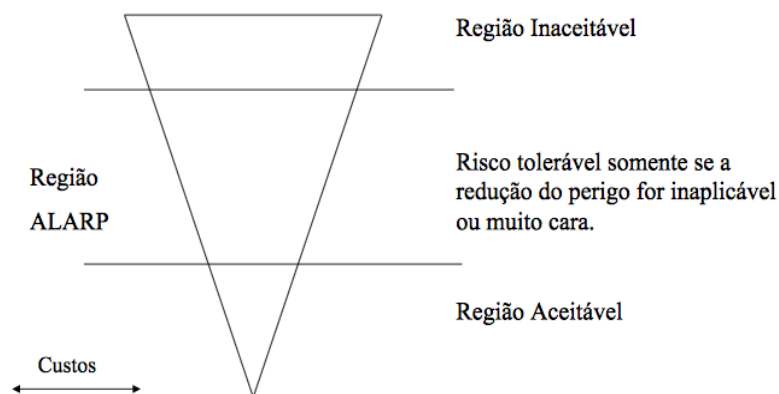


Figura 27 - Triângulo de riscos. Adaptado de Brazendale e Bell (1994)

Tabela 11 - Triângulo de riscos. Adaptado de Brazendale e Bell (1994)

Perigos	Probabilidade	Severidade	Risco estimado	Avaliação
Sem retorno energia	Média	Alta	Alto	Intolerável
Picos de energia constantes	Média	Baixa	Baixo	Aceitável
Picos de energia intermitentes	Alta	Baixa	Baixo	Aceitável
Interferências elétrica	Baixa	Alta	Médio	ALARP

4.2 Análise de falha

Para as análises de falha, tem-se ferramentas qualitativas e indutivas, sendo:

- Análise da Árvore de Falhas FTA – *Fault Tree Analysis*;
- Análise de Efeitos e Consequências (AQR);
- Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*); e
- Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA - *Failure Mode and Effect Analysis*).

As técnicas qualitativas e indutivas são FMEA e FMECA, sendo a AQR uma análise quantitativa e indutiva e a FTA do tipo quantitativa e dedutiva.

A análise dos modos de falha do tipo FMEA permite que as anomalias sejam avaliadas sob a perspectiva da função na estrutura onde ocorrem, considerando a ocorrência, detecção e severidade. Trata-se de uma análise aprofundada que permite a identificação dos modos de falha individuais de cada anomalia, explorando as consequências das causas e efeitos.

O Índice de Ocorrência (O) representa a probabilidade da ocorrência da anomalia que resultará em uma falha, ou seja, a frequência com que essas falhas podem ocorrer por ano, variando de 1 a 10, por exemplo e, quando maior o Índice de Ocorrência, maior será a probabilidade de ocorrência da falha.

O Índice de Detecção (D) considera a possibilidade de serem detectados novos modos de falha antes que elas ocorram e varia em uma escala similar ao índice de ocorrência. No caso das barragens é um importante índice, uma vez que alguns mecanismos deflagradores de falhas não demonstram sinais claros ou a tempo se se evitar a ruptura. É por esse motivo que as inspeções devem ser realizadas por equipe extremamente qualificada, considerando os mais elevados critérios de avaliação, uma vez que a situação envolve um alto risco e um elevado potencial de dano.

O Índice de Severidade (S) considera os impactos e danos resultantes da falha e também varia em uma escala similar aos índices anteriores, sendo que quanto maior a severidade, maior o dano associado.

De acordo com a Metodologia FMEA, a interação multiplicadora entre os três índices ocorre com o cálculo do Número de Potencial de Risco (RPN), representado em uma matriz de risco bidimensional, característica do modelo. De acordo com as faixas de RPN obtidas em cada análise, deve-se propor uma segmentação do RPN, no mínimo, em três faixas, tais como Falhas Brandas, Intermediárias e Severas. Quanto maior o valor de RPN, menor a tolerância para determinado evento, ou seja, maior deve ser a assertividade na resposta e medidas imediatas devem ser implantadas.

Na Figura 28, tem-se um modelo de matriz para essa análise qualitativa, separada em escala de cores para uma melhor representatividade do risco de falha. Quanto maior o índice de ocorrência e a severidade, mais intensas as cores, que significam um maior grau de comprometimento da estrutura. Quanto menor o índice de ocorrência e a severidade, mais brandas as cores, que significam um menor grau de comprometimento da estrutura. Nesse caso, os eventos críticos, ou seja, o funcionamento de determinado item estrutural, são aqueles que se encontram nas porções superiores à direita.

De forma geral, as análises FMEA direcionam o Plano de Ação Geotécnico no sentido de priorizar atendimento ao funcionamento de estruturas com maior RPN e maior proximidade na lateral direita e superior da matriz. O ordenamento prioritário do plano de ação cabe à decisão de cada sistema de gestão e da aceitação ou não de determinado risco e falha a que cada empresa acredita e aceita se submeter.

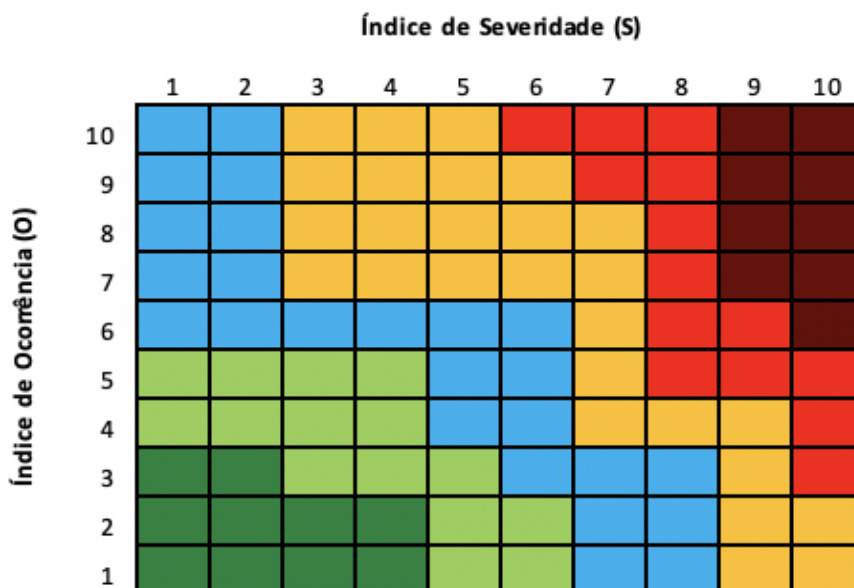


Figura 28 - Matriz FMEA. Fonte: Elaborado pela autora

4.3 Estudos de *Dam Break*

Os estudos de ruptura de barragens permitem a definição de um mapa de inundação, essencial para a elaboração dos planos de ação emergencial, bem como quantificação dos danos e riscos, classificação do dano potencial associado, estabelecimento dos requisitos legais e dos termos necessários para responsabilidade social e ambiental.

Para as barragens de água, há diversos guias disponíveis na literatura para modelagem das estruturas, com modelos numéricos diversificados e a simplificação de se ter a água considerada como um fluido newtoniano. Um fluido newtoniano é um fluido cuja viscosidade, ou atrito interno, é constante para diferentes taxas de cisalhamento e não variam com o tempo, sendo a constante de proporcionalidade definida pela viscosidade. Nesse tipo de fluido, a tensão é diretamente proporcional à taxa de deformação. No caso das barragens de rejeito, os modelos são mais complexos, uma vez que os fluidos são mais viscosos que a água e considerados como não newtonianos. Um fluido não newtoniano é um fluido cujas propriedades são diferentes dos fluidos newtonianos, mais precisamente quando a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Como consequência, fluidos não newtonianos podem não ter uma viscosidade bem

definida. Nesse caso, ainda deve-se considerar o percentual de sólidos que fica retido no reservatório, com base nas taxas de adensamento, sendo uma modelagem numérica complexa e que deve ser realizada em vários cenários e etapas.

Nos estudos de *Dam Break*, ou de ruptura hipotética, é importante estabelecer os prováveis cenários de falha e, para cada um deles, estimar o volume de rejeitos, sedimentos e água a ser propagado. Os estudos hidrológicos permitem as definições das vazões, afluentes e defluentes. Com a estimativa do teor de sólidos no reservatório, é possível definir se a modelagem será em termos de modelos newtonianos ou não newtonianos, o que determinará a simulação hidráulica a ser realizada. Após a elaboração dos mapas de inundação, é muito importante que sejam realizadas análises de sensibilidade, para determinar o efeito de uma variação de um determinado parâmetro na formação da mancha final.

A análise de sensibilidade identifica as variáveis que determinam o sucesso, ou fracasso, de um projeto, mas não mede o risco associado a essas variáveis.

A simulação de eventos de ruptura de barragens é fundamental para reduzir o risco técnico, econômico, social e ambiental das falhas. O uso crescente de processos de avaliação de riscos como uma ferramenta de planejamento e tomada de decisões exige que as metodologias sejam constantemente aprimoradas, face aos avanços tecnológicos que o setor está associado. As análises de risco devem considerar todos os carregamentos possíveis em uma barragem, bem como os cenários em que esses carregamentos ocorrem e a probabilidade dessas cargas, e da sequência de eventos, ocorrerem em tempos distintos, com as respectivas consequências de cada falha. As principais questões que devem ser respondidas são:

- A falha da barragem ocorrerá? Quais são os limites de carregamento que proporcionam essa falha e qual a probabilidade de que esses carregamentos ocorram?
- Quais as consequências da falha em termos de perda de vidas e danos materiais e ambientais?

O processo de avaliação da ruptura hipotética de uma estrutura deve ser desenvolvido em duas etapas. Primeiro, a brecha da barragem deve ser analisada, avaliando a propagação no vale de jusante e determinando as manchas de inundação. Se a população a jusante da barragem é densa, os detalhes do processo

de ruptura têm pouco efeito sobre o resultado, sendo predominante o tempo em que essa onda chega às primeiras casas. Se os parâmetros de abertura de brecha tais como, largura, profundidade, tempo de abertura e taxa de desenvolvimento não puderem ser previstos com uma precisão razoável, é necessário ser conservador e considerar parâmetros com uma margem de segurança numérica. A simulação da abertura da brecha contém o mais incerto de todos os aspectos considerados no estudo de ruptura hipotética de barragens, principalmente pelo fato de que são baseados em estudos de rupturas passadas, ou modelos numéricos que não simulam os mecanismos de erosão e os regimes de fluxo. Na segunda etapa, avalia-se a propagação do material no vale, estabelecendo corretamente o fluxo de água, sedimentos e resíduos.

Segundo Costa (1985), as principais causas de ruptura são o galgamento, que ocorre devido a uma insuficiência dos dispositivos vertedouros, contemplando 34% das falhas. Em seguida, com 30%, têm-se problemas associados à fundação da estrutura, sendo que 28% podem ser atribuídos a questões de drenagem interna e problemas de *piping*.

Existem inúmeras ferramentas disponíveis para analisar falhas de barragens e seus hidrogramas de fluxo resultantes. Alguns dos mais conhecidos e mais amplamente utilizados são:

- Modelo de Previsão de Inundação de Ruptura de Barragem do Serviço Nacional de Meteorologia (NWS), denominado DAMBRK (Fread, 1977);
- Modelo Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército Americano, HEC-1 (*Hydrologic Engineering Center*, 1981); e
- Modelo de previsão de inundação simplificado de ruptura de barragem do NWS, SMPDBK (*Wetmore and Fread*, 1983).

Desses modelos, o DAMBRK é o mais utilizado. O *National Weather Service* lançou recentemente o FLDWAV (Fread, 1993), o sucessor do DAMBRK. Wurbs (1987) discutiu e comparou os modelos de ponta disponíveis naquela época e recomendou o uso de DAMBRK ou SMPDBK, dependendo do nível de precisão requerido e dos recursos e dados de entrada disponíveis. Westphal e Thompson (1987) também compararam DAMBRK e SMPDBK e recomendaram o uso de SMPDBK como ferramenta de triagem e DAMBRK para análises mais detalhadas. Todos esses modelos tratam o desencadeamento da inundação proveniente da

ruptura da barragem com muito mais detalhes do que o processo de ruptura real. O modelo BREACH do Serviço Nacional de Meteorologia (Fread, 1988) e outros modelos semelhantes simulam o processo de formação da brecha em maior detalhe.

4.3.1 Galgamento

Por questões topográficas, os barramentos geralmente ocupam as cabeceiras de bacias hidrográficas, sendo que a área do reservatório abrange uma parcela significativa da área de drenagem da bacia hidrográfica. A bacia hidráulica, formada pelos depósitos de rejeitos, alteram as condições naturais da bacia hidrográfica, principalmente em termos das relações de balanço hídrico. Sendo assim, os reservatórios apresentam elevada inércia volumétrica, uma vez que acumulam volumes superiores ao deflúvio médio anual da bacia hidrográfica.

O volume de espera para amortecimento de cheias, controlado pela borda livre do reservatório, passa por reduções constantes, governada pela dinâmica de disposição dos rejeitos. Dessa forma, tem-se que a vida útil das barragens de rejeito é, relativamente, pequena, devendo ser programados alteamentos constantes do maciço, face ao avanço progressivo das frentes de assoreamento e disposição.

Os critérios hidrológicos a serem considerados para o dimensionamento dos vertedouros consideram uma revisão das estimativas da precipitação máxima provável (PMP), com a incorporação da inércia volumétrica do reservatório. Dessa forma, tem-se a estimativa da influência na duração da chuva crítica de projeto. A modelagem da curva chuva-vazão é realizada em diferentes *softwares*, com métodos de cálculo variados. No projeto, é recomendado que se considere a vazão máxima provável (VMP) para o dimensionamento do vertedouro, assim como o pico do hidrograma da VMP, sem considerar o amortecimento do reservatório. O dimensionamento dos sistemas de extravasamento deve considerar uma duração crítica de chuva de, no mínimo, 30 dias. Para o hidrograma da VMP deve ser verificado o amortecimento de um reservatório remanescente.

A função da hidrologia na segurança de uma barragem é fornecer todos os elementos para o dimensionamento de estruturas que possam extravasar vazões de cheias nos vertedouros, sem que ocorra o galgamento do maciço. Na Figura 29 tem-se uma perspectiva dos volumes a serem considerados, sendo VM = volume

mínimo e, nos casos de circuitos abertos, volume morto, VU = volume útil e $VESP$ = Volume de espera.

Ao estabelecer os critérios de projeto devem-se verificar os métodos estatísticos e probabilísticos para o cálculo da PMP, devendo ser utilizado aquela que mais se aplica a cada caso. Os métodos empíricos consideram curvas envoltórias e os métodos diretos são baseados na análise estatística de frequência das máximas anuais de vazão de cheia. Os modelos de chuva x vazão são considerados indiretos e, cada método apresenta um percentual de incertezas que deve ser avaliado cuidadosamente.

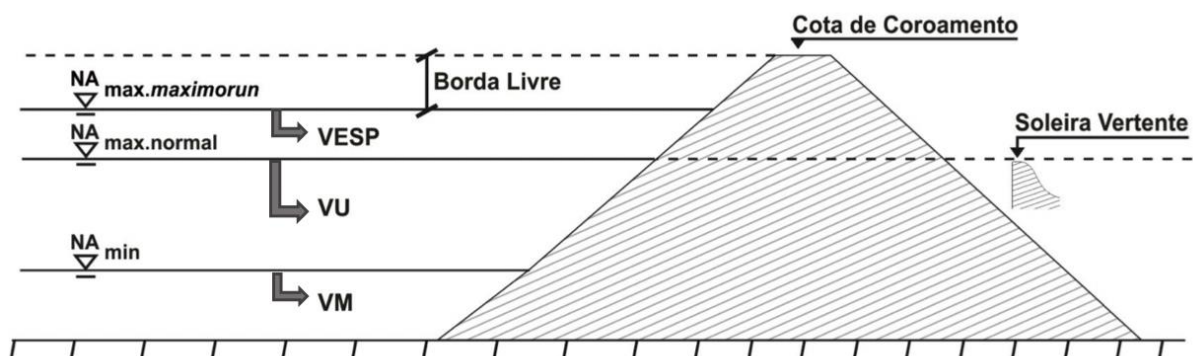


Figura 29 - Valores de nível d'água associados ao volume dos reservatórios. Fonte: Elaborado pela autora

Para os métodos empíricos, tem-se a limitação de não representar valores máximos próximos da realidade do modelo e há dificuldade em correlacionar picos e volumes para a determinação do hidrograma de projeto, pois as amostras de campo geralmente são contabilizadas em períodos curtos. Nos métodos diretos, a incerteza baseia-se na extrapolação das curvas-chave para definição da distribuição de probabilidades mais aderentes, bem como na determinação das vazões de pico e na associação de probabilidade aos hidrogramas de cheias. As medições de descargas líquidas cobrem uma baixa amplitude da variação dos perfis de escoamento do curso d'água e há incertezas na extrapolação para valores de nível d'água elevados. Para os métodos indiretos, as relações de chuvas com a intensidade x duração x frequência, devem ser cuidadosamente avaliadas, e as incertezas ainda persistem na distribuição temporal das chuvas, no cálculo do PMP e da chuva efetiva e na estimativa do tempo de concentração.

Um dos métodos indiretos mais conhecidos é o método racional, onde a vazão de pico é proporcional ao produto da intensidade da chuva de projeto pela área de drenagem, fornecendo um resultado preciso para a vazão de pico. A restrição desse modelo é que sua aplicabilidade é aderente para pequenas bacias, com área de drenagem abaixo de 1,0 km². O método do hidrograma unitário sintético é um operador linear, que reproduz o escoamento superficial resultante de 1 mm de chuva efetiva e, a incerteza associada é devido ao fato de que algumas bacias possuem cheias geradas por escoamento subsuperficial. A escolha do número de curva (CN) pode ser subjetiva e, para uma mesma litologia de uso e ocupação do solo, o valor pode variar em uma larga amplitude.

A morfologia da bacia hidrográfica possui uma alteração em função da magnitude do reservatório e, em sua fase final, pode apresentar lago remanescente ou curso de água. Os modelos de chuva-vazão devem ser confiáveis, baseados em uma boa base de dados, com períodos de recorrência específicos para cada dimensionamento. Na Figura 30 e Figura 31, tem-se um modelo desse tipo de curva, e sua configuração. Ainda, deve-se atentar para os materiais que serão empregados na construção do vertedouro, a operação em curto e longo prazo, e a curva de descarga do vertedouro no canal de aproximação. Para o canal de aproximação, os critérios de projeto devem considerar a estrutura assoreada, a fim de possibilitar a majoração e um fator de segurança mínimo nos cálculos. O parâmetro CN é adimensional e dependente da capacidade de infiltração e armazenamento do solo, sendo que para solos arenosos varia de 40 a 77 e, para solos com baixa capacidade de infiltração, de 80 a 90.

O período de retorno, também conhecido como intervalo de recorrência ou tempo de recorrência ou, ainda, tempo de retorno, é o intervalo estimado entre ocorrências de igual magnitude de um fenômeno natural, como chuvas, ventos intensos, granizo, dentre outros. Matematicamente, é o inverso da probabilidade de o evento ser igualado ou superado. Assim, se uma determinada grandeza hidrológica tem a probabilidade de ser igualada ou excedida igual a 5% ($p = 0,05$), seu período de retorno será: $T = 1/p = 20$ anos. Em outras palavras, se um rio tem vazão igual ou maior que 50 m³/s, em média, a cada 100 anos, significa que a vazão $T = 100$ anos é de 50 m³/s, $Q_{100} = 50$ m³/s). Do ponto de vista prático, a TR representa a probabilidade, em percentual, de que um evento ocorra pelo menos uma vez no período considerado. A Tabela 12 apresenta uma descrição numérica

dessas probabilidades. Por exemplo, para uma estrutura construída com TR de 10 mil anos, a probabilidade de falha, em percentual, em uma vida útil de 500 anos é de 4,9%. Os valores 0 e 100% não significam que não existe risco ou que a falha ocorrerá, pois se trata de um modelo representativo. A opção pelo período de retorno define o grau de proteção da população a jusante das estruturas, bem como das pessoas que operam os dispositivos, sendo uma forma de escolher qual o risco aceitável.

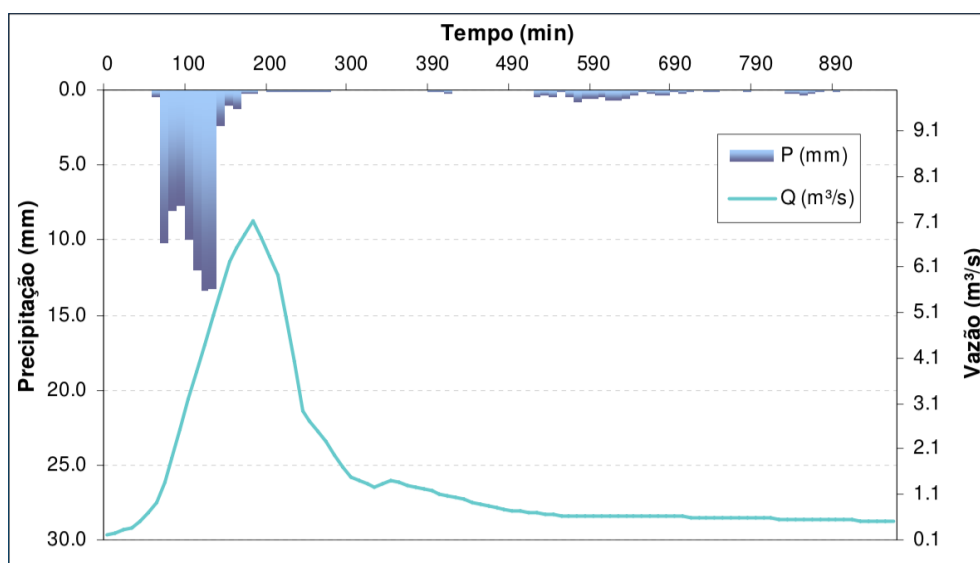


Figura 30 - Modelo de curva chuva-vazão. Fonte: Elaborado pela autora

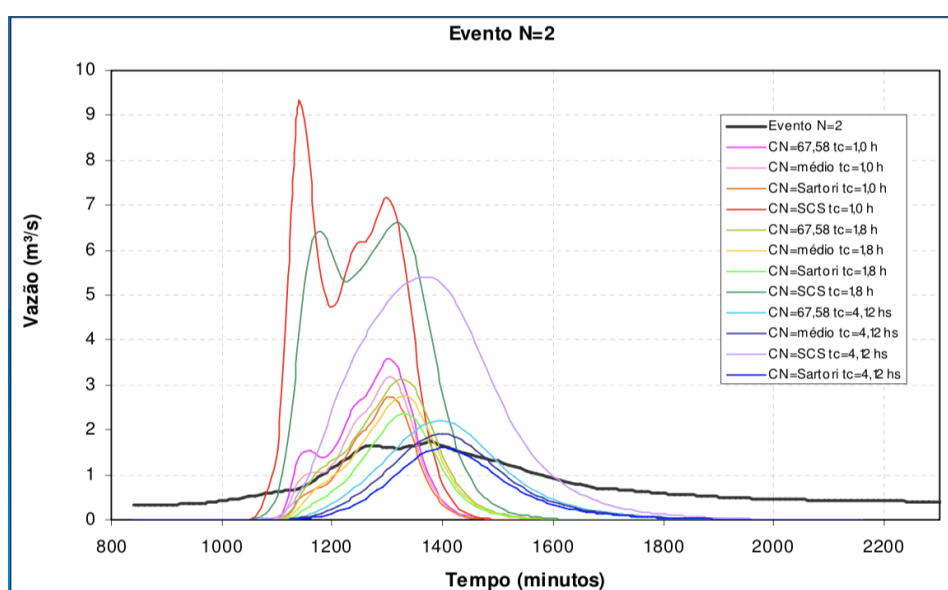


Figura 31 - Modelo de tempo de concentração. Fonte: Elaborado pela autora

**Tabela 12 - Probabilidade, em percentual, da ocorrência de um evento. Fonte:
Elaborado pela autora**

Tempo de retorno (TR)	Vida útil de uma estrutura, em anos							
	2	5	10	25	50	75	100	500
2	75,0	96,9	99,9	100	100	100	100	100
5	36,0	67,2	89,3	99,6	100	100	100	100
10	19,0	41,0	65,1	92,8	99,5	100	100	100
25	7,8	18,5	33,5	64,0	87,5	95,3	98,3	100
50	4,0	9,6	18,3	39,7	63,6	78,0	86,7	100
75	2,6	6,5	12,6	28,5	48,9	63,5	73,9	99,9
100	2,0	4,9	9,6	22,2	39,5	52,9	63,4	99,3
500	0,4	1,0	2,0	4,9	9,5	13,9	18,1	63,2
1.000	0,2	0,5	1,0	2,5	4,9	7,2	9,5	39,4
10.000	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	4,9

A formulação do problema do amortecimento de cheias em reservatórios considera a resolução simultânea da equação da continuidade de massa e da dinâmica do movimento, considerando o amortecimento de cheias em reservatórios assoreados. Os valores das chuvas máximas diárias registradas, geralmente, são em torno de 200 mm a 250 mm. As estimativas de PMP estatísticas consideram uma precipitação superior a 450mm e, as estimativas de PM hidrometeorológico, uma precipitação da ordem de 350 mm. Para as estimativas com tempo de retorno de 10 mil anos, a precipitação é em torno de 220 e 450 mm.

No projeto de vertedouros a primeira opção de dimensionamento considera, geralmente, o tipo de superfície operando em lâmina livre. Já os critérios hidráulicos consideram o volume de rejeitos e sedimentos acumulado no reservatório e o que se tem disponível para amortecimento das cheias. A vazão afluente determinará a cheia de projeto e, com base na geometria da estrutura, tem-se a vazão vertida. O maior vertedouro do mundo é o da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, no Rio Tocantins, estado do Pará, com uma capacidade de projeto calculada para a cheia decamilenar, ou seja, período de retorno igual a dez mil anos, de 110 mil m³/s (Figura 32). Em potência instalada, é a maior usina hidroelétrica brasileira, com 8.370 MW, uma vez que a Usina de Itaipú tem capacidade de 14 mil MW, porém, dividida entre Brasil e Paraguai. A barragem possui 11 km de comprimento e 78 m

de altura, com um reservatório de 2.850 km², tendo sido inaugurada em novembro de 1984 e ampliada em 2010. A maior estrutura extravasora é a da Usina de Três Gargantas, no Rio Yan Tsé, na China, inaugurada em 2012 e que possui 181 m de altura e 2,3 km de comprimento, com vertedouro de capacidade 116 mil metros cúbicos por segundo (Figura 33).

O excesso de água acumulada em um reservatório de uma barragem, seja de uma usina hidrelétrica ou de outra barragem de acumulação de resíduos, água e afins, deve ser extravasado de forma segura, de montante para a jusante. Nesse sentido, tem-se no vertedouro, também conhecido como extravasor, ou sangradouro, uma estrutura de segurança operacional da barragem. Os vertedouros podem conter algum mecanismo em forma de comporta que regule a passagem do fluxo de água por eles, mas geralmente são em canais abertos ou de soleira livre.



Figura 32 - Vista da Barragem de Tucuruí. Fonte: Prefeitura de Tucuruí (2018)

Em barragens de acumulação ou em aproveitamentos hidrelétricos, as grandes vazões passam pelas turbinas, e os vertedores são utilizados para pequenas descargas. Já em barragens de derivação, se a vazão de desvio é pequena quando comparada ao fluxo total, os vertedores operam continuamente. Nesse caso, as vazões de projeto são um ponto crítico a ser determinado e os vertedores geram escoamentos em altas velocidades e devem ser acompanhados por estruturas de dissipação de energia. Para as barragens de acumulação de resíduos, geralmente

há sistema de recirculação de água para aproveitamento na usina de beneficiamento, sendo os vertedouros dimensionados para amortecer cheias extremas.



Figura 33 - Vista da Barragem de Três Gargantas. Fonte: Consórcio Três Gargantas (2018)

O controle volumétrico do reservatório é feito por intermédio dos vertedouros, que podem ser de diversos tipos. Com relação à geometria, se diferem em retangular, triangular, trapezoidal, circular e parabólico. Em relação à altura relativa da soleira, podem ser de soleira livre, quando P é maior que P' , ou submerso, quando P é menor que P' (Figura 34). As paredes podem ser delgadas quando a espessura é menor que $2/3$ da altura ou parede espessa, quando é maior que $2/3$ da altura. Geralmente, os vertedouros de soleira delgada consideram a inserção de chapas metálicas à medida que os de soleira espessa podem ser construídos em concreto ou alvenaria. A largura da soleira pode ser sem contração lateral, quando $L=b$ e, com contração lateral, quando $L < b$ (Figura 34).

Em relação ao posicionamento em relação à barragem, podem ser construídos no corpo das estruturas, conduzindo à vazão em queda livre ou em perfis apropriados. Além disso, podem ser posicionados em uma das margens do reservatório, quando geralmente são operados como canais abertos. Quando

posicionados no interior do reservatório, conduzem água internamente por meio de tubulações, de uma cota superior a outra inferior, no formato tulipa ou vórtice, por exemplo.

Ainda, os vertedores podem ser de serviço ou operacionais, para vazões pequenas e frequentes, e de emergência, para grandes descargas. A descarga de grandes vazões pelo vertedor de operação só pode ser efetuada se a barragem for resistente e suportar a onda de cheia. Podem ser usados diques fusíveis, que só funcionam para vazões de período de retorno grande (100 anos). Esse tipo de estrutura, geralmente, localiza-se no extremo à montante, retendo boa parte da onda de cheia, evitando contato direto da cheia com o maciço da barragem.

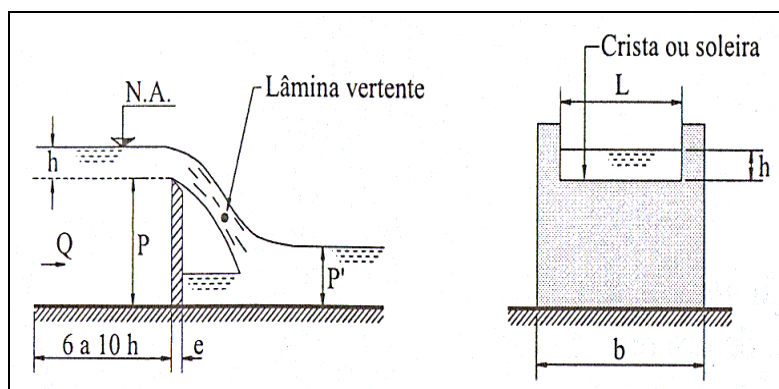


Figura 34 - Tipos de vertedouros e classificação. Fonte: Adaptado de Cicarelli (2008)

Ainda, os vertedores podem ser de serviço ou operacionais, para vazões pequenas e frequentes, e de emergência, para grandes descargas. A descarga de grandes vazões pelo vertedor de operação só pode ser efetuada se a barragem for resistente e suportar a onda de cheia. Podem ser usados diques fusíveis, que só funcionam para vazões de período de retorno grande (100 anos). Esse tipo de estrutura, geralmente, localiza-se no extremo à montante, retendo boa parte da onda de cheia, evitando contato direto da cheia com o maciço da barragem.

Os fatores que influenciam na seleção do tipo de vertedor podem ser divididos em dois grandes grupos: funcionais e de segurança. Para os fatores funcionais deve ser avaliada a capacidade de acomodação da vazão de projeto, compatibilidade com o tipo de barragem, satisfação das exigências do projeto, adequação às condições topográficas e geológicas, adoção de elementos econômicos e consideração da quantidade e duração dos eventos de chuva. No que diz respeito aos fatores

econômicos, deve-se ter grande segurança na operação, estruturalmente seguro para um grande intervalo de descarga, estruturas de saída que não alterem as condições da barragem, risco à jusante avaliado corretamente e segurança e precisão nas estimativas de vazões.

Recentemente, foi desenvolvida uma tecnologia denominada “*bolas de sombra*”, que são bolas ocas de poliestireno de alta densidade (PEAD) preenchidas com água, utilizadas para cobrir o reservatório. Tal solução reduz a incidência de raios solares na superfície dos lagos e podem, desde evitar a formação de bromatos, que são uma substância cancerígena, como para evitar a evaporação de água e aumentar as taxas de captação. Em 2015, durante a crise hídrica em Los Angeles, utilizaram-se 96 milhões de bolas em um reservatório local, que resultou em uma redução de evaporação em mais de 1 bilhões de litros de água por ano (Figura 35).



Figura 35 - Bolas de sombra em reservatório de Los Angeles. Fonte: Goniadis (2015)

4.3.2 Erosão interna e *pipinq*

O *pipinq* é um fenômeno que tem sido objeto de vários estudos internacionais e multidisciplinares e na literatura disponível há várias definições diferenciadas. É

comum que todas as definições sejam agrupadas genericamente somente ao termo *piping*, o que dificulta a determinação da causa raiz das falhas atribuídas a esse modo de falha.

Terzaghi (1939), Lane (1934) e Sherard *et al.* (1963) apresentaram um modelo em que as partículas são progressivamente deslocadas da matriz do solo por meio da ação de forças de tração intergranulares produzidas pela água. As forças de tração mobilizadoras (instabilizantes) são equilibradas pela resistência ao cisalhamento dos grãos, peso específico das partículas e taxas de percolação. As forças erosivas são maiores quando o fluxo concentra-se em um único ponto de saída e, uma vez que as partículas do solo movem-se pela erosão, a magnitude dessas forças aumenta devido à concentração do fluxo. Essa é a visão clássica do *piping*, como uma erosão regressiva iniciada “atrás” do solo, principalmente quando o solo, ou alguma outra estrutura, permite a formação de uma abertura para passagem do fluxo. A força de tração que causa esse tipo de erosão é diretamente proporcional à velocidade intergranular do fluxo.

Lutz (1934) apresentou um modelo em que as propriedades físico-químicas dos solos são o fator primário na erosão do solo. Nesse caso, a resistência dos grãos ao movimento depende do gradiente hidráulico por intermédio do solo, bem como o estado de tensões ao redor da abertura da erosão.

O termo “erosão interna” considera a remoção das partículas de solo por forças de tração devido ao fluxo ao longo de aberturas pré-existentes, como trincas em materiais coesivos, ou vazios em matérias granulares. Sendo assim, a erosão interna não se deve à dinâmica do fluxo intergranular e a hidráulica do meio. Ao invés de ser iniciada pelo fluxo no ponto de saída, é iniciada por forças erosivas da água ao longo de uma abertura, sendo expressa como uma carga de tração do longo de um comprimento de abertura.

Os solos dispersivos são aqueles que possuem um elevado teor de cátions de sódio (Na) dissolvido na água presente nos vazios do solo, tornando-se facilmente erodíveis quando na presença de um fluxo de água. O tunelamento, ou “*jugging*”, é comumente observado em solos dispersivos, sendo causado pela erosão das chuvas. Esse fenômeno ocorre dentro da zona vadosa, ou zona de aeração, que é a zona superficial do solo em que os poros encontram-se cheios de ar e, inferiormente, está a zona de saturação, em que os interstícios estão cheios de água. A causa é a dispersão química de solos argilosos que passam por fendas

abertas pela água da chuva e, sendo assim, por definição, o tunelamento não ocorre em zona freática. Esse fenômeno também pode levar à ruptura, sendo semelhante ao tunelamento que ocorre por penetração de raízes de árvores ou presença de animais.

Alguns pesquisadores utilizam o termo sufusão para descrever a migração gradual de materiais finos por meio de uma matriz mais granular, o que propicia a ruptura. Esse processo, que não é uma erosão, resulta em uma estrutura mais segregada do material granular com taxas de infiltração relativamente elevadas e que colapsam o esqueleto sólido. Em materiais não coesivos a sufusão leva a zonas de alta permeabilidade, com elevação significativa de poropressões e forças erosivas, sendo um processo relativamente lento.

Dessa forma, e considerando todos esses conceitos, é razoável dizer que o processo de erosão interna consiste na formação de vazios no solo, geralmente causada pela remoção de material por infiltração. Ocorre quando forças hidráulicas são suficientemente elevadas para separar as partículas e permitir o fluxo com elevada poropressão. Nesse sentido, o *piping* é um fenômeno relacionado ao desenvolvimento progressivo dessa erosão interna por infiltração, caracterizado por um furo de descarga d'água, geralmente, em taludes de jusante e áreas a jusante de barragens. Na Figura 36, tem-se um modelo esquemático do processo de erosão interna e *piping*.

É usual dividir o processo de erosão interna e *piping* em quatro fases sendo iniciação, continuação da erosão, progressão para a formação tubular e formação da brecha, conforme proposto por Foster *et al.* na Figura 37. O *piping*, por meio do barramento, é iniciado por um vazamento concentrado, sendo um processo similar para o que ocorre por meio da fundação ou do maciço para a fundação.

Na primeira fase, denominada de iniciação, os vazamentos concentrados e as erosões iniciam-se ao longo de uma superfície de falha. Para o barramento, a erosão pode ser iniciada na porção mais interna do maciço, ou por um mecanismo de sufusão (erosão interna) decorrente de alguma instabilidade interna. Ainda, pode ser decorrente de um vazamento concentrado em rachaduras transversais ou fraturas hidráulicas, decorrentes de adensamento diferencial vertical ou horizontal, terremotos e instabilidade de taludes. Zonas de alta permeabilidade resultantes de uma compactação ineficiente ou de camadas de solos muito granular e lentes, além

de regiões fissuradas próximas a tubulações, também podem desencadear tal tipo de erosão.

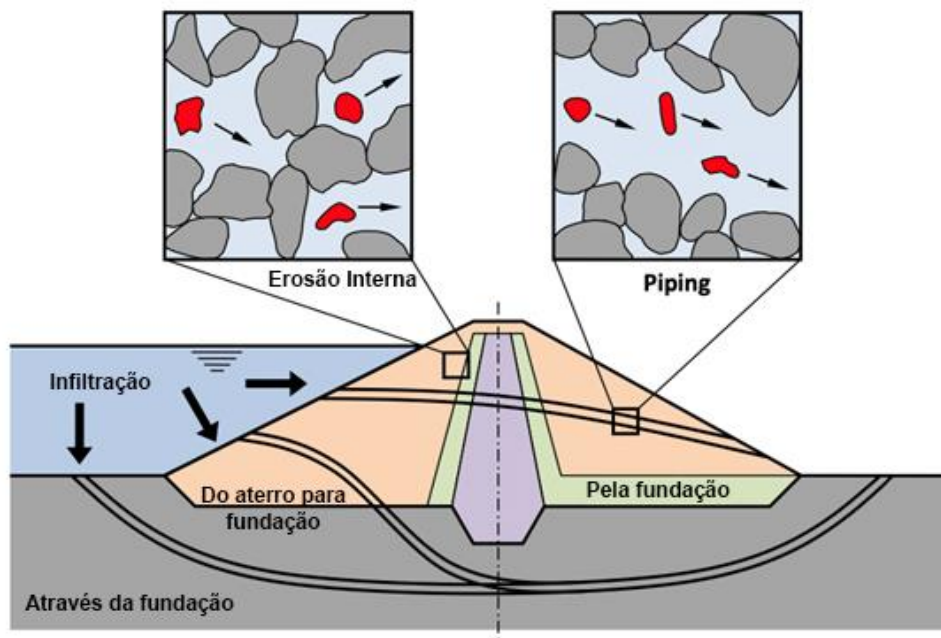


Figura 36 - Esquema de erosão interna e *piping*. Fonte: Adaptado de Luthi (2011)

Já no caso das fundações, a primeira fase é geralmente associada à erosão regressiva, seguida de uma sobrelevação, ou similar ao barramento no quesito dos vazamentos concentrados. Os solos que se apresentam com graduação granulométrica aberta (como as lateritas) ou rochas fissuradas, também podem desencadear zonas de alta permeabilidade susceptíveis a iniciação da erosão interna. O mecanismo também pode ser observado na sufusão e erosão de solos finos que se encontram acima de camadas mais grosseiras, ou rochas com juntas mais abertas. Para o *piping* que ocorre do maciço para a fundação, o processo é decorrente de uma erosão regressiva em solos finos do aterro em direção aos espaçamentos de uma fundação de gradação mais aberta. O fluxo de percolação ao longo da fundação também pode promover uma erosão interna, nesse caso, denominada de abrasão.

Os filtros e as zonas de transição controlam a segunda fase do processo, onde se tem a continuação da erosão. Se os filtros são projetados e construídos para satisfazer os critérios de filtro e dreno, como por exemplo, os propostos por Terzaghi (1967), o processo de erosão interna certamente não continuará se

desenvolvendo. Mas, se a distribuição granulométrica desses materiais filtrantes é maior do que o desejado, o mecanismo erosivo continuará em sua progressão, uma vez que haverá espaços vazios suficientes para fluxo intenso. Dependendo da classificação granulométrica de filtros e solos, essa erosão pode ser excessiva ou contínua.

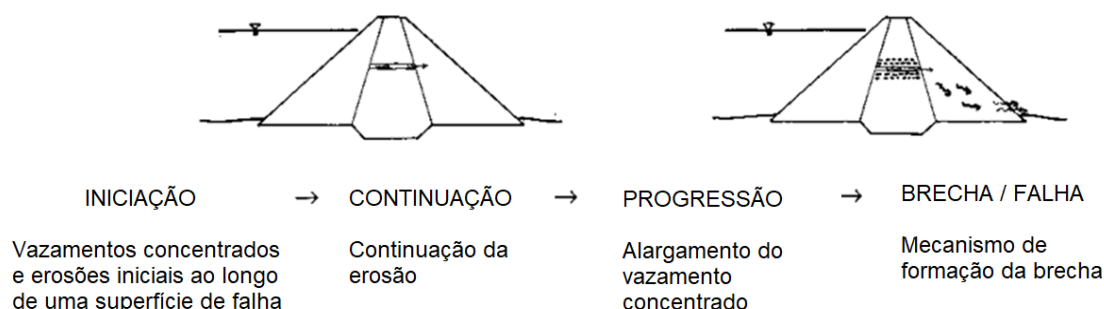


Figura 37 - Modelo da falha por erosão interna e *piping* em sequenciamento. Fonte: Adaptado de Foster *et al.* (2000)

A terceira fase, denominada de progressão, é considerada quando se tem o alargamento do vazamento por meio do maciço ou da fundação. Os fatores que influenciam nessa progressão:

- a capacidade do solo de suportar a abertura do tubo, ou seja, se o tubo será fechado ou permanecerá aberto;
- a ampliação do furo, ou seja, se o tubo será ampliado mais rápido ou mais demorado; e
- se os fluxos serão limitados pelo preenchimento das trincas que são formadas à medida que se desenvolve o caminhamento do tubo.

A última fase, caracterizada pela formatura da brecha propriamente dita, consiste na ampliação abrupta do tubo, com abatimento da crista ou da região onde se desenvolveu, seguido por deslocamentos de massa e instabilidade. O fato é que as três primeiras fases requerem a formação e a ampliação do fluxo tubular regressivo, mas a quarta fase pode ocorrer mesmo sem a formação do tubo. A brecha de um *piping* na fundação também pode ser originada pela instabilidade nos taludes ou perda de borda livre, ou ainda o aumento repentino da formação tubular

tanto na fundação quanto no maciço. Ainda, por ampliação de tubos que formam furos expressivos, abatimento de crista e perda de borda livre.

O tempo de desenvolvimento da erosão interna, *piping* e brecha é geralmente dividido em tempos equivalentes a horas, dias e meses, a depender da referência adotada. De uma forma geral, um processo lento ocorre em semanas, meses ou anos, e um processo muito rápido em menos de 3 a 4 horas. Intermediário a esses processos, podem-se ter eventos medianos (dias ou semanas) e rápidos (mais que 10 horas, por exemplo, ou dias), a depender do que se espera caracterizar em termos de classificação.

De uma forma geral, e avaliando estudos de casos de rupturas, pode-se concluir que os processos de erosão regressiva no maciço variam entre rápidos a muito rápidos, sendo que na fundação desenvolvem-se mais lentamente. Em ambos os casos, maciço e fundação, a sufusão é lenta, e os processos de faturamento hidráulico é consideravelmente rápido. Vale ressaltar que essas classificações devem ser paramétricas, levando em consideração as especificidades de cada projeto e de cada material.

O monitoramento das taxas de infiltração, tanto visualmente quanto com o auxílio de instrumentação, é um dos meios mais eficientes de se identificar erosões internas e *piping*. Não é comum ter mudanças significativas nas taxas de percolação, ou em valores de poropressão e recalques, para identificar de forma conclusiva que o processo de erosão interna foi iniciado e é contínuo. É mais provável identificar quando a erosão regressiva progrediu para o estágio onde se tem a formação do tubo, quando as mudanças, principalmente na poropressão e recalques, são significativas. Geralmente, o processo de *piping* em aterros é sinalizado por trincas, zonas saturadas, faturamento hidráulico e, na fundação, as medições de poropressão por meio da instrumentação detecta muito efetivamente situações de tensões elevadas. Entretanto, é necessário reafirmar que a erosão regressiva pode ocorrer mesmo sem elevações significativas de poropressão, desenvolvimento de zonas saturadas e afins, principalmente quando é um processo que se desenvolve lentamente e caminha para a abertura abrupta de uma brecha.

Geralmente, atribui-se ao rebaixamento do nível do reservatório uma efetividade no controle de processos de *piping*, uma vez que a taxa de percolação por intermédio do tubo é reduzida. Deve-se ter cuidado nessa avaliação, pois a redução do nível d'água no reservatório pode promover a secagem do material do

maciço, ampliando os vazios e aumentando a probabilidade de início de erosão regressiva quando o nível for novamente elevado.

4.3.3 Falhas estruturais

O modo de falha associado às questões estruturais pode ter diversos gatilhos e, geralmente, estão associados a deslizamentos, subsidências, problemas em elementos de concreto e a fenômenos específicos, como o caso da liquefação e extrusão lateral.

Os deslizamentos são fenômenos de movimento de massa, geralmente associados a natureza geológica, geotécnica e climatológica, e inclui vários tipos de movimento de solo tais como corridas, fluxos de detritos e escorregamentos. Os fatores que influenciam a sua ocorrência dependem do tipo de solo, no que diz respeito à sua constituição, granulometria, peso específico, coesão e ângulo de atrito. A declividade da encosta, ou do talude, influenciará no ângulo de repouso e, conseqüentemente, em uma maior probabilidade ou não de susceptibilidade ao movimento. Taludes mais íngremes exigem mais do material, ou seja, espera-se que a resposta em termos de tensões cisalhantes seja muito maior. A saturação das encostas e taludes contribui para a elevação do peso específico das camadas, aumentando a poropressão e reduzindo as tensões efetivas, atuando como um lubrificante para as superfícies de deslizamento.

As corridas são movimentos rápidos, em que os materiais comportam-se como fluidos altamente viscosos e geralmente ocorre juntamente com grande concentração de água superficial. O fluxo de detritos considera um material desagregado, altamente saturado, que se movimenta em fluxo rápido e com alto peso específico. A mistura sólido-líquido pode atingir densidades de até 2 mil kg/m³ e velocidades superiores a 15 m/s. Já os escorregamentos, são movimentos rápidos e de curta duração, com planos bem definidos, divididos em:

- Translacionais: representam a forma mais frequente entre os tipos de movimento de massa, possuindo superfície de ruptura com forma planar, a qual acompanha, de modo geral, descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no interior do material; e
- Quedas de blocos: são movimentos rápidos de blocos e/ou lascas de rocha que caem pela ação da gravidade, sem a presença de uma superfície de

deslizamento, na forma de queda livre. Existe ainda uma categoria denominada rastejamento, definida basicamente pela sua velocidade, devido à natureza lenta do movimento.

Uma forma bem comum de se evitar deslizamentos é recobrir as áreas, principalmente as mais íngremes, por algum tipo de cobertura, como por exemplo, cobertura vegetal. Com isso, o caminhamento da água pelo declive será mais suave, reduzindo a percolação e saturação do maciço. É necessário evitar árvores e arbustos de grande porte, que podem induzir movimentos de desprendimento pela ação de forças instabilizantes, bem como ampliar a saturação por fluxo de água por meio das raízes. O mesmo ocorre com tocas, ninhos de cupins e formigas. O zoneamento da declividade com a inserção de bermas também auxilia nesse escoamento, sendo importante prever dispositivos de drenagem nas partes mais planas.

A análise de estabilidade de taludes considera a atuação de momentos atuantes e momentos resistentes. Como momentos atuantes tem-se, por exemplo, a atuação da força de água ou rejeito no reservatório, fluxos de percolação, ventos, terremotos, sobrecargas e afins. Já para os momentos resistentes, o peso próprio é o principal elemento a ser considerado, além da capacidade de suporte da fundação e de outros elementos de reforço. A razão entre os momentos resistentes e os atuantes fornece um valor denominado Fator de Segurança. Valores acima de 1,0 indicam que os momentos resistentes são predominantes, ou seja, diante das condições de contorno consideradas, há uma tendência de o talude ser estável. Ao contrário, valores abaixo de 1,0 indicam maior atuação dos momentos atuantes e, a instabilidade é fato. Cabe ao geotécnico avaliar qual Fator de Segurança será aceitável para cada situação e, monitorar a ação das forças e variáveis na manutenção e variabilidade desse índice. Nesse sentido, por exemplo, devem-se evitar cortes muito íngremes, que ampliam os momentos atuantes e direcionam o talude para uma condição de maior instabilidade.

Os sinais de deslizamentos podem ser visíveis mediante a inclinação de árvores, postes, muros e o aparecimento de trincas e rachaduras no terreno ou maciço. Caso haja fluxo de água, e esta esteja com coloração escura, há o indício de que parte do material em solo está sendo lavado e carregado, comprometendo a estrutura e a sua geometria.

A subsidência refere-se ao movimento de uma superfície à medida que ela desloca-se para baixo, relativamente a um nível de referência e, o oposto de subsidência é o levantamento tectônico, que resulta num aumento da elevação. A cavitação é uma subsidência de superfície, sendo que túneis, poços e pedreiras subterrâneas, geralmente podem apresentar subsidências por colapso, que também é frequente em terrenos onde a dissolução do calcário causada pelo fluxo de água subterrânea leva à formação de grutas. Se a resistência da rocha que constitui as paredes das cavidades diminui substancialmente, pode ocorrer o seu colapso com consequente movimento dos materiais que se encontram por cima, em direção à cavidade, causando a subsidência de superfície.

Quando existem tensões diferenciais na superfície terrestre pode-se formar falhas geológicas onde ocorre subsidência absoluta, também denominada de subsidência por falhamento. Quando se tem o estiramento da litosfera, ocorre o aquecimento da crosta e a dilatação térmica dos materiais constituintes. Com o tempo, o calor dissipa-se por radiação, a partir da superfície terrestre, e o gradiente térmico diminui. À medida que a temperatura se torna mais baixa, a litosfera contrai-se, muitas vezes causando subsidência de superfície. Em locais onde há extração de gás e líquidos em subsuperfície, a pressão inicial no campo diminuirá com o tempo e, se essa pressão diminui, a pressão do solo aumenta e, inevitavelmente, ocorre subsidência à superfície.

O processo de compactação consiste na redução do índice de vazios do solo por meio da expulsão de ar com aplicação mecanizada de carregamento, ampliando sua resistência e reduzindo a permeabilidade. Aterros mal compactados são mais suscetíveis a ação de momentos instabilizantes, por ter suas tensões efetivas reduzidas por saturação dos vazios e, até mesmo, desagregação do esqueleto sólido do solo. Já o processo de adensamento do solo consiste na redução volumétrica do solo resultante da expulsão de água e ar, e solos pouco adensados também possui propriedades instabilizantes maiores que solos bem adensados.

As estruturas de concreto e aço presentes nas barragens tais como canaletas, vertedouros, muros, galerias, comportas, bombas e afins, também possuem sua representatividade nas questões associadas a falhas estruturais em barragens. Se essas estruturas falham, fatalmente levam os maciços, fundação e ombreiras a trabalharem em uma situação maior de estresse e, caso não tenham

margem para essa ampliação de resistência, pode resultar em uma ruptura generalizada.

Geralmente, os marcos superficiais auxiliam na medição superficial dos recalques e deslocamentos de massa, assim como os inclinômetros indicam os movimentos em profundidade. Para as leituras de poropressão têm-se os piezômetros, sendo os medidores de nível d'água utilizados quando se deseja somente obter a informação de nível freático. Os medidores de vazão coletam dados de fluxo da drenagem interna e, se desejado, da drenagem superficial. Ainda podem ser considerados elementos para controle do nível do reservatório e manutenção da borda livre das estruturas, bem como monitoramento de lençol freático por poços.

Tem sido cada vez mais presente no monitoramento das estruturas instrumentos como estação robótica e meteorológica, radares de precisão milimétrica, *laser scanner*, câmeras, drones e acelerômetros. A estação robótica é composta por equipamentos que fazem, com precisão, o monitoramento de deslocamentos horizontais e verticais. Já a estação meteorológica mede índices pluviométricos, temperatura do ar, umidade, pressão, velocidade e direção do vento. Os radares identificam variações mínimas de deslocamentos nas superfícies das barragens e, os satélites monitoram deslocamentos por meio de radares instalados nos mesmos. Os acelerômetros são instrumentos utilizados para monitoramento de vibração no solo. Em todos esses casos, o objetivo é a automação da aquisição de dados, permitindo a redução de variáveis como coleta equivocada de dados, e trazendo uma maior confiabilidade a análise numérica das leituras de instrumentação. Ressalta-se que a automação, por si só, não amplia a estabilidade das estruturas, pois ainda requer avaliação e tratamento de dados, principalmente aqueles que serão incorporados às análises de estabilidade e de risco.

4.3.3.1 Liquefação e extrusão lateral

A primeira condição requerida para a liquefação é a saturação, sendo seguida de questões associadas às propriedades dos materiais envolvidos e às condições de drenagem. Martin e McRoberts (1999) enfatizam a necessidade de um gatilho físico para iniciar o cisalhamento rápido, que são agrupados em:

- Talude excessivamente íngreme na base, por conta de processos erosivos, deslizamentos localizados e inicialmente drenados e atividades de construção como escavação, por exemplo;
- Carregamento devido à elevação rápida do reservatório, ângulo do talude excessivo na crista, e atividades de construção na crista;
- Mudanças na poropressão devido a níveis mais elevados do reservatório, taxas aceleradas de construção, movimentações e outros processos;
- Galgamento devido a fortes chuvas, falha dos dispositivos de desvio e deformação sísmica, resultando em perda da borda livre; e
- Cargas vibracionais devido a abalos, tráfego na obra e detonação.

Quando uma carga é aplicada sobre as partículas do solo, a tendência é que haja redução de vazios para compensar a deformação por acréscimo de carga, até o ponto que se atinge a máxima resistência dos grãos e há o desenvolvimento de tensões cisalhantes. Se essas partículas estão densamente dispostas, tal como areias densas ou argilas compactas, as partículas do solo devem, primeiro, afastar-se para que se movam em relação às demais durante o cisalhamento. Isso produz um aumento do volume de solo e esses solos são chamados de dilatantes. De um modo geral, os solos dilatantes são fortes (resistentes), o que explica o uso de compactação mecânica para alcançar essa condição. Por outro lado, o cisalhamento em um arranjo de partículas soltas, como em areias fofas ou argilas moles, provoca comportamento contrário. As partículas se agrupam e a massa de solo se comprime e, os solos que apresentam essa tendência de diminuição de volume são chamados de contrácteis. Os materiais depositados hidraulicamente, arenosos e, principalmente, quando não compactados são, na maioria das vezes, contrácteis.

Quando a massa de solo está saturada, os espaços vazios entre as partículas ficam preenchidos com água. Se o solo é contráctil e ocorre o cisalhamento, a água pode inibir as partículas de moverem-se em conjunto, de modo que a própria água absorve uma parte da carga, produzindo uma pressão na água denominada de poropressão. A poropressão faz com que a resistência da massa de solo saturado seja reduzida, na medida em que a água é incompressível, e todo o excesso de carga é transferido para os grãos. Esse fenômeno ocorrerá ou não a depender das condições de drenagem, e, caso se tenha uma condição não drenada, tem-se que

as poropressões aceleram o surgimento das tensões cisalhantes, ao passo que nas condições drenadas, a poropressão é controlada na drenagem. O deslizamento fluido por liquefação é dependente da taxa de cisalhamento.

O cisalhamento de um solo saturado e contráctil, quando é lento o bastante para que a poropressão se dissipe tão rapidamente quanto é gerada, produz uma condição drenada e, dessa forma, a poropressão não se desenvolve e o solo mantém sua resistência. Por outro lado, se a poropressão não é dissipada, tem-se o surgimento muito rápido da tensão cisalhante, e ocorre o cisalhamento não drenado. A resistência não drenada de areias contrácteis diminui notadamente em função das deformações impostas durante o deslizamento fluido, sendo essa característica o que confere velocidade e mobilidade aos deslizamentos fluidos por liquefação. O processo de liquefação pode ser separado em liquefação estática e dinâmica.

Diferentes condições de carregamento podem levar à liquefação estática e, na Figura 38 tem-se as trajetórias de tensões para dados de ensaio dos rejeitos arenosos, onde p' representa a tensão média confinante efetiva, que é a tensão de cisalhamento. São apresentadas as trajetórias de tensões para dois ensaios, ambos adensados até a mesma tensão no início do cisalhamento. No primeiro ensaio, o carregamento não drenado convencional é aplicado para simular cisalhamento rápido e, quando a trajetória de tensões atinge a envoltória de resistência, alcança-se também uma condição de liquefação. À medida que a resistência ao cisalhamento cai devido a alterações na poropressão, ela progride para baixo ao longo da envoltória, e a resistência diminui rapidamente, até chegar a uma resistência muito baixa de pós-liquefação. O segundo ensaio representa uma trajetória de tensões diferente e, em vez de ser carregada, a amostra é descarregada lateralmente para simular um espalhamento horizontal, sendo que o processo de descarregamento é realizado lentamente sob condições drenadas. Dessa forma, o comportamento ao atingir a envoltória de resistência é o mesmo de antes: ocorre liquefação, a resistência diminui rapidamente, e obtêm-se os mesmos resultados de valor de pós-liquefação. Em ambos os ensaios, a perda de resistência que acompanha a liquefação é drástica e quase instantânea, tanto que esse comportamento é, na maioria das vezes, considerado como colapso.

Assim, se as condições necessárias estiverem presentes, a liquefação pode ocorrer tanto sob condições de mudanças de tensão impostas lentamente ou rapidamente, que podem ser produzidas por carregamento e por descarregamento.

O ponto crucial é que a taxa de cisalhamento, e não necessariamente a taxa de carregamento, controla a liquefação de materiais contrácteis e a mudança na resistência ao cisalhamento deriva das propriedades intrínsecas do solo.

A propriedade mais importante para avaliação da liquefação é a tendência para mudança em volume do solo durante o cisalhamento. Isso depende de dois fatores: primeiro, o quanto fofo ou denso é o solo, como caracterizado por seu índice de vazios e , em segundo lugar, o nível de tensão imposto ao mesmo. A Figura 39 apresenta um gráfico de índice de vazios (e) x tensão efetiva média (p'). Para qualquer tensão efetiva, existe algum índice de vazios no qual não há nenhuma tendência para aumento e para diminuição de volume durante o cisalhamento. A linha de estado crítico (CSL) representa esses pontos e delinea a fronteira entre condições dilatantes (aumento de volume) e contrácteis (diminuição de volume).

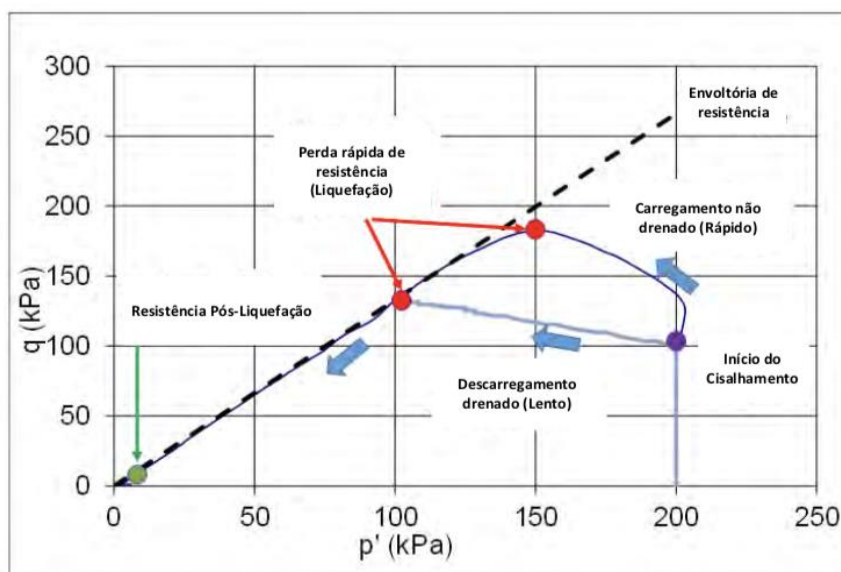


Figura 38 - Trajetória de tensões para carregamento não drenado e descarregamento drenado de uma areia. Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

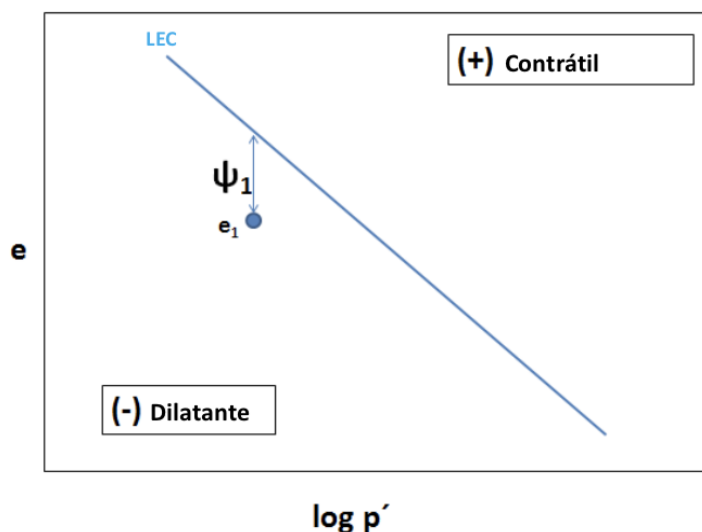


Figura 39 - Definição do parâmetro de estado para tensão constante. Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

O grau de contractibilidade, ou dilatância, pode ser caracterizado pelo parâmetro de estado ψ , mostrado para alguns índices de vazios existentes e_1 . O parâmetro de estado é definido como a diferença em índice de vazios entre e_1 e o índice de vazio no CSL, para uma mesma tensão efetiva média. A magnitude de ψ , ou a distância vertical de e_1 do CSL exprime o grau de contractibilidade, ou dilatância para o índice de vazios, com uma convenção de sinal negativo para dilatância e positivo para contractibilidade.

As relações mostradas na Figura 39 são para tensão constante e, na Figura 40, tem-se o que acontece quando a tensão aumenta, por exemplo, em função do incremento no carregamento derivado do alteamento do maciço. No índice de vazios inicial e_1 os rejeitos são dilatantes com ψ_1 negativo, o que significa que eles agem como uma areia densa sob o ponto de vista de resistência não drenada. Sob carregamento imposto e aumento da tensão efetiva, ocorre uma compressão e e_1 reduz-se a e_2 , sendo que e_2 se encontra do outro lado da CSL, e o parâmetro de estado ψ_2 tem sinal positivo. Assim, um material que inicialmente tinha o comportamento dilatante de uma areia densa, assume as características contrativas de uma areia fofa, como resultado do aumento de tensão à qual está submetido.

À medida que o carregamento continua e aumenta, a tensão efetiva reduz ainda mais, e_2 se reduz a e_3 como resultado de uma maior compressão, e a magnitude de ψ_2 aumenta para ψ_3 . Desse modo, não só pode o carregamento contínuo transformar um material dilatante em material contrativo, como também

pode aumentar o seu grau de contractibilidade. Esses princípios são aplicados aos rejeitos arenosos, como exemplificado por cinco amostras na Figura 41, de um mesmo material, que fornece um resumo estatístico de dados de CPT posicionados ao longo de duas seções transversais de uma praia de rejeitos. Embora, em teoria, materiais contrácteis são os que têm $\psi > 0$, na prática, $\psi > -0,05$ muitas vezes é adotado como o limite (Shuttle e Cunning, 2007). As áreas sombreadas indicam proporções relativas de material contráctil e os histogramas superior e inferior são para as seções transversais da ombreira esquerda e central, respectivamente. Nessa base, tem-se uma indicação expressiva de materiais contrácteis, demonstrando que a maioria dos rejeitos arenosos hidráulicamente descarregados atende ao requisito de contractibilidade para deslizamento fluido por liquefação. Isto é confirmado pelos critérios de liquefação baseados em CPT, desenvolvidos por Robertson (2010) e apresentados na Figura 42, que complementa o parâmetro de estado com estudos de casos de liquefação em campo para o caso específico da amostra F-02. Esses incluem o fluxo por liquefação de um aterro marinho para o ponto circunscrito e marcado como 19, 20 e 21.

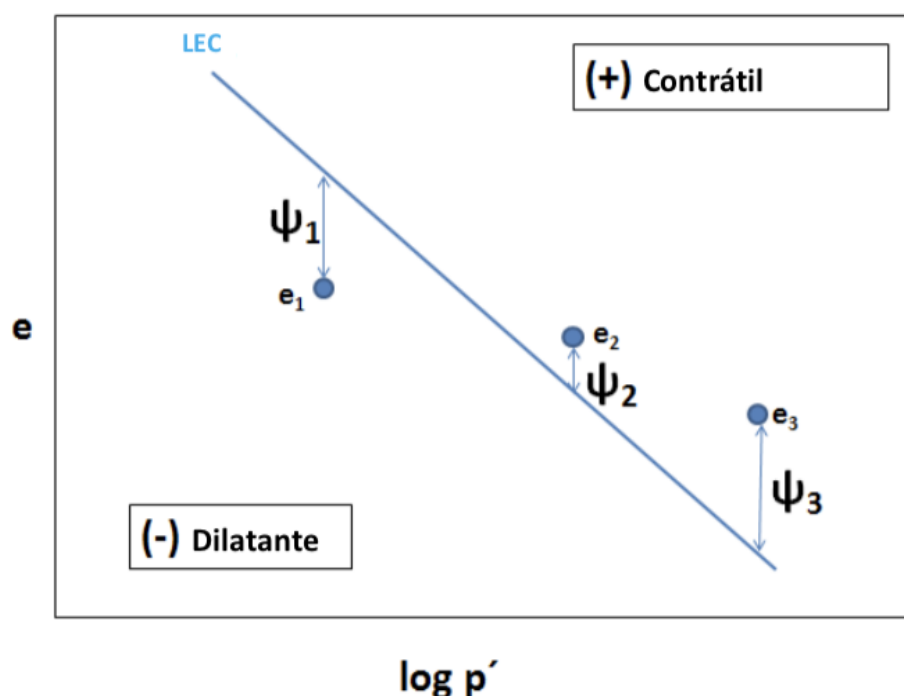


Figura 40 - Mudança no parâmetro de estado. Fonte: Morgenstern *et al.* (2016)

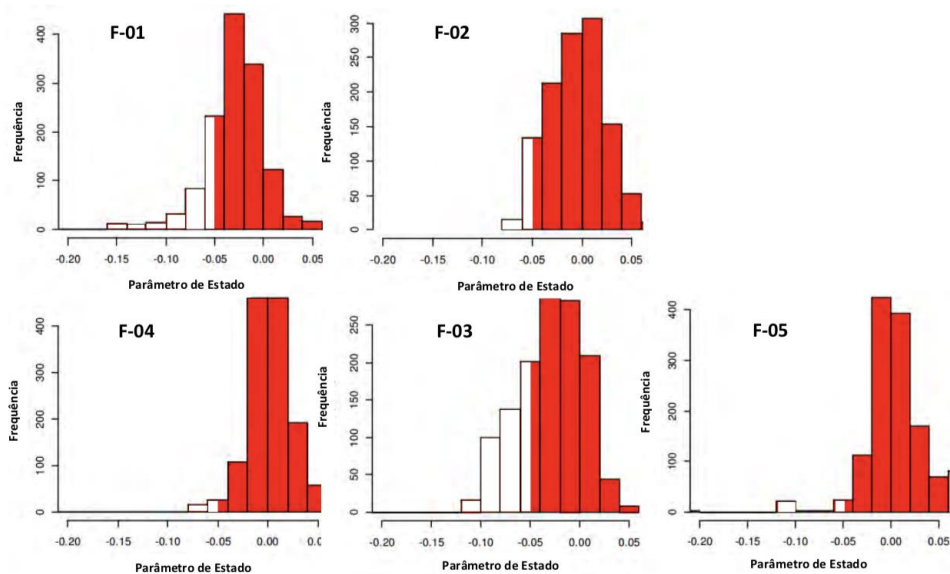


Figura 41 - Exemplo de parâmetros de estado para amostras de rejeitos arenosos.

Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

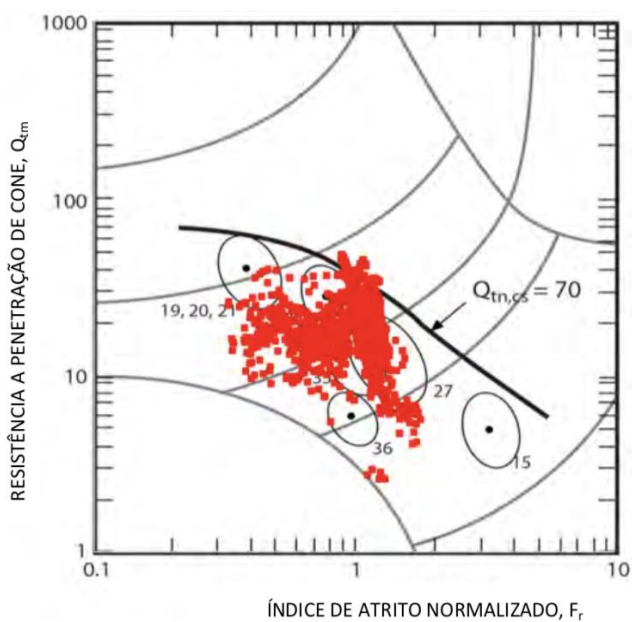


Figura 42 - Critério de liquefação de Robertson para F-02. Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

Os dados de CPT também podem caracterizar a propensão para a redução da resistência não drenada dos rejeitos arenosos sujeitos a grandes deformações que acompanham deslizamentos fluidos por liquefação. Isso pode ser demonstrado por meio da comparação da resistência de escoamento não drenada (pico) com a

resistência não drenada crítica (também conhecida como residual ou pós-liquefação).

Na Figura 43, aplicam-se as correlações de CPT de Sadrekarimi (2014) para a resistência de escoamento não drenada em cisalhamento simples e resistência não drenada crítica. Nesta, é verificado que a relação da resistência não drenada média caiu de 0,21, antes do deslizamento fluido por liquefação, para 0,07 durante o mesmo, demonstrando que os rejeitos arenosos da amostra estavam sujeitos à perda significativa de resistência.

Os mecanismos de gatilho considerados para provocar liquefação são, geralmente, aumentos de carga estática gerada diretamente, quer por cisalhamento não drenado da lama, quer por deformações na base da areia que levam ao colapso. Qualquer gatilho pode ser magnificado pelos efeitos de abalos sísmicos, caso esses tenham alguma influência. Entretanto o seu resultado final é similar, mas suas trajetórias de tensão são diferentes. No caso de cisalhamento não drenado, surge a questão se as cargas, devido à construção do maciço, conjuntamente com à deformação do material subjacente rico em lama, induzem diretamente poropressões na sequência de areias fofas, o que levaria a uma ruptura não drenada.

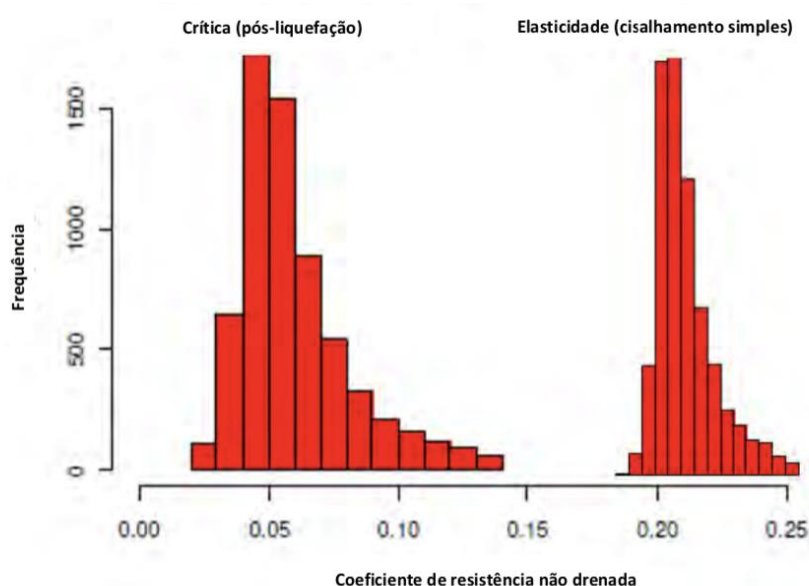


Figura 43 - Resistências de escoamento para dados de CPT em depósitos arenosos.

Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

O mecanismo de cisalhamento é baseado em cisalhamento não drenado no material rico em lama, geralmente quando depositado em porções mais baixas, juntamente com a resistência mobilizada por atrito nas areias depositadas em porções mais elevadas. A liquefação nas areias apoiadas em camadas argilosas é induzida por deformação não controlada de um mecanismo de deslizamento com um fator de segurança igual a 1. Um exemplo de uma barragem de rejeitos que exibiu esse mecanismo de falha é a barragem de *Los Frailes* na Espanha. O deslizamento nas lamas induz uma ruptura associada a um mecanismo de deformação antes do início da ruptura por cisalhamento e, além disso, o mecanismo de ruptura por cisalhamento não leva em conta a resistência tridimensional dos materiais. Além disso, mecanismos de ruptura por cisalhamento são, muitas vezes, acompanhados pelo surgimento de uma estrutura em formato de bloco conhecida como *graben*, no início do movimento.

O mecanismo de gatilho alternativo relacionado à deformação é denominado de extrusão lateral, com referência à movimentação horizontal de lama mais mole devido ao carregamento que induz um efeito correspondente de alongação nas areias subjacentes. O mecanismo de extrusão lateral é um pouco mais indireto, pois questiona se mudanças de tensão na areia subjacente à camada rica em lama, quando essa sofre deformação, resulta em uma trajetória de tensões que leva ao colapso e liquefação estática. Apesar de não ter sido incluída na lista de Martin e McRoberts (1999), a extrusão lateral como um mecanismo de gatilho de liquefação estática não é nova ou sem precedentes. Ela foi identificada por Jefferies e Been (2016) em seus estudos sobre a liquefação estática na barragem de *Nerlerk*, onde afirmam que: “A natureza perigosa de trajetórias de tensões médias declinantes, em termos de comportamento de liquefação, causada por extrusão lateral, não era muito bem compreendida em 1983.”

O caso de liquefação estática de areias associado à ruptura em 1938 da barragem de *Fort Peck* tem alguma similaridade com o caso de *Nerlerk*, pois foi interpretado como tendo sido causado por ruptura por cisalhamento de uma fundação em folhelho pouco resistente. A diferença reside no mecanismo de deformação da fundação, mas o resultado líquido na criação de mudanças de tensão na areia saturada é similar. Um caso importante de liquefação estática ocorreu no Complexo de Germano em 2005, quando o dique foi alteado sobre lamas intercaladas e misturadas, na área da Baía 4, sofrendo uma súbita ruptura de alta

mobilidade e movendo-se rapidamente por uma distância de 80 m. Na época, a ruptura da Baía 4 foi atribuída à liquefação.

Sasitharan *et al.* (1993) demonstrou que um depósito granular solto pode entrar em colapso como resultado de um carregamento lento, assim como durante carregamento rápido, mobilizando uma resistência que é muito menor do que a resistência de atrito máxima. Skopek *et al.* (1994) demonstrou a mecânica do colapso seguindo as trajetórias de carga utilizadas acima com areia seca e encontrou uma súbita diminuição do volume, essencialmente para uma mesma condição de tensão. Esses dois conjuntos de experimentos demonstram a importância dos ensaios de laboratório para mapear uma superfície de deformação plástica, separando estados colapsantes de estados não colapsantes, em solos soltos e contrácteis como rejeitos, para uma estimativa representativa de colapsos por liquefação.

Os ensaios também são úteis na compreensão do papel de cargas cíclicas induzidas por abalos sísmicos que levam à liquefação, conforme Figura 44. Durante o carregamento cíclico, as tensões de cisalhamento variam com o tempo e isso pode provocar um aumento da poropressão, resultando em uma redução de p' . Como mostrado, a trajetória de tensões migra para a superfície de deformação plástica e, no momento da interseção, acontece liquefação sob as tensões estáticas aplicadas. A sensibilidade do carregamento cíclico depende da magnitude da tensão de cisalhamento cíclica, da duração do carregamento dinâmico, das tensões estáticas existentes e do estado das areias do rejeito.

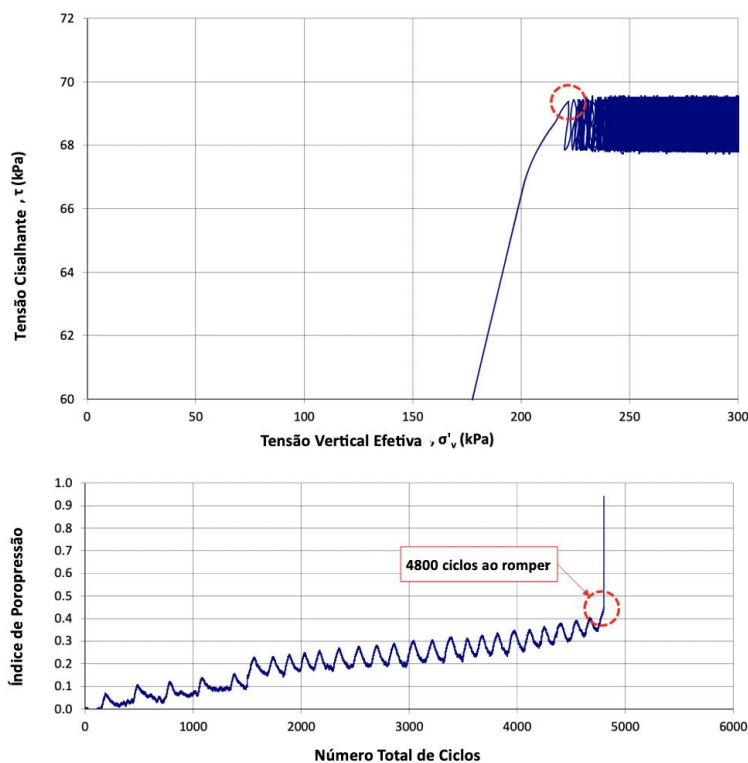


Figura 44 - Trajetórias de tensões durante carregamento cíclico. Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

O mecanismo de extrusão lateral baseia-se na presença de areias fofas, saturadas, sobrejacentes a lamas moles, com confinamento da argila, que varia de acordo com o perfil construído. À medida que a altura da estrutura cresce, a lama é carregada verticalmente, mas tende a ser expelida ou espalhar lateralmente, como se espremendo um tubo de pasta de dente. Dessa forma, as areias sobrejacentes tendem se mover com a lama, mas apresentam baixa ductilidade. Como resultado, surgem mudanças de tensão que tendem a reduzir o confinamento lateral das areias. Isso induz ao colapso da areia saturada, ou desenvolvimento de trincas (fraturas) no material insaturado. Esse mecanismo, sem liquefação, é bem conhecido por projetistas de aterros sobre argilas moles. Sob essas condições, a deformação lateral da fundação resulta muitas vezes em trincas verticais por tração do material de aterro sobrejacente. Na ruptura, não se pode confiar na resistência ao cisalhamento do aterro por causa da ausência de resistência ao cisalhamento ao longo das trincas abertas no mesmo.

O mecanismo de extrusão lateral que leva ao colapso, pode ser comprovado por meio da realização de ensaios de compressão triaxial drenados que adotam uma trajetória de tensões especialmente projetada. Designados como ensaios de colapso por extrusão, eles simulam a redução da tensão horizontal na areia pela extrusão da lama, mantendo as tensões verticais constantes. Um exemplo de resultado de ensaio é mostrado na Figura 45, realizado em uma amostra contráctil com um parâmetro de estado inicial $\Psi = +0,01$ e outra amostra com $\Psi = +0,04$. Esses valores estão do lado contráctil e, como tal, tendem a delimitar o estado do comportamento do material arenoso. Em ambos os casos, como a tensão de cisalhamento ao longo dessa trajetória de carregamento aproxima-se da linha de atrito máxima, o colapso ocorre de forma abrupta e repentina depois de apenas pequenas deformações na areia.

Vale ressaltar que a saturação é outra condição necessária para o deslizamento fluido por liquefação, sendo útil traçar, graficamente, como as condições de saturação mudam ao longo do tempo, em resposta a eventos de alteamento da barragem, por exemplo.

O fenômeno da liquefação do solo é reconhecido há muitos anos, sendo que Terzaghi e Peck (1967) se referiram à “liquefação espontânea” para descrever a súbita perda de resistência de solos muito fofos, como areia, que promovem deslizamentos devido a um leve distúrbio. O fluxo por liquefação também é denominado de liquefação estática e, no entanto, como o fenômeno pode ser desencadeado por cargas estáticas ou cíclicas, o termo “fluxo por liquefação” (*flow liquefaction*) é comumente utilizado.

O solo é constituído por partículas, e a resistência ao cisalhamento deve-se principalmente ao atrito entre essas partículas. A magnitude da resistência ao cisalhamento é controlada pela tensão normal (efetiva) entre as partículas do solo, que é controlada pelo peso do solo acima de um determinado grão (ou tensão geoestática) e a pressão da água nos espaços vazios. Quanto maior a tensão geoestática efetiva, maior a resistência ao cisalhamento. Quando os solos são saturados com água, quanto maior a pressão da água, menor a resistência ao cisalhamento. Em um talude, quanto mais íngreme o talude e quanto mais pesados os solos internos ao talude, maior a tensão de cisalhamento.

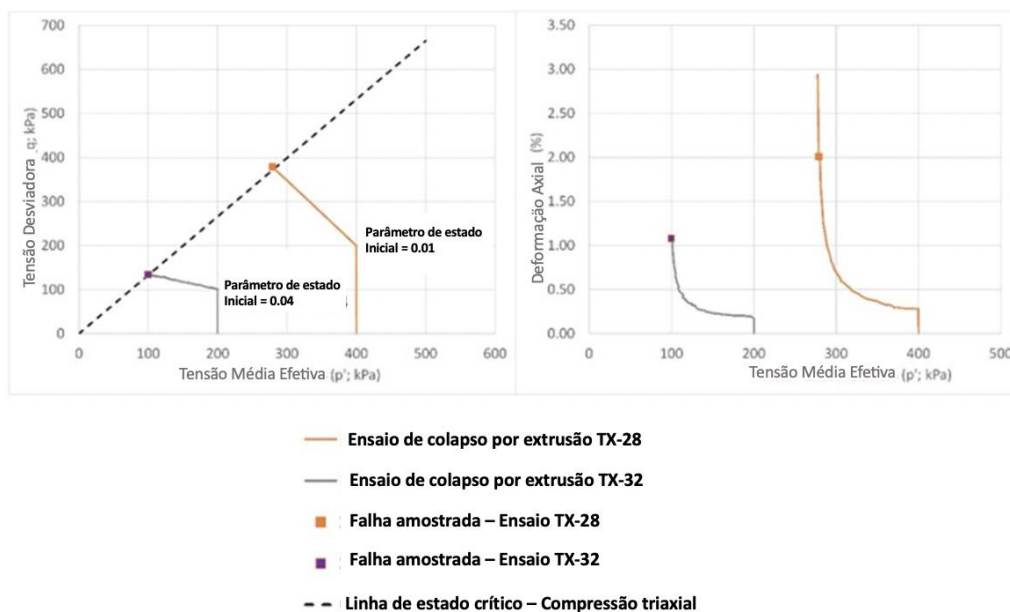


Figura 45 - Resultado típico de ensaio de extrusão lateral em areias. Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

Em função dos espaços vazios na estrutura do solo, as partículas podem mover-se sob carregamento ou descarregamento (cisalhamento), e os espaços vazios podem diminuir (contração de solos fofos) ou aumentar (dilatação de solos densos) em volume. A perda de resistência durante a liquefação estática é iniciada quando o solo tem tendência a sofrer uma rápida contração de volume quando cisalhado. A rápida contração do volume é caracterizada por um colapso interno da estrutura do solo, no que diz respeito ao arranjo dos grãos e a interação com os vazios. Em dada profundidade, os espaços vazios do solo são preenchidos com água e, quando a tendência para a rápida contração do volume ocorre rapidamente, a tensão no solo é transferida imediatamente para a água, resultando em um rápido aumento da pressão da água (poropressão). Esse rápido aumento da poropressão provoca uma rápida diminuição da tensão efetiva normal entre as partículas do solo, e, nesse caso, as partículas podem flutuar na água. Essa diminuição da tensão efetiva normal entre as partículas do solo resulta em perda rápida e significativa da resistência ao cisalhamento, que é atribuída ao fenômeno de liquefação estática.

A perda de resistência devido à liquefação estática ocorre quando o carregamento ou o descarregamento resultam em deslizamento entre as partículas do solo, produzindo uma tendência à rápida contração do volume.

Para se ter instabilidade em uma barragem devido à liquefação estática são necessárias, no mínimo, as seguintes condições:

- Materiais saturados fofos, que apresentam uma tendência à rápida contração de volume sob carregamento (natureza contrátil), resultando em baixas resistências de cisalhamento não drenadas (liquefeitas);
- Altas tensões de cisalhamento no talude em relação às resistências não drenadas liquefeitas;
- Evento(s) que podem servir de gatilho à perda de resistência nos materiais;
- Um volume suficiente de materiais saturados, contrátil e confinados para que a instabilidade se manifeste.

Existem muitos eventos que podem desencadear a liquefação estática e, dentre eles, têm-se:

- Carregamento rápido, como alteamentos ou lançamento de rejeitos;
- Carregamento cíclico rápido, como sismos ou detonações;
- Carga por fadiga, como detonações repetidas;
- Descarregamento, tais como: Aumento dos níveis de água no solo, movimentos em fundações ou camadas pouco resistentes (ou mal compactadas);
- Erosão interna e/ou *piping*;
- Interação humana;
- Perda localizada de resistência devido ao fluxo de nascentes subterrâneas;
- Perda de sucção e resistência em zonas não-saturadas acima do nível da água;
- *Creep* (deformações específicas que se desenvolvem com o tempo sob carga constante).

5 ESTATÍSTICAS DAS FALHAS DE BARRAGENS

Os estudos de levantamento de dados referente às rupturas históricas, foram iniciados pelo ICOLD em 1964 e, em 2001, com a publicação do *Bulletin 121*, consolidou-se uma base referencial dos casos mais substanciais. Desde então, diversas entidades e autores possuem base de dados diferenciada, que são atualizadas conforme o propósito de cada estudo, mas que na maioria das vezes, possuem algumas divergências entre os dados que são pontuados por cada método de análise.

De acordo com os dados publicados pelo CSP2 – *Center for Science in Public Participation*, e levando em consideração dados históricos de falhas em barragens de rejeito entre os anos de 1900 e 2016 (até agosto de 2016), tem-se o registro total de 289 rupturas e incidentes. De um modo geral, se essas falhas forem separadas pelo nível de severidade das perdas e volume liberado, bem como fatores associados ao tipo de estrutura, percebe-se que 63% das rupturas estão associadas a falhas de engenharia ou nas instalações que não são classificadas como muito graves e graves, sem perda de vidas, conforme Tabela 13. Aproximadamente 32% das rupturas resultam em perdas de vidas e grande magnitude de danos.

Avaliando os dados apresentados, tem-se uma elevação abrupta na década de 60, em relação aos anos anteriores, que pode ser justificada pelo início das grandes construções de reservatório de rejeitos com o desenvolvimento progressivo da mineração. Até os anos mais recentes, há uma redução no número total de falhas, mas, em relação à gravidade dos incidentes, os registros entre 2000 e 2009 foram os maiores, com 10 casos, tendo sido 9 na década anterior.

Em setembro de 2014, o total de falhas era de 268, ou seja, em dois anos tem-se o registro adicional de 21 novos casos, que representam uma elevação de falhas de 8%.

Na medida em que as estruturas vão se tornando antigas, requerem mais manutenção e cuidados referentes à garantia de estabilidade e, caso esses recursos sejam minimizados, as falhas são um fato. Mas com os avanços tecnológicos que são apresentados a cada momento, ampliando ainda mais a noção do comportamento dessas estruturas e as solicitações impostas, a justificativa para que o número de falhas e incidentes ainda seja elevado é um grande desafio.

Tabela 13 - Estatísticas das falhas em barragem de rejeito ao longo dos anos, por tipo de ruptura ou incidente. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)

Rupturas/Incidentes - Barragens (até agosto de 2016)						
Rupturas muito graves de barragens de rejeito	Rupturas graves de barragens de rejeito	Outras rupturas de barragens de rejeito	Outros incidentes relacionados a rejeito	Demais rupturas não relacionadas a rejeitos ou desconhecida	TOTAL	
Perda múltipla de vidas (~ 20) e/ou liberação de descarga total \geq 1.000.000 m ³ e/ou deslocamento de material em mais de 20 km ou mais	Perda múltipla de vidas e/ou liberação de descarga total \geq 100.000 m ³ e/ou deslocamento de material em mais de 20 km ou mais	Falhas de engenharia/instalações que não sejam classificadas como Muito Graves ou Graves, sem perda de vidas	Rupturas que não foram classificadas como 1, e ou 3	Incidentes não-rejeitos: águas subterrâneas, rochas residuais, etc.		
1	2	3	4	5		
2010-19	6	6	14	2	1	29
2000-09	10	8	10	1	0	29
1990-99	9	12	24	1	0	46
1980-89	5	9	38	4	1	57
1970-79	5	8	40	0	3	56
1960-69	5	3	41	0	3	52
1950-59	0	0	7	0	0	7
1940-49	1	1	5	0	0	7
1930-39	1	0	2	0	0	3
1920-29	1	0	0	0	0	1
1910-19	0	1	1	0	0	2
1900-09	-	-	-	-	-	0
43	48	182	8	8	289	
14,9%	16,6%	63,0%	2,8%	2,8%	32%	

*Fonte: Center for Science in public participation (CSP2)

Considerando o tipo de alteamento e a função da estrutura, aproximadamente 32% das falhas ocorreram em barragens construídas e alteadas pelo método por montante, o que poderia levar a uma interpretação, que pode ser equivocada, de que se trata do maior quantitativo de instabilidades. De fato, de posse dos dados que foram possíveis de serem levantados, este é o maior quantitativo, mas, conforme Tabela 14, tem-se que, aproximadamente, 43% das falhas não foram categorizadas, ou seja, não se tem registros do tipo construtivo adotado ou da

funcionalidade da estrutura. Dessa forma, caso 63 rupturas ou incidentes com dados não informados forem associadas a barragens de método construtivo por montante, por exemplo, os percentuais igualam-se às falhas consideradas por montante.

Tabela 14 - Falhas por tipo construtivo ou funcionalidade das barragens de rejeito.

Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)

Tipo de Ruptura	Tipo de alteamento / função									TOTAL
	Montante	Montante e Linha de Centro	Jusante	Jusante e Montante	Linha de Centro	Gravidade	Retenção de Água	Outros	Não informadas	
1	13		2	1	1		3		23	43
2	14		3			1	2	1	27	48
3	62	1	21		10		21	2	65	182
4			2		1		1		4	8
5	2						2		4	8
	91	1	28	1	12	1	29	3	123	289
	31,5%	0,3%	9,7%	0,3%	4,2%	0,3%	10,0%	1,0%	42,6%	

A China e os Estados Unidos lideram os casos de rupturas muito graves de barragens de rejeitos (Tipo 1), com oito casos por país, seguidos por 6 casos nas Filipinas, conforme Tabela 15. Considerando todos os tipos de rupturas e incidentes, o Brasil ocupa o quinto lugar, juntamente da Austrália, com um total de nove rupturas entre o período considerado, conforme dados da Tabela 16. Em 2014, o Brasil era o oitavo da lista com oito rupturas, sendo que para esse novo levantamento, foi adicionada a ruptura ocorrida na Barragem de Fundão. Aproximadamente 83% das falhas em barragens de rejeito são relacionadas a somente 14 países dos 193 existentes no mundo.

A Tabela 17 apresenta as falhas contabilizadas para o Brasil para o estudo citado e, o que se percebe, é o grande número de lacunas em branco, sem informações suficientes para contabilizar adequadamente os danos provocados pelas falhas.

Tabela 15 - Tipos de rupturas e incidentes por país. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)

	Rupturas/Incidentes por país						
	1	2	3	4	5		
África	3	1	7	1		12	4,2%
Armênia			1			1	0,3%
Austrália			8	1		9	3,1%
Bélgica					1	1	0,3%
Bolívia		1				1	0,3%
Brasil	3	4	2			9	3,1%
Bulgária	1	3				4	1,4%
Canadá	2	4	15	1	4	26	9,0%
Chile	2	3	30			35	12,1%
China	8	4	4	1		17	5,9%
Espanha		2	2			4	1,4%
Filipinas	6	4	7			17	5,9%
Finlândia		1				1	0,3%
França			2			2	0,7%
Guiana	1					1	0,3%
Hungria	1		1			2	0,7%
Itália	1					1	0,3%
Iugoslávia		1				1	0,3%
Japão		1	4			5	1,7%
Macedônia		1				1	0,3%
México	2		2			4	1,4%
Nova Zelândia			1			1	0,3%
Pensilvânia			1			1	0,3%
Peru		2	3			5	1,7%
Portugal			1			1	0,3%
Reino Unido			16		1	17	5,9%
Romênia	2		1			3	1,0%
Rússia	2	1				3	1,0%
Sibéria			1			1	0,3%
Suécia	1					1	0,3%
USA	8	14	70	4	2	98	33,9%
Indefinido		1	3			4	1,4%
Total	43	48	182	8	8	289	

Em relação ao tipo de rejeito armazenado nas barragens, os resíduos de cobre são contabilizados em 64 falhas (22% do total de falhas), seguido do ouro com 48 (17%), fósforo com 28 (10%), carvão com 24 (8%), chumbo com 19 (7%), ferro com 16 (6%) e alumínio com sete (2%), sendo que juntos referem-se a 71% do total de falhas.

Tabela 16 - Ranking dos países em termos de rupturas e incidentes de barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)

	Ranking das Rupturas/Incidentes					TOTAL	
	1	2	3	4	5		
1º	USA	8	14	70	4	2	98
2º	Chile	2	3	30			35
	China	8	4	4	1		17
3º	Filipinas	6	4	7			17
	Reino Unido			16		1	17
4º	África	3	1	7	1		12
5º	Brasil	3	4	2			9
	Austrália			8	1		9
	Peru		2	3			5
6º	Japão		1	4			5
	México	2		2			4
	Bulgária	1	3				4
7º	Espanha		2	2			4
	Indefinido		1	3			4
							240

83,0%

Tabela 17 - Falhas ocorridas no Brasil até setembro de 2016. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)

TIPO RUPTURA	MINA/PROJETO - LOCALIZAÇÃO	MINERAL	TIPO BARRAGEM	ALTURA DA BARRAGEM (metros)	VOLUME ARMAZENADO (m³)	NUMERO INCIDENTE NO ICOLD	DATA DO INCIDENTE	DANO (metros cúbicos)	MORTES
1	Fundão (MG)	Fe	Montante	90	55 M	-	5/Nov/15	32.000.000	19
2	Herculano Itabirito (MG)	Fe				-	10/Set/14		3
1	Mineração Rio Pomba Cataguases (MG)	Al				-	10/Jan/07	2.000.000	
2	Mineração Rio Pomba Cataguases (MG)	Al				-	Mar/06	400.000	
1	Mineração Rio Pomba Cataguases (MG)	Al				-	2003	1.200.000	
2	Sebastião das Águas Claras, Nova Lima (MG)	Fe				-	22/Jun/01		2
3	Minera Serra Grande: Crixas, Goiás	Au	Jus/mont	41	2.25Mt	214	Fev/94		
3	Pico de São Luís, Minas Gerais	Fe		20		192	2/Out/86		
2	Itabirito, Minas Gerais	Fe	Gravidade	30		189	Mai/86	100.000t	7

Considerando os modos de falha das barragens de rejeito, tem-se na Tabela 18 que, aproximadamente, 17% das rupturas estão associadas ao galgamento da barragem, seguida pela instabilidade de taludes por falha estática com 16%. A instabilidade sísmica por terremoto é o terceiro modo de falha mais frequente com, aproximadamente, 16%. Apesar dos valores expressivos, ainda se tem um pouco mais de 19% das rupturas sem definição do modo de falha predominante.

Para as considerações da relação do tipo de material do maciço com as falhas, tem-se na Tabela 19 que 37% referem-se às barragens com maciço em solo ou rejeitos e, predominantemente, para as que utilizam os rejeitos.

Tabela 18 - Modos de falhas de barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)

Modos de Falha		Tipos de Ruptura					TOTAL		
		1	2	3	4	5			
Desconhecidos ou Sem informação	Barragens Ativas	14	15	16			45	56	19,4%
	Barragens Inativas	1	1	4			6		
	Rejeitos Inativos			4			4		
	Lençol Freático				1		1		
Galgamento	Barragens Ativas	3	4	22			29	48	16,6%
	Barragens Inativas	2	1	12			15		
	Rejeitos Inativos			3			3		
	Rejeitos Ativos			1			1		
Instabilidade de Talude (Falha Estática)	Barragens Ativas	6	4	18			28	45	15,6%
	Barragens Inativas		2				2		
	Rejeitos Inativos			15			15		
Terremoto (Instabilidade Sísmica)	Barragens Ativas	2	4	16			22	42	14,5%
	Barragens Inativas		1	4			5		
	Rejeitos Inativos			5			5		
	Rejeitos Ativos			10			10		
Erosão Interna e Piping (Maciço e Fundação)	Barragens Ativas	2	3	11			16	25	8,7%
	Barragens Inativas			1			1		
	Rejeitos Inativos		1	7			8		
Falha estrutural de fundação	Barragens Ativas	4	1	8			13	23	8,0%
	Barragens Inativas		1	1			2		
	Rejeitos Ativos			8			8		
Estrutural	Barragens Ativas	3	5	6			14	20	6,9%
	Barragens Inativas	2					2		
	Rejeitos Inativos		1	1	1		3		
	Lençol Freático					1	1		
Erosão Externa	Barragens Ativas	2	2	3			7	11	3,8%
	Rejeitos Inativos			3			3		
	Rejeitos Ativos			1			1		
Subsidência	Barragens Ativas	1					1	1	0,3%
Lençol Freático			2		6	7	15		5,2%
Falha generalizada em Barragem Ativa		1					1		0,3%
Sem informação				2			2		0,7%
		43	48	182	8	8	289		

Tabela 19 – Tipos de barragens nas rupturas de barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de CSP2 (2016)

Material do Aterro	Tipos de Ruptura e Incidentes					TOTAL	
	1	2	3	4	5		
Rejeitos	7	10	43		2	62	21,5%
Solo		5	37	1	2	45	15,6%
Rejeitos arenosos ciclados	4	2	7	1		14	4,8%
Resíduos Mina	3	1	7	1		12	4,2%
Enrocamento	2		4			6	2,1%
Outros	1	2	2			5	1,7%
Rejeitos/Solo			2			2	0,7%
Solo/Enrocamento			1	1		2	0,7%
Solo/Resíduos Mina	1					1	0,3%
Não identificado	25	28	79	4	4	140	48,4%
	43	48	182	8	8	289	
	14,9%	16,6%	63,0%	2,8%	2,8%		

Em dezembro de 2018, a Organização *World Mine Tailings Failures* (WMTF) atualizou os dados apresentados pela CSP2, mas, o fato de a base classificatória ser um pouco diferenciada faz com que o comparativo entre os dois estudos seja um pouco complexo. Até a data de 28 de agosto de 2017, a WMTF contabilizou 341 falhas, ao passo de que a CPS2 apresentava 289 falhas até a data de 8 de agosto de 2016. No presente trabalho, optou-se por trabalhar mais a fundo com os dados da CSP2 por eles terem um volume de informação mais completa no que diz respeito ao detalhamento das rupturas e suas particularidades. Outra razão é que o total numérico da base de dados da WMTF, que é de 355 casos de falhas, diverge dos valores compilados apresentados nas tabelas resumo do estudo, que tentam uma aproximação dos dados da CSP2. Por exemplo, ao somar os dados da tabela resumo das falhas tipo 1, 2, 3 e 4 apresentadas no arquivo da WMTF, tem-se um total de 247, que é divergente da base de dados total com valor 355, sendo que não é apresentado a qual quantitativo se referem a diferença de 108 falhas. Ainda, se somarmos somente os mesmos tipos de falha apresentados nas tabelas da CSP2, temos um valor de 281 e, é improvável que ocorresse uma diminuição no número das falhas de 281 para 247, entre o período de agosto de 2017 e dezembro de 2018, se as bases de dados fossem as mesmas.

Considerando somente os dados apresentados pela WMTF a partir da data de agosto de 2017, temos o incremento de mais 15 rupturas e incidentes, sendo:

- oito do Tipo 1, ou seja, Muito Graves;
- duas do Tipo 2, consideradas Graves;
- uma do Tipo 3, relacionadas a outras rupturas; e
- E três rupturas sem informação classificatória.

Dessas, cita-se mais uma ruptura ocorrida no Brasil em fevereiro de 2018, em Barcarena, de propriedade da Alunorte (Hydro Alu Norte/Norsk Hydro), em uma barragem ativa de rejeitos de bauxita que foi identificada como galgamento. A inclusão dessas rupturas pouco afeta os percentuais já apresentados, sendo necessário considerar que:

- O valor das falhas referentes à galgamento elevam-se de 48 para 52, ainda sendo o modo de falha mais representativo, mesmo considerando a adição de mais duas falhas associadas a instabilidade de talude por falha estática. A inclusão de mais uma falha estrutural faz com que esse modo de falha seja um pouco mais representativo que erosão interna e *piping*.
- O acréscimo de mais quatro falhas nos USA e uma no Chile não altera o ranking dos países no total de rupturas e incidentes. Entretanto, a soma de mais uma falha nas Filipinas faz com que ela se diferencie da China e Reino Unido, ficando isolada no terceiro lugar. Assim, China e Reino Unido ocupariam o quarto lugar, África o quinto (mesmo sendo somada mais uma ruptura), e o Brasil estaria em sétimo lugar com o acréscimo da ruptura de Barcarena, ficando Austrália em sexto, pois recebeu mais duas rupturas; e
- Para o tipo de material do maciço e método construtivo, não há informações substanciais.

A Associação dos Funcionários Estaduais de Barragens dos Estados Unidos - *Association of State Dam Safety Officials (ASDSO)* apresenta um estudo com base de dados entre 2010 e 2017 que considera o galgamento, como sendo o modo de falha mais recorrente para barragens de água e rejeito dos Estados Unidos, conforme Figura 46. Considerando que os Estados Unidos apresenta o maior quantitativo de falhas em barragens apresentado nos estudos deste capítulo, é

razoável avaliar tais dados e, para um total de, aproximadamente, 280 falhas, o galgamento responde por 60% dos eventos. De janeiro de 2005 a junho de 2013 foram relatadas 173 rupturas de barragens e 587 incidentes, sendo que, os incidentes são considerados episódios que sem intervenção poderiam resultar em rupturas de barragens. Do total de rupturas, a maior parte corresponde ao galgamento, com gatilhos associados a inundações e variáveis hidrológico-hidráulicas.

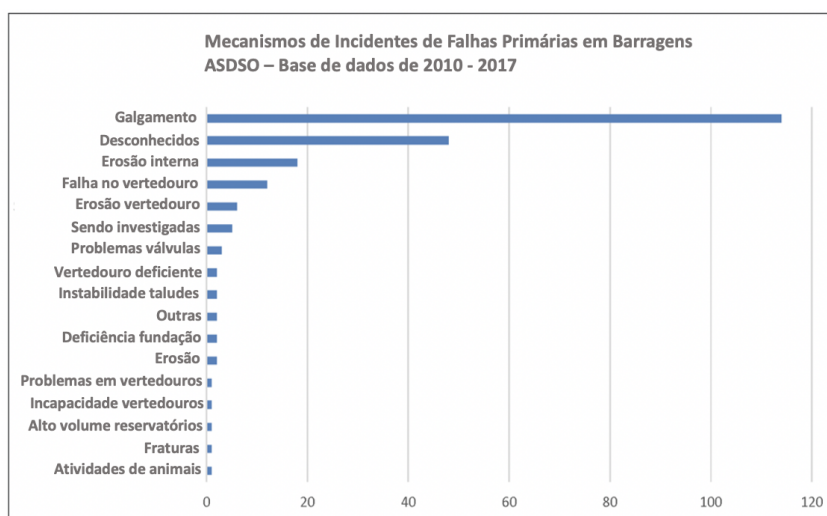


Figura 46 - Modos de falha em barragens de água e rejeitos dos Estados Unidos.

Fonte: Adaptado de ASDSO (2018)

Zhang (2007) contabilizou 900 falhas em barragens de rejeitos e água, excluindo estrutura da China, sendo 593 de barragens em solo, ou seja, cerca de 65%, sendo que a maioria era referente a estruturas nos Estados Unidos. Do quantitativo das barragens em solo, 90% não apresentavam dados referentes ao tipo de estrutura e, dos dados considerados, 38 estruturas eram em solo homogêneo, 12 com face de enrocamento e 9 com núcleo e zoneamento.

Aproximadamente 96 estruturas tinham entre 1 a 5 anos, sendo 85 até 1 ano, 62 entre 10 e 20 anos e 50 entre 20 e 40 anos. Ainda foram contabilizadas 6 estruturas com mais de 150 anos. Em termos de altura, mais da metade era até 15 m, cerca de 301 estruturas, sendo 135 barragens entre 15 e 30 m.

O percentual relativo ao galgamento ainda é bem representativo (37%), sendo nesse estudo de caso superado por problemas referentes à qualidade dos materiais

(43%) que, juntos, representam 80% de todas as falhas. Como qualidade dos materiais, tem-se, por exemplo questões associadas a *piping* e deslizamentos, sendo os percentuais representativos dentro do grupo de 58% e 18%, respectivamente. Avaliando os dados em conjunto, tem-se que os percentuais referentes a modos de falha em barragens de solo consideram o galgamento com 37%, *piping* 34% e deslizamentos com 11%.

O International Rivers estima que, em 2019, havia cerca de 57 mil grandes barragens no mundo, que são as estruturas com mais de 15 m de altura, ou com reservatório contendo mais de 3 milhões de m³, sendo que destas, 300 possuem mais de 150 m. A estimativa é que somente 5% dessas barragens são de rejeitos, ou seja, 2.850, sendo as demais referentes à energia e à acumulação de água. Somente a China possui 23.000 destas grandes estruturas, seguido dos Estados Unidos com 9.200 e, em números menores por Índia, Japão e Brasil.

De acordo com dados do ICOLD (2020), o valor total de grandes barragens é de 57.299, sendo que a China possui 42% dessas estruturas (23.841 barragens), Estados Unidos com 16% (9.363), Índia com 4.408 (8%), Japão com 3.130 (5%) e Brasil com 1.365 estruturas e com percentual de 2% do total. Do total de barragens, 65% são estruturas em solo, sendo que 14% são estruturas em concreto gravidade e 13% referem-se a barragens de enrocamento.

A barragem de *Otaniike* no Japão possui 1.470 anos, sendo que o país ainda abriga mais quatro estruturas com mais de mil anos, e oito grandes barragens entre 400 e 900 anos. No cenário de barragens com idade entre 130 e 1470 anos, tem-se 20 barragens, sendo 13 no Japão, duas na República Checa e uma unidade no Afeganistão, Síria, Irã e Espanha. Na Tabela 20 tem-se a listagem das maiores barragens no mundo, com identificação da finalidade e localidade.

Um estudo apresentado por Cenderelli (2000) identificou que a probabilidade de ruptura de barragens em solo e enrocamento é de cerca de 1 a cada 36 barragens e, para as barragens de concreto, 1 a cada 59. Os dados avaliados consideraram a série histórica de rupturas entre 1831 e 1965 e são apresentados na Tabela 21.

Tabela 20 - Maiores barragens no mundo. Fonte: Adaptado de ICOLD (2020)

Nome da Barragem	Altura (m)	Finalidade	País
ROGUN (C)	335,0	Energia e Irrigação	Tajikistan
SHUANGJIANGKOU (C)	312,0	Energia	China
JINPING 1	305,0	Energia e controle de cheias	China
NUREK	300,0	Energia e Irrigação	Tajikistan
LIANGHEKOU (C)	295,0	Energia	China
XIAOWAN	294,0	Energia, controle de cheias, irrigação e navegação	China
XILUODU	286,0	Energia, controle de cheias e navegação	China
GRANDE DIXENCE	285,0	Energia	Switzerland
BAIHETAN (C)	277,0	Energia	China
BAKHTIYARI (C)	275,0	Energia e controle de cheias	Iran
ENGURI	272,0	Energia e Irrigação	Georgia
DIAMER-BHASHA (C)	272,0	Energia, Irrigação e abastecimento	Pakistan
YUSUFELI (C)	270,0	Energia	Turkey
NARSINGHPURA	264,0	Irrigação	India
MANUEL MORENO TORRES (CHICOASÉN)	262,0	Energia	Mexico
NUOZHADU	262,0	Energia, controle de cheias e navegação	China
TEHRI HPP	260,0	Energia e Irrigação	India
HACIXIA	254,0	Energia	China
MAUVOISIN	250,0	Energia	Switzerland
LAXIWA	250,0	Energia	China

Tabela 21 - Probabilidade de ruptura de barragens, considerando dados de 1831 a 1965. Fonte: Adaptado de Cenderelli (2000)

Tipo de material do maciço	Número de barragens construídas	Número de rupturas	Taxa de Ruptura	Probabilidade
Solo	4551	121	2,66%	2/75
Enrocamento	285	13	4,56%	1/22
Total	4836	134	2,77%	1/36
Concreto - Arco	566	7	1,24%	1/81
Concreto - Gravidade	2271	40	1,76%	1/53
Concreto - Contrafortes	373	7	1,88%	1/57
Total	3210	54	1,68%	1/59
Total Geral	8046	188	2,34%	1/43

Ainda segundo o ICOLD, ocorrem 2 a 5 falhas de grande magnitude a cada ano, no caso das grandes barragens de rejeito. Azam (2010) avaliou um universo de 18.401 minas e a taxa de ruptura entre 2000 e 2010 era de 1,2%. Robertson (2011) sinaliza que o risco potencial de rupturas tem se elevado por um fator de 20 a cada 1/3 de século.

Blight (2010) apresenta um levantamento das principais causas de rupturas e barragens de rejeito, sendo a instabilidade de taludes a causa principal com 22% do total de ocorrências, conforme Figura 47.

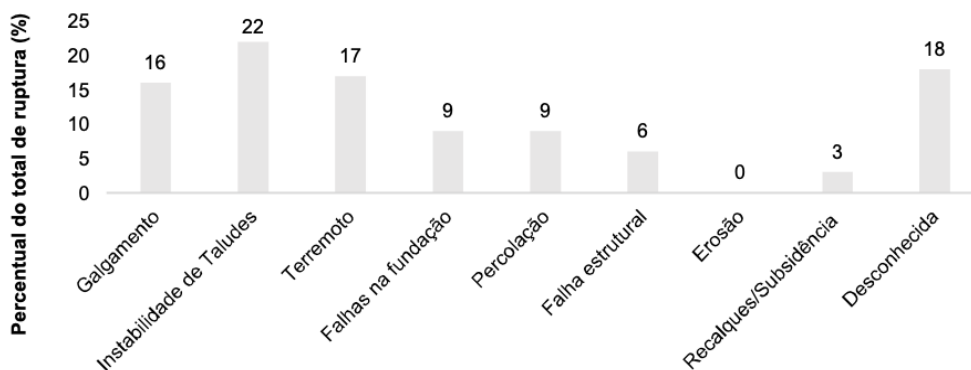


Figura 47 - Causas de rupturas em barragens de rejeito. Fonte: Adaptado de Blight (2010)

Os dados anteriormente apresentados demonstram que ainda há muita divergência nas compilações de falhas em barragens, pelo fato de que cada autor considera uma base de dados e uma fundamentação teórica diferenciada. Por exemplo, na maioria das vezes não é claro se as falhas consideram somente ruptura ou outros incidentes e, até mesmo, se as estatísticas referem-se a barragens de rejeito ou água. Com o objetivo de consolidar uma referência mais consistente para o estudo de rupturas, realizou-se o levantamento de rupturas de barragens ocorridas ao longo dos anos, considerando estruturas de armazenamento de água e rejeitos, que efetivamente foram caracterizadas como ruptura.

O estudo foi subdividido em duas partes. Na primeira parte, denominada de Estudo Simplificado, avaliou-se 119 rupturas de barragens de rejeito entre 1961 e outubro de 2019, onde era possível ter um volume mínimo de informações para classificar as rupturas em relação aos modos de falha e magnitude do dano. Na segunda parte, denominada Estudo Completo, foram escolhidas 40 rupturas de barragens de água e rejeitos que continham informações suficientes para uma análise mais robusta, bem como aquelas rotuladas como mais significativas em termos de aprofundamento nos modos de falha. Sendo assim, ao todo, tem-se na Tabela 22 apresenta os dados levantados, por país, para cada Estudo. Ambos os

estudos consideram somente rupturas, excluindo-se os incidentes e demais falhas sem a ruptura da estrutura, sendo ao todo 159 análises. Na Tabela 23 os dados do Estudo Simplificado e, na Tabela 24 do Estudo Completo.

Tabela 22 - Resumo da coletânea de rupturas de barragens de água e rejeito. Fonte: Elaborado pela autora

País	Rupturas do Estudo Simplificado (Rejeito)	Rupturas do Estudo Completo		TOTAL
		Água	Rejeito	
África	5		1	6
Alemanha	1			1
Armênia	1			1
Austrália	2			2
Bolívia	1			1
Brasil	5	11	7	23
Bulgária	3			3
Canadá	6		1	7
Chile	9			9
China	12	1		13
Espanha	3		1	4
Filipinas	8		1	9
Finlândia	1			1
França	1	1		2
Guiana	1			1
Hungria			1	1
Índia	1	1		2
Inglaterra		1		1
Israel	1			1
Itália	1	1		2
Iugoslávia	1			1
Japão	1			1
Libéria	1			1
México	2			2
Mianmar	4			4
Nova Zelândia	1			1
Peru	6			6
Reino Unido*	6			6
Romênia	2			2
Rússia	3			3
Sibéria			1	1
Suécia	1			1
USA	29	9	1	39
Uzbequistão		1		1
TOTAL	119	26	14	159

Tabela 23 - Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Data	País	Localização	Empresa	Tipo de Rejeito	Tipo de Incidente	Quantidade	Impacto
1 de Outubro de 2019	Brasil	Nossa Senhora do Livramento, Mato Grosso	VM Mineração e Construção, Cuiabá	Ouro	Diversas - Ruptura da barragem	67,488 m ³ de rejeitos	Rejeitos percorrem de 1 a 2Km do vale de jusante
10 de julho de 2019	Peru	Mina Cobriza, Distrito de San Pedro de Coris, Provincia de Churcampa, Região Huancavelica	Doe Run Perú S.R.L.	Cobre	Diversas - Ruptura da barragem	67,488 m ³ de rejeitos	Rejeitos atingiram uma área de 41,574 m ² e atingiram o Rio Mantaro
22 de Abril de 2019	Mianmar	Hpakant, Kachin state	Shwe Nagar Koe Kaung Gems Co. Ltd., Myanmar Thura Gems Co. Ltd.	Jade	Galgamento - Falha no sistema de disposição de resíduos		3 funcionários mortos e 54 desaparecidos
9 de Abril de 2019	Índia	Muri, Jharkhand, India	Hindalco Industries Limited	Bauxita	Galgamento - Falha nos tanques de rejeito		Despejada lama em 142mil metros quadrados e número de atingidos ainda é desconhecido
29 de março de 2019	Brasil	Machadinho d'Oeste, Oriente Novo, Rondônia	Metalmig Mineração Indústria e Comércio S/A	Alumínio	Diversas - Ruptura de barragens inativas em função das fortes chuvas		Ruptura atingiu sete pontes, deixando 100 famílias isoladas; sem vítimas fatais e pessoas desalojadas
4 de Junho de 2018	México	Cieneguita mine, Urique, Chihuahua	Mineração Rio Tinto (Cluster Minero de Chihuahua A.C.)	Ouro e Prata	Diversas - Ruptura da Barragem de Rejeitos	249,000 m ³ de rejeitos 190,000 m ³ de solo	Rejeitos percorreram 29 km a jusante e maioria foi depositado no curso do rio Cañitas. O órgão federal de proteção (PROFEPA) disse que os rejeitos não contém cianeto ou metais pesados. Três vítimas fatais e quatro ainda estão desaparecidas
9 de Março de 2018	Austrália	Cadia, New South Wales	Newcrest Mining Ltd	Ouro e Prata	Fundação - Ruptura da barragem em função de material de baixa resistência na fundação	1.33 milhões m ³ de rejeitos	Falha no maciço da barragem
3 de Março de 2018	Peru	Huancapatí (Huancapetí), Provincia de Recuay, Região de Áncash	Compañía Minera Lincuna SA (Grupo Picasso)	Ouro	Galgamento - Colapso do maciço nº 2 após fortes chuvas	80,000 m ³ de rejeitos	O acidente contaminou vários rios inclusive o Sipchoc e o rio Santa
17 de Fevereiro de 2018	Brasil	Barcarena, Pará	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA	Bauxita	Galgamento - Após fortes chuvas mas a empresa continua dizendo que não ocorreu esse fato		Líquido de resíduos alcalinos invadiram áreas residenciais, afetando o sistema de abastecimento de água
17 de Setembro de 2017	Libéria	Kokoya Ouro Mine, Bong County	MNG Ouro Liberia (Redwood Global Inc.)	Ouro e Prata	Galgamento - Ruptura de uma seção entre a camada de geomembrana e galgamento após fortes chuvas	Descarga de 11.500 m ³ de lama contendo cianeto no rio Sien Creek	30 pessoas foram contaminadas como resultado do derramamento tóxico na principal fonte de abastecimento da cidade
30 de Junho de 2017	Israel	Mishor Rotem	Rotem Amfert Negev Ltd. , Israel Chemicals (ICL)	Fosfato	Diversas - Falha na barragem	100,000 m ³ de água contaminada com ácidos	Os resíduos tóxicos causaram uma destruição em mais de 20km de vale
12 de Março de 2017	China	Tonglvshan Mine, Provincia de Hubei	China Daye Non-Ferrous Metals Mining Limited	Cobre e Ouro	Liquefação estática - Falha parcial em uma das ombreiras da barragem, abrindo uma brecha de 200m	200,000 m ³ de rejeitos	Os rejeitos se propagaram por uma área de 27 hectares. Duas vítimas fatais
20 de Dezembro de 2016	Mianmar	Satemu, Hpakant, Estado de Kachin	Jade Palace Company	Jade	Diversas - Falha na barragem		Aproximadamente 50 trabalhadores desaparecidos

Continuação da Tabela 23 – Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Data	País	Localização	Empresa	Tipo de Rejeito	Tipo de Incidente	Quantidade	Impacto
27 de Outubro de 2016	Filipinas	Mina Antamok (Inativa), Itogon, Província Benguet	Benguet Corp.	Ouro	Piping - Fluxo de rejeitos através da drenagem subterrânea após fortes chuvas	Pelo menos 50.000 toneladas de rejeitos	Os rejeitos vazaram no rio Liang, depois no rio Ambalanga até alcançar o rio Agno
27 de Agosto de 2016	USA	New Wales plant, Mulberry, Polk County	Mosaic Co	Fosfato	Piping - Um buraco de 14m de extensão surgiu em uma pilha de fosfogesso, abrindo um caminho de líquidos contaminados no subterrâneo. O líquido alcançou o aquífero Floridan, o maior reservatório de água potável da região	840,000 m ³ de líquidos contaminados	
8 de Agosto de 2016	China	Dahegou Village, Luoyang, Henan province	Luoyang Xiangjiang Wanji Aluminium Co., Ltd.	Bauxita	Diversas - Ruptura da barragem de rejeitos liberando cerca de 2 milhões de metros cúbicos de lama vermelha		Vila totalmente submersa na lama vermelha e cerca de 300 vilarejos evacuados. Muitos animais mortos e fazendas devastadas
15 de Dezembro de 2015	Mianmar	Lamaungkone, Hpakant, Kachin state	Tun Tauk Zabu Jade mining company	Jade	Diversas - Falha na pilha de resíduos		1 trabalhador morreu e cerca de 20 desaparecidos
21 de Novembro de 2015	Mianmar	San Kat Kuu, Hpakant, Kachin state	Hlan Shan Myonwesu, Yadanar Yong Chi, Yadanar Aung Chan	Jade	Diversas - Falha na pilha de resíduos		Pelo menos 113 vítimas fatais
7 de Agosto de 2014	México	Buenavista del Cobre mine, Cananea, Sonora	Southern Cobre Corp. (Grupo México)	Cobre	Diversas - Ruptura da barragem	40,000 m ³ de sulfato de cobre	Lama ao longo de 420km do rio Bacanuchi, tributário do rio Sonora, afetando diretamente 800.000 pessoas
2 de Fevereiro de 2014	USA	Dan River Steam Station, Eden, North Carolina	Duke Energy	Carvão Cinza	Piping - Colapso em uma antiga tubulação de drenagem sob um tanque de cinzas de 1km	Cerca de 82.000 toneladas de carvão cinza tóxico e 100.000 m ³ de água contaminada	Fluxo de detritos até o rio Dan
15 de Novembro de 2013	Armênia	Zangezur Cobre Molybdenum Combine, Kajaran, Syunik province	Cronimet Mining AG	Cobre e Molibdênio	Piping - Problemas na tubulação de descarga de rejeitos		Fluxo de rejeitos até o rio Norashenik por diversos dias
31 de Outubro de 2013	Canadá	Obed Mountain Carvão Mine, northeast of Hinton, Alberta	Sherritt International	Carvão	Piping - Brecha na parede do tanque de contaminantes	Cerca de 670.000 m ³ de resíduos de carvão e 90.000 toneladas de sedimentos	Pluma de lama contaminada de carvão, argila e metais pesados até os rios Apetowun e Athabasca
17 de Dezembro de 2012	Canadá	former Gullbridge minesite, Newfoundland		Cobre	Diversas - Falha de 50m de comprimento no maciço da barragem		Nenhum anúncio advertindo que a água estava contaminado foi emitido para a cidade de South Brook
4 de Novembro de 2012	Finlândia	Sotkamo, Kainuu province	Talvivaara Mining Company Plc	Níquel e Urânio	Piping - Vazamentos no tanque de gesso através de um buraco em forma de funil	Milhões de toneladas de resíduos contaminados	Concentrações de níquel e zinco no rio Snow excedendo os valores permissíveis para consumo humano em 10x. Concentração de urânio em cerca de 10x até 100x mais que o tolerável
1 de Agosto de 2012	Filipinas	Padcal mine, Itogon, Benguet province	Philex Mining Corp.	Cobre, Ouro	Piping - Brecha no tanque de rejeitos No.3 durante fortes chuvas	20,6 milhões de toneladas de rejeitos	Descarga de rejeitos ao longo do Balog que flui até o rio Agno
21 de Julho de 2011	China	Miayang City, Songpan County, Sichuan Province	Xichuan Minjiang Electrolytic Manganese Plant	Manganês	Deslizamentos - Problemas na barragem de rejeitos com deslizamentos causados por fortes chuvas		Rejeitos atingiram rodovias e casas, forçando mais de 272 pessoas a deixar a região. Rejeitos foram até o rio Fujiang deixando 200.000 pessoas sem água potável para consumo

Continuação da Tabela 23 – Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Data	País	Localização	Empresa	Tipo de Rejeito	Tipo de Incidente	Quantidade	Impacto
Maio de 2011	Canadá	Bloom Lake mine, Fermont, Québec	Bloom Lake General Partner Ltd. (then 75% owned by Cliffs Natural Resources Inc.)	Ferro	Diversas - Brecha triangular no taque de rejeitos	Mais de 200.000 m ³ de material contaminado	
25 de Junho de 2010	Peru	Huancavelica	Unidad Minera Caudalosa Chica	Ouro	Diversas - Ruptura da barragem	21.420 m ³ de rejeitos	Contaminação do rio Escalera e do rio Opamayo em 110 km do vale de jusante
29 de Agosto de 2009	Rússia	Karamken, Magadan region	Karamken Minerals Processing Plant	Ouro	Galgamento - Ruptura na barragem de rejeitos após fortes chuvas	Mais de 1 milhão de m ³ de água / 150.000 m ³ de rejeitos / 55.000 m ³ de material da barragem	11 casas foram arrastadas pela lama e ao menos 1 pessoa faleceu
14 de Maio de 2009	China	Huayuan County, Xiangxi Autonomous Prefecture, Hunan Province		Manganês	Diversas - Ruptura da barragem	50.000 metros cúbicos	O deslizamento da ruptura na barragem de rejeitos destruiu casas, matou três pessoas e várias ficaram feridas
27 de Abril de 2009	Brasil	Barcarena, Pará	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA	Bauxita	Galgamento - Sistema de drenagem ao redor da bacia dos rejeitos após fortes chuvas		
22 de Dezembro de 2008	USA	Kingston fossil plant, Harriman, Tennessee	Tennessee Valley Authority	Carvão Cinza	Diversas - Falha na parede de retenção	Cerca de 4.1 milhões m ³ de lama	As cinzas cobriram cerca de 1.6 quilômetros quadrados, com profundidade de até 2m de pó. Rodovias foram cobertas e sistemas de gases romperam. Mias de 12 casas foram danificadas e uma pessoa foi resgatada com ferimentos graves
8 de Setembro de 2008	China	Taoshi, Linfen City, Xiangfen county, Shanxi province	Tashan mining company	Ferro	Galgamento - Colapso do reservatório de resíduos em uma mina ilegal durante as chuvas	190.000 m ³ de rejeitos	A lama deslizou por 2.5 km no vale de jusante, incendiando um mercado e danificando muitas casas. Cerca de 277 foram vítimas fatais e 33 tiveram ferimentos leves
6 de Novembro de 2006	África	Nchanga, Chingola, Zambia	Konkola Cobre Mines Plc (KCM)	Cobre	Piping - Ruptura da tubulação de rejeitos lixiviados		Derrame de rejeitos ácidos no rio Kafue. Alta concentração de cobre, manganês e cobalto nas águas dos rios, prejudicando o consumo de água da população
30 de Abril de 2006	China	near Miliang, Zhen'an County, Shangluo, Shaanxi Province	Zhen'an County Ouro Mining Co. Ltd.	Ouro	Diversas - Ruptura na barragem de rejeitos durante alteamento da barragem		O deslizamento enterrou cerca de 40 quartos de nove famílias, matando 17 pessoas. 5 pessoas tiveram ferimentos graves e foram levadas ao hospital. Mais de 130 pessoas foram evacuadas. Taxas de potássio tóxico foram encontradas no rio Huashui, contaminando cerca de 5km do vale a jusante.
14 de Dezembro de 2005	USA	Missouri	Mississippi Fosfatos Corp.	Fosfato	Instabilidade de taludes - Falha na pilha de fosfogesso, em função da mina tentar aumentar a capacidade do reservatório em taxas de alteamento mais rápidas que o normal (a empresa culpou as fortes chuvas)	Aproximadamente 64.350 m ³	Líquido fluiu até terras pantanosas destruindo a vegetação
30 de Novembro de 2004	Canadá	Pinchi Lake, British Columbia	Teck Cominco Ltd.	Mercurio	Diversas - Barragem da antiga lagoa de decantação (100m de comprimento e 12m) colapsou durante trabalhos de recuperação	6,000 a 8,000 m ³ de rochas, e água com resíduos	Material assoreou mais de 5.500 hectares do rio Pinchi
5 de Setembro de 2004	USA	Riverview	Cargill Crop Nutrition	Fosfato	Diversas - Ruptura de um dique de gesso, com 100m de altura, contendo 150 milhões de litros de água contaminada após passagem do furacão Frances	Cerca de 227.000 m ³ de líquidos ácidos	Líquido derramado percorreu até a baía de Hillsborough
22 de Maio de 2004	Rússia	Partizansk, Primorski Krai	Dalenergo	Carvão Cinza	Diversas - Um dique circular em uma área de 1km ² rompeu despejando 20 milhões de metros cúbicos de carvão cinza. A ruptura deixou um buraco de 50m na barragem	Aproximadamente 160.000 m ³ de cinzas	As cinzas bloquearam os canais de drenagem dos tributários do rio Partizanskaya que se esvaziaram

Continuação da Tabela 23 – Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Data	País	Localização	Empresa	Tipo de Rejeito	Tipo de Incidente	Quantidade	Impacto
20 de Março de 2004	França	Malvésí, Aude	Comurhex (Cogéma/Areva)	Urânio	Piping - Ruptura na barragem após fortes chuvas	30.000 m ³ de líquidos e lamas da decantação de urânio	Elevação da concentração de nitrato em mais de 170 mg/L no canal de Tauran por semanas
3 de Outubro de 2003	Chile	Cerro Negro, Petorca prov., Quinta region	Cia Minera Cerro Negro	Cobre	Diversas - Ruptura da barragem	50.000 toneladas de rejeitos	Rejeitos percorreram 20km no vale de jusante do rio La Ligua
27 de Agosto de 2002	Filipinas	San Marcelino, Zambales	Dizon Cobre Silver Mines, Inc.	Cobre	Galgamento - Vertedouro em duas barragens abandonadas após fortes chuvas		Alguns rejeitos atingiram o lago Mapanuepe Lake e, eventualmente o rio Sto. Tomas
11 de Setembro de 2002	Filipinas	San Marcelino, Zambales	Dizon Cobre Silver Mines, Inc.	Cobre	Galgamento - Vertedouro em duas barragens abandonadas após fortes chuvas		Pequenas vilas foram devastadas pela inundação e mais de 250 famílias tiveram que ser evacuadas
18 de Outubro de 2000	China	Nandan Tin mine, Dachang, Guangxi province		Metal	Diversas - Ruptura em barragem alteada por montante		28 vítimas fatais e mais de 100 casas destruídas
11 de Outubro de 2000	USA	Inez, Martin County, Kentucky	Martin County Carvão Corporation (100% A.T. Massey Carvão Company, Richmond, VA (100% Fluor Corp.)	Carvão	Subsidência- Ruptura na barragem de rejeitos decorrente do colapso de uma mina subterrânea abaixo do reservatório	Cerca de 950.000 m ³ de resíduos de carvão	Cerca de 120 km de rios destruídos e assoreados, matando peixes ao longo dos rios Tug Fork e Big Sandy. A cidades ao longo do rio Tug tiveram o abastecimento de água comprometido
8 de Setembro de 2000	Suécia	Aitik mine, Gällivare	Boliden Ltd.	Cobre	Piping - Ruptura na barragem de rejeitos em função de sistema de drenagem insuficiente (filtro)	Cerca de 2,5 milhões m ³ de líquidos + 1,5 milhões m ³ de água (com resíduos da lama)	
10 de Março de 2000	Romênia	Borsa	Remin S.A.	Cobre	Diversas - Ruptura na barragem após fortes chuvas	22.000 toneladas de rejeitos contaminados de material pesado	Contaminação do rio Vaser, tributário do rio Tisza
30 de Janeiro de 2000	Romênia	Baia Mare	Aurul S.A. (Esmeralda Exploration , Australia (50%), Remin S.A. (44.8%))	Ouro recuperado de barragens antigas	Galgamento - Ruptura na crista da barragem de rejeitos causada por fortes chuvas e derretimento de neve	100.000 m ³ de líquidos contaminados por cianeto	Contaminação de alguns tributários do rio Tisza, matando toneladas de peixes e contaminando a água que era utilizadas por mais de 2 milhões de pessoas
26 de Abril de 1999	Filipinas	Placer, Surigao del Norte	Manila Mining Corp. (MMC)	Ouro	Piping - Rejeitos derramados por danos em tubulações	700,000 toneladas de rejeito cianetado	17 casas destruídas e 51 hectares de danos
31 de Dezembro de 1998	Espanha	Huelva	Fertiberia , Foret	Fosfato	Diversas - Ruptura na barragem durante tempestade	50,000 m ³ de água tóxica e ácida	
7 de Dezembro de 1997	USA	Mulberry Fosfato, Polk County	Mulberry Fosfatos, Inc.	Fosfato	Instabilidade de taludes - Falha na pilha de fosfogesso, em função da mina tentar aumentar a capacidade do reservatório em taxas de alteamento mais rápidas que o normal (a empresa culpou as fortes chuvas)	200.000 m ³ de água de processo	Biota do Alafia completamente destruída
22 de Outubro de 1997	USA	Pinto Valley, Arizona	BHP Cobre	Cobre	Instabilidade de taludes - Ruptura nos taludes da barragem de rejeitos	230.000 m ³ de rejeitos e rochas	Rejeitos percorreram cerca de 16 hectares

Continuação da Tabela 23 – Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Data	País	Localização	Empresa	Tipo de Rejeito	Tipo de Incidente	Quantidade	Impacto
12 de Novembro de 1996	Peru	Amatista, Nazca		Cobre	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura em barragem alteada por montante	Mais de 300.000 m3 de rejeitos	Áreas de cultivo, e de rios, contaminadas
29 de Agosto de 1996	Bolívia	El Porco	Comsur (62%), Rio Tinto (33%)	Zinco, Chumbo, Prata	Diversas - Ruptura da barragem	400,000 toneladas	300 km do rio Pilcomayo foi contaminado
Dezembro de 1995	Nova Zelândia	Ouroen Cross	Coeur d'Alène , Idaho, USA	Ouro	Deslizamentos - Movimentação da barragem com 3 milhões de toneladas de rejeitos		
2 de Setembro de 1995	Filipinas	Placer, Surigao del Norte	Manila Mining Corp.	Ouro	Fundação - Falha na fundação da barragem	50.000 m ³	12 vítimas fatais e grande poluição costeira
19 de Agosto de 1995	Guiana	Omai	Cambior Inc. , Canada (65%), Ouroen Star Resources Inc., Colorado, USA (30%)	Ouro	Piping - Ruptura na barragem de rejeitos em função de erosão interna	4.2 milhões m3 de lama cianetada	80 km do rio Essequibo foi declarada como zona do desastre
19 de Novembro de 1994	USA	Hopewell Mine, Hillsborough County	IMC-Agrico	Fosfato	Diversas - Ruptura da barragem	Cerca de 1.9 milhões m3 de lama	Contaminantes até o rio Alafia
2 de Outubro de 1994	USA	Payne Creek Mine, Polk County	IMC-Agrico	Fosfato	Diversas - Ruptura da barragem	6.8 milhões m3 de lama	Muitas áreas contaminadas próximo da estrutura. Cerca de 500.000 m ³ chegaram aos tributários do rio Payne Creek
Outubro de 1994	USA	Fort Meade	Cargill	Fosfato		76.000 m ³ de água	Derrame até o rio Peace
Junho de 1994	USA	IMC-Agrico	IMC-Agrico	Fosfato	Piping - Buracos formados na pilha de fosfogesso		Liberção de gesso e contaminação de águas subterrâneas
14 de Fevereiro de 1994	Austrália	Olympic Dam, Roxby Downs,	WMC Ltd.	Cobre, Urânio	Piping - Vazamentos na barragem de rejeitos por 2 anos ou mais	Cerca de 5 milhões m3 de água contaminada no subsolo	
1994	China	Daye Ferro Ore mine, Longjiaoshan, Hubei		Ferro	Diversas - Ruptura em barragem alteada por montante		31 vítimas fatais
Outubro de 1993	USA	Gibsonton	Cargill	Fosfato			Peixes foram mortos quando a água ácida atingiu o rio Archie
1993	Peru	Marsa	Marsa Mining Corp.	Ouro	Galgamento - Ruptura na barragem		6 vítimas fatais
1 de Março de 1992	Bulgária	Maritsa Istok 1, near Stara Zagora		Cinzas	Galgamento - Ruptura na barragem por inundação da praia	500,000 m ³	

Continuação da Tabela 23 – Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Data	País	Localização	Empresa	Tipo de Rejeito	Tipo de Incidente	Quantidade	Impacto
Janeiro de 1992	Filipinas	No.2 tailings pond, Padcal, Luzon	Philex Mining Corp.	Cobre	Fundação - Colapso das paredes da barragem (Falha de fundação)	80 milhões de toneladas	
23 de Agosto de 1991	Canadá	Sullivan mine, Kimberley, British Columbia	Cominco Ltd	Chumbo e Zinco	Liquefação estática - Ruptura na barragem (Liquefação em fundações antigas, durante alteamento da estrutura)	75,000 m ³	Material contaminado foi lançado na região
25 de Agosto de 1989	USA	Stancil, Perryville, Maryland		Areia e rochas	Ruptura na barragem durante o nivelamento da barragem após fortes chuvas	38,000 m ³	Rejeitos cobriram mais de 5000 m ²
30 de Abril 1988	China	Jinduicheng, Shaanxi province		Molibdênio	Galgamento - Brecha nas paredes da barragem (bloqueio do vertedouro causando elevação do nível do reservatório)	700,000 m ³	Cerca de 20 vítimas fatais
19 de Janeiro de 1988	USA	Tennessee Consolidated No.1, Grays Creek, TN	Tennessee Consolidated Carvão Co.	Carvão	Piping - Falha por erosão interna, causada por tubulações sem manutenção	250,000 m ³	
1988	USA	Riverview	Gardiner (now Cargill)	Fosfato		Derramamento ácido	Milhares de peixes morreram no rio Alafia
8 de Abril de 1987	USA	MontCarvão No.7, Raleigh County, West Virginia	Peabody Carvão Co. (now Peabody Energy)	Carvão	Galgamento - Ruptura na barragem após falhas no vertedouro	87,000 metros cúbicos de água e lama	Rejeitos percorreram 80km no vale de jusante
Maior de 1986	Brasil	Itabirito, Minas Gerais	Itaminos Comercio de Minerios	Metal	Liquefação estática - Explosão nas paredes da barragem	100.000 toneladas	Rejeitos percorreram 12km no vale de jusante
1986	China	Huangmeishan		Ferro	Piping - Ruptura na barragem por infiltração/instabilidade dos taludes		19 vítimas fatais
25 de Agosto de 1985	China	Niujiaolong, Hunan	Shizhuyuan Zinco Mine Company	Cobre	Deslizamentos - Ruptura em barragem por montante após fluxo de detritos em função das fortes chuvas	730.000 m ³ de rejeitos	Rejeitos percorreram 4,2 km no vale de jusante destruindo diversas casas, com 49 vítimas fatais
18 de Julho de 1985	Itália	Stava, Trento	Prealpi Mineraria	Fluorita	Piping - Ruptura na barragem, causada por fatores de segurança insatisfatórios e construção inadequada do sistema de drenagem	200.000 m ³	Rejeitos percorreram 4,1 km no vale de jusante com velocidade de 90 km/h. Foram 268 vítimas fatais e 62 casas destruídas
3 de Março de 1985	Chile	Veta de Agua No.1		Cobre	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura de taludes	280.000 m ³	Rejeitos percorreram 5km no vale de jusante
3 de Março de 1985	Chile	Cerro Negro No.4	Cia Minera Cerro Negro	Cobre	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura de taludes	500.000 m ³	Rejeitos percorreram 8km no vale de jusante
1985	USA	Olinghouse, Wadsworth, Nevada	Olinghouse Mining Co.	Ouro	Liquefação estática - Colapso do maciço por saturação	25.000 m ³	Rejeitos percorreram 1,5km no vale de jusante

Continuação da Tabela 23 – Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Data	País	Localização	Empresa	Tipo de Rejeito	Tipo de Incidente	Quantidade	Impacto
8 de Novembro de 1982	Filipinas	Sipalay, Negros Occidental	Marinduque Mining and Industrial Corp.	Cobre	Deslizamento - Ruptura na barragem, devido deslizamentos na fundação de solos argilosos	28 milhões de toneladas	Inundação de áreas agrícolas com material em até 1,5 de altura
18 de Dezembro de 1981	USA	Ages, Harlan County, Kentucky	Eastover Mining Co.	Carvão	Diversas - Ruptura na barragem após fortes chuvas	96.000 m3 de lama de carvão	A lama percorreu uma extensão até o rio Fork por 1,3km no vale de jusante. Foi contabilizada 1 vítima fatal, 3 casas destruídas, 30 danificadas e peixes exterminados ao longo do rio Cumberland
20 de Janeiro de 1981	Rússia	Balka Chuficheva, Lebedinsky		Ferro	Diversas - Ruptura da barragem	3.5 milhões m3	Rejeitos percorreram 1,3km
1 de Outubro de 1980	USA	Tyrone, New Mexico	Phelps Dodge	Cobre	Liquefação estática - Brecha no talude, devido a taxas elevadas de alteamento, causando elevação da poropressão	2 milhões m3	Rejeitos percorreram 8km no vale de jusante e inundaram fazendas
16 de Julho de 1979	USA	Church Rock, New Mexico	United Nuclear	Urânio	Deslizamento - Brecha no talude, em função de recalque diferencial na fundação	370.000 m3 de água radioativa + 1.000 toneladas de sedimentos contaminados	Contaminação do rio Puerco e sedimentos por 110 km do vale de jusante
1979	Canadá	(unidentified), British Columbia		Metal	Piping - Praia e na barragem de rejeitos	40.000 m ³ de água contaminada	Danos de propriedade
31 de Janeiro de 1978	África	Arcturus, Zimbabwe	Corsyn Consolidated Mines	Ouro	Galgamento - Após período contínuo de chuvas	30.000 toneladas	1 pessoa morreu e o assoreamento foi muito expressivo em áreas de pastagens
14 de Janeiro de 1978	África	Mochikoshi No.1, Japan	Mochikoshi Ouro Mining Company	Ouro	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura na barragem	80.000 m ³	1 vítima fatal e rejeitos percorrendo entre 7 e 8km no vale de jusante
1 de Fevereiro de 1977	USA	Homestake, Milan, New Mexico,	Homestake Mining Company	Urânio	Piping - Ruptura na barragem, devido ruptura da tubulação de gases	30.000 m ³	Sem impactos além da área da mina
1 de Março de 1976	Iugoslávia	Zlevoto		Chumbo, Zinco	Piping - Ruptura na barragem, devido a superfícies freáticas elevadas e infiltração na face do talude de jusante (piping)	300.000 m ³	Rejeitos alcançaram rios próximos
Junho de 1975	USA	Silverton, Colorado		Metal	Diversas - Ruptura da barragem	116.000 toneladas	Rejeitos percorreram cerca de 160km até tributários do rio Animas, com milhares de danos em propriedades
Abril de 1975	Bulgária	Madjarevo		Chumbo, Zinco, Ouro	Liquefação estática - O aumento do nível de rejeitos acima do ideal provocou sobrecarga na torre de decantação	250.000 m ³	
1975	USA	Mike Horse, Montana		Chumbo, Zinco	Diversas - Ruptura na barragem após fortes chuvas	150.000 m ³	
11 de Novembro de 1974	África	Bafokeng		Platina	Piping - Falha na barragem por infiltração concentrada	3 milhões m3	12 vítimas fatais e lama percorrendo 45km no vale de jusante

Continuação da Tabela 23 – Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Data	País	Localização	Empresa	Tipo de Rejeito	Tipo de Incidente	Quantidade	Impacto
1 de Junho de 1974	USA	Deneen Mica, North Carolina		Mica	Diversas - Ruptura na barragem após fortes chuvas	38.000 m ³	Rejeitos atingiram os rios próximos
1973	USA	Southwestern		Cobre	Piping - Ruptura na barragem por elevação da poropressão durante alteamentos	170.000 m ³	Rejeitos percorreram 25km no vale de jusante
20 de Outubro de 1972	Espanha	Brunita, Cartagena	SMM Peñaroya	Zinco, Chumbo	Diversas - Ruptura na barragem após fortes chuvas	70.000 m ³	Os rejeitos danificaram rodovias, sistemas elétricos, destruíram um cemitério e contabilizou-se 1 vítima fatal
3 de Dezembro de 1971	USA	Fort Meade	Cities Service Co.	Fosfato	Diversas - Ruptura da barragem	9 milhões m ³ de lama	Rejeitos percorreram 120km do vale de jusante, com extermínio de vários peixes
1970	África	Mufulira, Zambia		Cobre	Liquefação estática - Dos rejeitos e fluxo subterrâneo	1 milhão de toneladas	89 vítimas fatais (funcionários da mina)
1970	Reino Unido	Maggie Pie		Argila	Galgamento - Ruptura na barragem após elevação do NA por conta de fortes chuvas	15.000 m ³	Rejeitos percorreram 35m no vale de jusante
1969	Espanha	Bilbao		Metal	Liquefação estática - Ruptura na barragem (liquefação) após fortes chuvas	115.000 m ³	Perda de vidas e danos no vale de jusante
1968	Japão	Hokkaido		Metal	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura na barragem	90.000 m ³	Rejeitos percorreram 150m no vale de jusante
Março de 1967	USA	Fort Meade	Mobil Chemical	Fosfato	Diversas - Ruptura da barragem	250.000 m ³ de lama fosfática +, 1.8 milhões m ³ de água	Lama até o rio Peace, com morte de peixes
1967	Reino Unido			Carvão	Deslizamento - Ruptura na barragem durante reparos		Rejeitos cobriram uma área de 4 hectares
1966	USA	East Texas		Gesso	Diversas - Ruptura da barragem	Entre 76,000 - 130,000 m ³ de lama de gesso	Rejeitos percorreram 300 no vale de jusante, sem vítimas fatais
1966	Reino Unido	Derbyshire		Carvão	Fundação - Ruptura na barragem por falha na fundação	30.000 m ³	Rejeitos percorreram 100m no vale de jusante
21 de Outubro de 1966	Reino Unido	Aberfan, Wales	Merthyr Vale Colliery	Carvão	Liquefação estática - Ruptura na barragem após fortes chuvas	162.000 m ³	Os rejeitos percorreram mais de 600m, vitimando fatalmente 144 pessoas
9 de Outubro de 1966	Alemanha	Geising/Erzgebirge	VEB Zinnerz	Cobre	Subsidência - Colapso do túnel de derivação localizado abaixo da barragem de rejeitos	70.000 m ³	O ferro oxidado na lama atingiu os rios Müglitz e Elbe, colorindo-os de vermelho até Hamburg

Continuação da Tabela 23 – Estudo Simplificado das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Data	País	Localização	Empresa	Tipo de Rejeito	Tipo de Incidente	Quantidade	Impacto
1 de Maio de 1966	Bulgária	Mir mine, Sgorigrad		Chumbo, Zinco, Cobre, Prata e Urânio	Galgamento - Ruptura na barragem pela elevação do nível do reservatório após fortes chuvas e falhas no canal de derivação	450.000 m ³	Rejeitos percorreram 8km no vale de jusante até a cidade de Vratza, destruindo metade da vila Sgorigrad que ficava há 1km da estrutura. Mais de 488 pessoas foram vítimas fatais
28 de Março de 1965	Chile	Bellavista		Cobre	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura na barragem	70.000 m ³	Rejeitos percorreram 800m no vale de jusante
28 de Março de 1965	Chile	Cerro Negro No.3		Cobre	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura na barragem	85.000 m ³	Rejeitos percorreram 5km no vale de jusante
28 de Março de 1965	Chile	El Cobre New Dam		Cobre	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura na barragem	350.000 m ³	Rejeitos percorreram 12km no vale de jusante, destruindo a cidade de El Cobre e vitimando fatalmente mais de 200 pessoas
28 de Março de 1965	Chile	El Cobre Old Dam		Cobre	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura na barragem	1.9 milhões m ³	
28 de Março de 1965	Chile	La Patagua New Dam		Cobre	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura na barragem	35.000 m ³	Rejeitos percorreram 5km no vale de jusante
29 de Março de 1965	Chile	Los Maquis		Cobre	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura na barragem	21.000 m ³	Rejeitos percorreram 5km no vale de jusante
1965	Reino Unido	Tymawr		Carvão	Galgamento - Ruptura na barragem		Rejeitos percorreram 700m no vale de jusante, causando danos consideráveis
26 de setembro de 1962	China	Huogudu, Gejiu, Yunnan	Yunnan Tin Group Co.	Metal	Galgamento - Falha em barragens por montante após três dias de chuvas moderadas	3.3 milhões m ³ de rejeitos e 380.000 m ³ de água	Rejeitos percorreram 4,5km no vale de jusante destruindo 11 vilas, com 171 vítimas fatais, 92 feridas e mais de 13.970 desabrigados
1962	Peru	Almivirca	Quiruvilca	Metal	Terremoto (liquefação dinâmica) - Ruptura na barragem, com fortes chuvas		Danos na infraestrutura e agricultura
1961	Reino Unido	Tymawr		Carvão	Diversas - Ruptura da barragem		Rejeitos percorreram 800m no vale de jusante

Tabela 24 - Estudo Completo das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Código	Data	País	Barragem	Mineral	Tipo	Finalidade	Modo de falha	Observação
1	31 Maio de 1889	USA	South Fork (Pensilvânia)		Solo	Controle de cheias e recreação	Galgamento - com ruptura	Cerca de 2.209 vítimas
2	12 Março de 1928	USA	Saint Francis (Los Angeles)		Concreto	Abastecimento de água	Fundação - Falha da fundação	Cerca de 431 vítimas
3	20 Abril de 1954	Brasil	Pampulha (MG)		Solo com face de concreto	Controle de cheias	Piping - Falha do sistema de drenagem	Sem vítimas
4	2 Dezembro de 1959	França	Malpasset		Concreto em arco duplo	Acumulação de água	Piping - ruptura pela fundação	Cerca de 423 vítimas
5	26 Março de 1960	Brasil	Orós (CE)		Solo e enrocamento	Acumulação de água	Estrutural - Rompeu na seção central durante construção	Já havia rompido uma vez antes de ser concluída
6	9 Outubro de 1963	Itália	Vajont		Concreto em arco duplo	Acumulação de água e geração de energia	Galgamento - com deslizamento ombreiras do reservatório	Cerca de 2.600 vítimas
7	14 Dezembro de 1963	USA	Baldwin Hills (Los Angeles)		Solo e base impermeabilizada	Acumulação de água	Piping - Falha no revestimento de impermeabilização, piping e subsidência	5 vítimas fatais
8	9 Fevereiro de 1971	USA	Van Norman (Los Angeles)		Núcleo em solo e espaldares em areia	Acumulação de água	Liquefação dinâmica - mas sem vertimento do material	Sem vítimas fatais
9	26 Fevereiro de 1972	USA	Barragem 3 Pitson Coal (Virgínia)	Carvão	Solo (rejeitos granulares de carvão)	Armazenamento de resíduos de carvão	Liquefação estática - aterro sem compactação e fundação em solo mole)	125 vítimas fatais
10	11 Agosto de 1974	Índia	Machhu I		Solo com vertedouro de soleira livre	Irrigação	Galgamento - Volume de chuva 3x maior que projeto, com galgamento e ruptura geral	Cerca de 25.000 vítimas
11	7 Agosto de 1975	China	Banqiao		Solo com comportas	Controle de cheias e energia elétrica	Galgamento - com ruptura	Cerca de 230.000 vítimas
12	5 Junho de 1976	USA	Teton (Idaho)		Solo de núcleo argiloso e zonado em 5 camadas	Acumulação de água e geração de energia	Piping - No talude e problemas na fundação	5 vítimas fatais. Construída pela Bureau
13	20 Janeiro de 1977	Brasil	Euclides da Cunha (SP)		Solo	Geração de Energia	Galgamento	Rompimento em cascata da Usina do Limoeiro, Rio do Peixe e Santa
14	22 Fevereiro de 1994	África	Merriespruit	Ouro	Solo (rejeitos)	Armazenamento de resíduos de ouro	Liquefação estática - galgamento e desconfinamento do material não consolidado)	17 vítimas fatais
15	24 Março de 1996	Filipinas	Marinduque	Ouro e Cobre	Solo	Armazenamento de resíduos de ouro e cobre	Sem causa definida	Sem vítimas fatais, mas danos ambientais irreversíveis
16	25 Abril de 1998	Espanha	Los Frailes	Zinco e Chumbo	Solo	Armazenamento de resíduos de zinco e chumbo	Fundação - Falha na fundação (argilas expansíveis)	Sem vítimas fatais mas um dos maiores danos ambientais da Europa
17	22 Junho de 2001	Brasil	Rio Verde (MG)	Ferro	Solo sob backfill	Armazenamento de resíduos de minério de ferro	Sem informações	5 vítimas fatais
18	20 Março de 2003	Brasil	Cataguases (MG)	Resíduos Papel	Solo	Resíduos orgânicos (lignina e sódio) de uma Indústria de papel	Estrutural - falha na construção de um muro no vertedouro sem projeto, além de ausência de manutenção	Sem vítimas. Foi descaracterizada e área revegetada
19	12 Março de 2004	USA	Big Bay Lake (Mississippi)		Solo	Reservatório de Água	Liquefação estática - na área da tubulação do tulipa - solos erodíveis	Sem vítimas, hoje pertence a um condomínio
20	17 Junho de 2004	Brasil	Camará (PB)		CCR - concreto compactado com rolo	Acumulação de água para abastecimento	Estrutural - com ombreira em rochas fraturadas	5 vítimas fatais

Continuação da Tabela 24 - Estudo Completo das rupturas em barragens. Fonte: Elaborado pela autora

Código	Data	País	Barragem	Mineral	Tipo	Finalidade	Modo de falha	Observação
21	25 Agosto de 2005	USA	Sistema Federal de Diques (New Orleans)		Solo e material dragado lagos	Proteção contra enchentes	Galgamento - com falhas estruturais - Projeto Inadequado	1836 vítimas fatais
22	10 Janeiro de 2007	Brasil	Mirai (MG)	Bauxita	Solo	Armazenamento de resíduos de bauxita	Galgamento	Sem vítimas fatais
23	10 Janeiro de 2008	Brasil	Apertadinho (RO)		Solo, com comportas	Acumulação e energia elétrica	Fundação - Possíveis problemas de fundação - solos erodíveis	Sem vítimas fatais
24	27 Maio de 2009	Brasil	Algodões I (PI)		Solo	Reservatório de Água	Deslizamentos - encostas instáveis e erosão no vertedouro	Barragem só tinha uma forma de acesso e, danificada, impediu obras
25	4 outubro de 2010	Hungria	Reservatório 10 em Ajka	Bauxita	Solo - Tanques	Armazenamento de resíduos de bauxita	Liquefação estática - Saturação excessiva, sem drenagem	Resíduos pesados, que queimam quando reage com a pele
26	4 Agosto de 2014	Canadá	Mount Polley	Cobre e Ouro	Solo	Armazenamento de resíduos cobre e ouro	Fundação - Falha da fundação - solo glacial	Sem vítimas fatais mas muitos desabrigados
27	10 Setembro de 2014	Brasil	Herculano Mineração (MG)	Ferro	Solo - Barragem B1 e B3	Armazenamento de rejeitos de minério de ferro	Piping - Falha do sistema de drenagem interna por excesso de resíduos no reservatório	Operação retomada em 2018 com filtragem e novo beneficiamento
28	5 Novembro de 2015	Brasil	Fundão (MG)	Ferro	Solo e rejeito	Armazenamento de rejeitos de minério de ferro	Liquefação estática - com deslizamento	7 vítimas fatais e 400 desabrigados
29	11 Fevereiro de 2017	USA	Oroville (Califórnia)		Solo	Abastecimento de água	Galgamento	Sem vítimas fatais
30	4 Fevereiro de 2018	Brasil	PCH Usina Cana Libra (MT)		Solo	Geração de Energia	Estrutural - sem dados	Sem vítimas fatais
31	25 Janeiro de 2019	Brasil	Brumadinho (MG)	Ferro	Solo	Armazenamento de minério de ferro	Liquefação estática (creep)	250 vítimas fatais e 20 ainda desaparecidos
32	11 Julho de 2019	Brasil	Quati (BA)		Solo, sem informações de vertedouro	Regularização de vazão e uso doméstico	Galgamento	Fluxo dos açudes à montante; sem projeto
33	31 Julho de 2019	Inglaterra	Toddbrook		Solo com vertedouro de soleira livre	Regularização de vazão e recreação	Galgamento - com erosão do vertedouro	Diversos problemas anteriores de piping e estruturais
34	1 Outubro de 2019	Brasil	Barragem TB01 (MT)	Ouro	Solo	Armazenamento de rejeitos de ouro	Sem informações	Inserida na PNSB, mas sem muitos dados
35	17 Outubro de 2019	Rússia	Seiba (Sibéria)	Ouro	Solo	Armazenamento de rejeitos de minério de ouro	Erosão - decorrente das fortes chuvas	17 vítimas fatais
36	01 Novembro de 2019	Brasil	Barragem do Amorim (RS)		Solo	Abastecimento de água	Estrutural - Falha estrutural na OD - sem projeto	Sem vítimas fatais
37	1 Maio de 2020	Uzbequistão	Barragem de Sardoba		Solo/enrocamento	Abastecimento de água	Estrutural - Erro de projeto e construção	3 vítimas fatais
38	18 maio de 2020	USA	Barragem Edenville (Michigan)		Solo	Geração de Energia	Galgamento e falha estrutural	Sem vítimas fatais. Barragem de Sanford rompeu em cascata
39	31 Maio de 2020	Brasil	Barragem da Fazenda Água Santa (MG)		Solo	Acumulação de água (Agricultura)	Piping - conforme bolhas na geomembrana, mas sem muitos dados	Sem vítimas fatais. Barragem à jusante conteve fluxo
40	15 Junho de 2020	Brasil	Barragem Guilherme Pontes (PE)		Solo	Acumulação de água	Galgamento	Sem vítimas fatais

A Tabela 25 apresenta a conclusão dos estudos realizados para os 159 casos de rupturas em barragens, onde 133 referem-se a barragens de rejeito (84%), apresentando que o maior percentual de rupturas se deve a dois modos de falha, com percentuais de cerca de 21% para galgamento e 18% para erosão interna associada a *piping*.

Diferente dos demais estudos compilatórios apresentados nesta seção, optou-se por desmembrar os modos de falhas estruturais em fenômenos mais significativos e, dessa forma, o fenômeno da liquefação apresenta a maior incidência nas rupturas avaliadas, com cerca de 18% do somatório de liquefação estática e dinâmica. Há de se ressaltar que demais fenômenos estruturais estão agrupados nos itens diversos, por serem menos significativos quando avaliados unitariamente.

Do total de barragens avaliadas, 72 rupturas ocorreram entre os anos 2000 e 2020, o que representa 42% do total, sendo 44 rupturas entre os anos de 2010 a 2020, com cerca de 28%. Nos últimos 10 anos, o número de rupturas ampliou em cerca de 60% em relação à década anterior, passando de 28 para 44 rupturas.

Tabela 25 - Conclusão dos estudos de rupturas de barragens. Fonte: Elaborado pela autora

MODO DE FALHA	Estudo Simplificado (Rejeito)	Estudo Completo		Total	
		Água	Rejeito		
Galgamento	20	11	1	32	20,8%
Terremoto (liquefação dinâmica)	12	1		13	8,4%
Liquefação estática	9	1	5	15	9,7%
Fundação	8	2	2	12	7,8%
Estruturais	2			2	1,3%
Subsidência	3			3	1,9%
Instabilidade de taludes	6	1	1	8	5,2%
Deslizamentos e erosões	37	4	1	42	27,3%
Diversas	22	5	1	28	18,2%
Erosão interna e <i>piping</i>		1	3	4	2,6%
Sem dados					
TOTAL	119	26	14	159	
		40			
	74,8%	16,9%	9,1%	26,0%	

De um modo geral, analisando os dados disponíveis na literatura para rupturas de barragens, pode-se concluir que:

- Ainda há muitas informações desencontradas e, principalmente, falta informações referente às estruturas em relação ao tipo de material

construtivo, características técnicas da barragem, causa primária da falha e volumes propagados;

- Para barragens de rejeito, o maior percentual de rupturas é associado a falhas estruturais, geralmente de engenharia e das instalações. Se desconsiderados os inúmeros casos onde não se sabe o método construtivo adotado, tem-se que as estruturas construídas por montante representam o maior percentual de falhas. Ainda, dos modos de falha identificados, o galgamento lidera a lista, seguido de instabilidades nos taludes (falha estática), instabilidade sísmica e *piping*;
- No estudo realizado, onde o modo de falha estrutural é desmembrado em fenômenos, a liquefação tem um percentual bem representativo como evento precursor do desencadeamento de um modo de falha estruturante e, conseqüente ruptura;
- Nos Estados Unidos, um estudo específico apresentou o galgamento como o modo de falha mais representativo entre rupturas de barragens de água e rejeito;
- No caso específico de barragens em solo o galgamento também é representativo, seguido bem próximo pelo *piping* em maciço e fundações;
- Para as grandes barragens de rejeito e água, há um percentual expressivo de rupturas em estruturas construídas em solo; e
- A probabilidade estimada de rupturas de barragens é cerca de 1 falha para cada 43 estruturas construídas. Para as barragens de rejeito, tem-se 2 a 5 falhas de grande magnitude por ano e, em alguns estudos, taxas de ruptura de 1,2%.

5.1 Barragens no Brasil

O Comitê Brasileiro de Grandes Barragens - CBDB, que faz parte do ICOLD, disponibiliza uma plataforma online para associados, onde pode ser visualizado o número de estruturas cadastradas, bem como alterar os dados das estruturas para ampliar o cadastro.

Na Figura 48 é apresentada a distribuição de 1.411 estruturas por Estado, sendo informado que 26 não foram contabilizadas por ausência de informações, na data base de fevereiro de 2020. Minas Gerais lidera o ranking com 208 barragens (15%), seguido de São Paulo com 149, Ceará com 129, Rio Grande do Sul com 99 e Santa Catarina com 98. A Região Nordeste possui 36% das barragens e, a Sudeste, cerca de 30%. Os quantitativos apresentados referem-se somente as barragens de água.

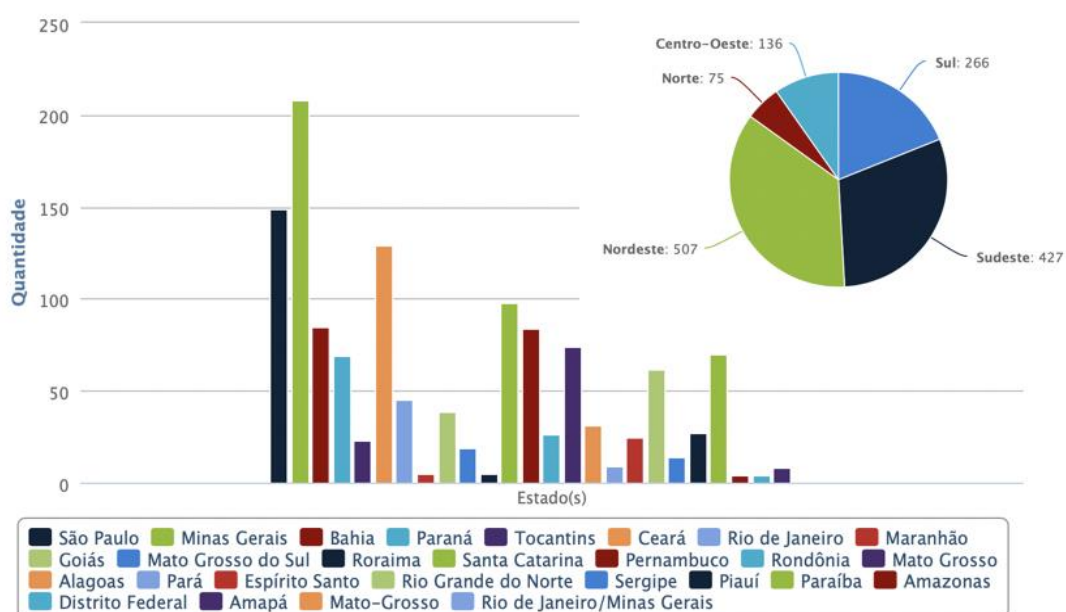


Figura 48 - Grandes barragens de água por estado e região no Brasil. Fonte: CBDB (2020)

Na Tabela 26 têm-se os quantitativos e percentuais de grandes barragens por finalidade e tipo de estrutura, onde se verifica que foram contabilizadas somente estruturas para armazenamento de água. Acredita-se que a variação no total de barragens entre os dados e, ainda em relação ao estabelecido como número total de barragens deve-se à ausência de dados cadastrais. São consideradas estruturas em operação, em construção, desativadas e abandonadas.

Tabela 26 - Tipos de grandes barragens de água no Brasil. Fonte: Adaptado de CBDB (2020)

Barragens por Finalidades			Barragens por Finalidades		
Hidrelétricas	828	55,1%	Solo	726	62,8%
Abastecimento de Água	182	12,1%	Concreto gravidade	255	22,1%
Combate às secas	305	20,3%	Enrocamento	121	10,5%
Irrigação	145	9,6%	Contrafortes	20	1,7%
Navegação	16	1,1%	Alvenaria e blocos	11	1,0%
Regularização	10	0,7%	Gravidade aliviada	9	0,8%
Recreação	7	0,5%	Alvenaria e Arco	7	0,6%
Controle de inundação	7	0,5%	Arcos múltiplos	6	0,5%
Psicultura	4	0,3%	Abóbada dupla curvat.	1	0,1%
TOTAL	1504		TOTAL	1156	

Em termos de altura, a barragem de Irapé é a mais alta, com 209 m, seguida de Itaipu e Campos Novos, ambas com 196 m. Em escala decrescente tem-se Barra Grande (185 m), Foz do Areia (160 m), Pai Querê e Emborcação (158 m), Serra da Mesa (154 m), Xingó (150 m) e Segredo (145 m).

A Agência Nacional de Mineração - ANM classificou as barragens de mineração tendo como base as informações provenientes da plataforma digital denominada Relatório Anual de Lavra - RAL e com base em vistorias e documentos entregues pelos empreendedores. Considerando a data base de fevereiro de 2019, tem-se um total de 769 barragens de rejeito no Brasil, sendo 425 inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens, conforme Tabela 27. Para a classificação das estruturas, considera-se a pontuação obtida do somatório de notas referente à Categoria de Risco (Características Técnicas, Estado de Conservação e Plano de Segurança de Barragens) e ao Dano Potencial Associado. As barragens referentes à Política são aquelas possuem ao menos um dos itens a seguir:

- altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros);
- capacidade total do reservatório maior ou igual a 3 milhões m³ (três milhões de metros cúbicos);
- reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; e
- categoria de dano potencial associado, médio ou alto.

Tabela 27 - Barragens de Rejeito no Brasil. Fonte: Adaptado de ANM (2019)

Inseridas na PNSB			425 barragens			55,3%
Dano Potencial Associado			Categoria de Risco			
Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	
219	157	49	2	61	362	
52%	36,9%	11,5%	0,5%	14,4%	85,2%	
Não Inseridas na PNSB			344 barragens			44,7%
TOTAL			769 barragens			

Em relação à Classe das estruturas inseridas na Política, e volume do reservatório, tem-se que a maior representatividade é de Barragens Classe B (Tabela 28), com 51% referente a Alta Categoria de Risco + Médio Dano Potencial ou, a combinação de Dano Potencial Alto com Categoria de Risco Média ou Baixa. A Classe C com 37%, refere-se à Alta Categoria de Risco + Baixo Dano Potencial ou, a combinação de Dano Potencial Médio com Categoria de Risco Média ou Baixa. A Tabela 28 também indica que cerca de 63% das estruturas possuem reservatório muito pequeno.

Tabela 28 - Classe de barragens ANM conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANM (2019)

Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	Classe E
2	217	157	9	40
0,5%	51,1%	36,9%	2,1%	9,4%
Porte pelo Volume de Reservatório				
Muito Grande	Grande	Médio	Pequeno	Muito Pequeno
≥ 50 milhões de m ³	Entre 25 milhões a 50 milhões de m ³	Entre 5 milhões a 25 milhões de m ³	500 mil a 5 milhões de m ³	≤ 500 mil m ³
9	4	38	102	268
2%	1%	9%	24%	63%

Na divisão por Estado, Minas Gerais possui 52% das barragens de rejeito inseridas na Política, com 219 estruturas, conforme Figura 49. Já na Figura 50, tem-se que a maior parte das estruturas inseridas na PNSB, ou seja, 204 estruturas

(48%), se referem a construções em etapa única, seguidas de 25% por jusante e 20% por montante.

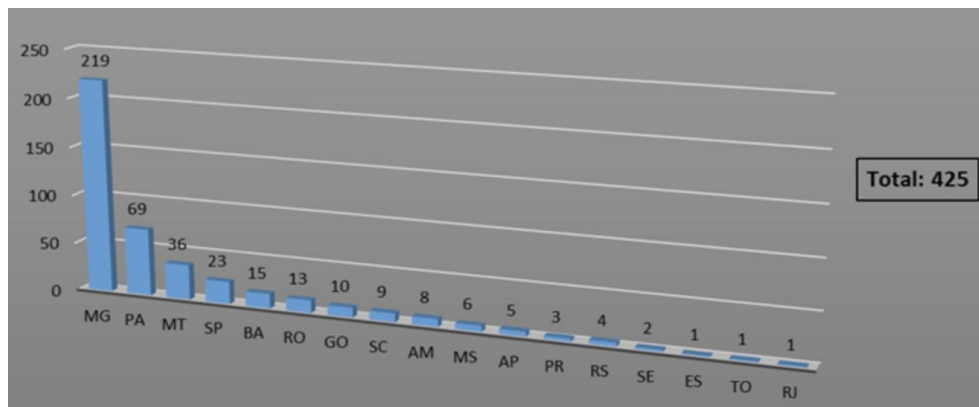


Figura 49 - Barragens de rejeito inseridas na PNSB, por Estado. Fonte: ANM (2019)

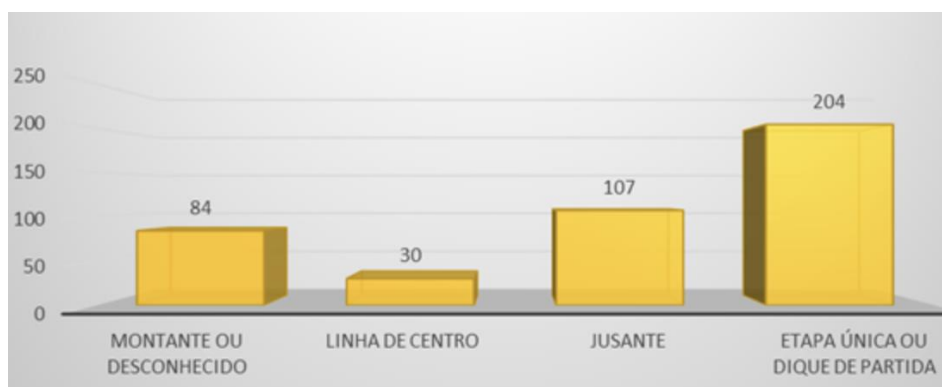


Figura 50 - Barragens de rejeito inseridas na PNSB por método construtivo. Fonte: ANM (2019)

De acordo com os dados divulgados pela ANM através do SIGBM Público em Outubro de 2020, o total de barragens de rejeito ampliou para 855, sendo 436 incluídas na PNSB. A base de dados atualizada não será utilizada para comparativo pelo fato de que as demais agências reguladoras ainda não possuem dados mais atualizados.

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL classificou as barragens de acumulação de água para geração de energia tendo como base no ciclo de avaliação de 2018, com documentos entregues pelos empreendedores. Considerando a data base de dezembro de 2018, tem-se um total de 907 barragens no Brasil, sendo 621 inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens,

conforme Tabela 29. A classificação das estruturas também considera a pontuação obtida do somatório de notas referente à Categoria de Risco (Características Técnicas, Estado de Conservação e Plano de Segurança de Barragens) e ao Dano Potencial Associado e a inserção na política segue os mesmos requisitos já apresentados para a ANM, com exceção do armazenamento de resíduos perigosos.

Tabela 29 - Barragens de Energia no Brasil. Fonte: Adaptado de ANEEL (2018)

Inseridas na PNSB			621 barragens			68,5%
Dano Potencial Associado			Categoria de Risco			
Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	
531	85	5	2	30	589	
86%	13,7%	0,8%	0,3%	4,8%	94,8%	
Não Inseridas na PNSB			286 barragens			31,5%
TOTAL			907 barragens			

Em relação à Classe das estruturas inseridas na Política, tem-se que a maior representatividade é de Barragens Classe B (Tabela 30), com 85% referente à combinação de Alto Risco com Dano Potencial Médio ou Baixo, ou referente à combinação de Dano Potencial Alto com Categoria de Risco Média ou Baixa. O sistema da ANEEL classifica as estruturas da Classe A até C, diferente da ANM que contabiliza entre Classe A à E. Na divisão por Estado, Minas Gerais possui 19% das barragens de energia elétrica inseridas na Política, com um total de 116 estruturas.

Tabela 30 - Classe de barragens ANEEL conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANEEL (2018)

Classe A	Classe B	Classe C
2	529	90
0,3%	85,2%	14,5%

A Política Nacional de Segurança de Barragens estabelece que a Agência Nacional de Águas (ANA) é a responsável por organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), promover a

articulação entre os órgãos fiscalizadores de barragens e coordenar a elaboração do Relatório Nacional de Segurança de Barragens.

Nesse sentido, a Agência Nacional de Água - ANA, compilou os dados das barragens de mineração e acumulação de água para geração de energia elétrica tendo como base as informações provenientes da plataforma digital denominada Sistema Nacional de Segurança de Barragens - SNISB. Considerando a data base de dezembro de 2018, tem-se um total de 935 barragens de rejeito no Brasil, sendo 473 inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens, conforme Tabela 31. Os valores diferem dos dados apresentados pela ANM que contabiliza 48 estruturas a menos inseridas na PNSB e 118 não inseridas, em um total divergente de 166 barragens.

Para as barragens de acumulação de água para geração de energia elétrica, tem-se o mesmo total de 907 barragens contabilizadas pela ANEEL, entretanto, para a ANA, todas as estruturas estão inseridas na PNSB, conforme Tabela 32.

Tabela 31 – Compilado da ANA para as Barragens de Rejeito no Brasil. Fonte: Adaptado de ANA (2018)

Inseridas na PNSB			473 barragens			50,6%
Dano Potencial Associado			Categoria de Risco			
Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	
256	152	65	8	64	401	
54%	32,1%	13,7%	1,7%	13,5%	84,8%	
Não Inseridas na PNSB			462 barragens			49,4%
TOTAL			935 barragens			

Tabela 32 – Compilado da ANA para as Barragens de Água para Energia no Brasil. Fonte: Adaptado de ANA (2018)

Inseridas na PNSB			907 barragens			100,0%
Dano Potencial Associado			Categoria de Risco			
Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	
531	85	291	2	77	828	
59%	9,4%	32,1%	0,2%	8,5%	91,3%	
TOTAL			907 barragens			

Para a Classe das estruturas de rejeito inseridas na Política, têm-se na Tabela 33 os valores considerados pela ANA, que variaram pouco em termos percentuais. Já para as barragens de água para energia (Tabela 34) houve variação significativa para as Classes B e C, o que leva a concluir que as barragens não contabilizadas pela ANEEL como pertencentes à Política foram enquadradas pela ANA nessa categoria.

Tabela 33 – Compilado da ANA para Classe de barragens da ANM conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANA (2018)

Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	Classe E
6	251	152	7	57
1,4%	59,1%	35,8%	1,6%	13,4%

Tabela 34 - Compilado ANA para Classe de barragens da ANEEL conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANA (2018)

Classe A	Classe B	Classe C
2	529	376
0,2%	58,3%	41,5%

O compilado de dados da também considera barragens de acumulação de água para abastecimento humano, dessedentação animal, uso industrial, recreação, regularização de vazão, dentre outros, que são diretamente fiscalizados pela ANA. Ao todo, são 200 estruturas e, considerando somente aquelas inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens, ou seja, classificadas, tem-se um total de 165, conforme Tabela 35. O fato é que a legislação que regulamenta o sistema classificatório da Agência apresenta Classes de barragem A, B, C e D. Entretanto, ao avaliar o banco de dados, percebe-se que existe barragem Classe E de abastecimento humano, ou seja, acredita-se que há estruturas sendo classificadas incorretamente.

Tabela 35 - Barragens de Água no Brasil. Fonte: Adaptado de ANA (2018)

Inseridas na PNSB			165 barragens			82,5%
Dano Potencial Associado			Categoria de Risco			
Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	
127	24	14	54	86	25	
77%	14,5%	8,5%	32,7%	52,1%	15,2%	
Não Inseridas na PNSB			35 barragens			17,5%
TOTAL			200 barragens			

Em relação à Classe das estruturas inseridas na Política, tem-se que a maior representatividade é de Barragens Classe A (Tabela 36) com, aproximadamente, 78% referente a barragens de Alto Dano Potencial para todas as Categorias de Risco. Isso demonstra o grande quantitativo de estruturas que estão em situação crítica, seja por veracidade ou por informações inseridas incorretamente.

Tabela 36 - Classe de barragens ANA conforme Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Fonte: Adaptado de ANA (2018)

Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	Classe E
128	4	17	15	1
77,6%	2,4%	10,3%	9,1%	0,6%

De uma forma geral, tem-se na Tabela 37 um comparativo de estruturas cadastradas no CBDB, ANM, ANEEL e ANA. É importante verificar que o caso da ANM e ANEEL, os dados apresentados no Relatório da ANA (2018) são diferenciados quando contabilizados diretamente do banco de dados de cada órgão. No caso da ANM, o fato do banco de dados ser de fevereiro de 2019 pode ser uma justificativa plausível para a incoerência.

**Tabela 37 - Comparativo das estruturas contidas em cada Banco de Dados. Fonte:
Elaborado pela autora**

CBDB - água					
Referência do Dado	Total de Barragens				
Estruturas por estado	1.439				
Finalidade da barragem	1.504				
Tipo de Estrutura	1.156				

ANM - rejeito (fev2019)		MG 219	ANA com dados ANM - dez2018		MG 242
Barragens da Política	425		Barragens da Política	473	
Barragens fora Política	344		Barragens fora Política	462	
TOTAL	769		TOTAL	935	

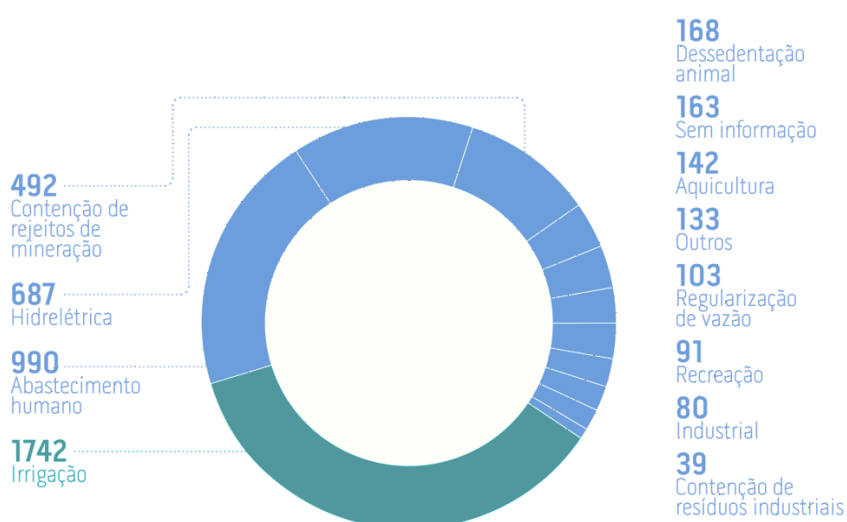
ANEEL - água para energia (dez2018)		MG 116	ANA com dados ANEEL - dez2018		MG 155
Barragens da Política	621		Barragens da Política	907	
Barragens fora Política	286		Barragens fora Política	-	
TOTAL	907		TOTAL	907	

ANA - água (dez2018)		MG 14
Barragens da Política	165	
Barragens fora Política	35	
TOTAL	200	

Existem no país 32 órgãos fiscalizadores de segurança de barragens e, de acordo com os dados do relatório da ANA de 2018, constam 17.604 barragens cadastradas, sendo que 4.830 submetem-se à Política Nacional de Segurança de Barragens. Das estruturas inseridas na PNSB, os maiores usos estão ligados à irrigação (36%), abastecimento humano (20%), hidrelétrica (14%) e contenção de rejeitos de mineração (10%), conforme Tabela 38 e Figura 51, e seus valores aproximados.

Tabela 38 - Comparativo das estruturas por órgão. Fonte: Relatório ANA (2018)

	Barragens cadastradas por órgão	% em relação ao total no Brasil	Barragens pertencentes à Política	% em relação ao total no Brasil
ANM	935	5,3%	473	9,8%
ANEEL	907	5,2%	907	18,8%
ANA	200	1,1%	165	3,4%
OUTROS 29 ÓRGÃOS	15.562	88,4%	3.285	68,0%
TOTAL	17.604		4.830	

**Figura 51 - Uso principal das barragens, conforme Relatório ANA (2018)**

Em 2018, os órgãos fiscalizadores vistoriaram 928 barragens, sendo que 632 submetem-se à Política, ou seja, 13% do quantitativo total de barragens abrangidas pela Legislação. Aproximadamente, 61% do total de barragens cadastradas não informaram dados suficientes para afirmar se submetem ou não à PNSB.

Em relação à estruturação dos órgãos fiscalizadores, 75% possuem equipes compostas por até quatro integrantes, sendo que ANM e ANA possuem equipes com mais de 10 pessoas e a ANEEL, 28 pessoas diretamente interligadas a Segurança de Barragens. O Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens para Entidades Fiscalizadoras cita a necessidade de uma equipe com dois técnicos com dedicação exclusiva, para até 30 barragens fiscalizadas; uma equipe de 2 a 5 técnicos com dedicação exclusiva, para até 100 barragens fiscalizadas; da mesma

forma, 6 a 10 técnicos, para até 300 barragens fiscalizadas, 10 a 20 técnicos, para até mil barragens fiscalizadas; e mais de 20 técnicos, para mais de mil barragens fiscalizadas. Assim, ao se compararem as equipes de cada entidade fiscalizadora com a equipe sugerida no Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens para Entidades Fiscalizadoras, verifica-se que 60% delas (ou 19 fiscalizadores) possuem o quantitativo sugerido para desempenho das atividades, e 40% não (ou 13 fiscalizadores). Ainda, cerca de 60% dos órgãos fiscalizadores não possuem uma equipe com atribuição formal para atuar em segurança de barragens e mesmo as que possuem atribuição formal acabam realizando outras atividades.

Na Tabela 39 tem-se que, no caso da ANM o número de barragens fiscalizadas por cada funcionário foi muito superior aos dos demais órgãos. Se considerarmos que o ideal seria cerca de 15 a 20 estruturas por profissional, verifica-se que para atendimento a todas as estruturas inseridas na PNSB o número de profissionais dedicados ainda é bem inferior no caso da ANM, ANEEL e demais entidades como um todo.

Tabela 39 - Comparativo das estruturas por órgão, conforme Relatório ANA. Fonte: Adaptado de ANA (2018)

Entidade Fiscalizadora	Barragens Cadastradas	Barragens da PNSB	Fiscalizadas	Equipe envolvida – nº de integrantes	Quantidade de barragens fiscalizadas - por fiscal	Equipe necessária para Barragens da PNSB (1 para 15 estruturas)
ANA	200	165	64	10	6	11
ANEEL	907	907	140	28	5	60
ANM	935	473	214	10	21	32
Outras	15.562	3.285	510	93	5	219
TOTAL	17.604	4.830	928	141		

Em relação à estruturação dos órgãos fiscalizadores, 75% possuem equipes compostas por até quatro integrantes, sendo que ANM e ANA possuem equipes com mais de 10 pessoas e a ANEEL, 28 pessoas diretamente interligadas à Segurança de Barragens. O Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens para Entidades Fiscalizadoras cita a necessidade de uma equipe com dois técnicos com

dedicação exclusiva para até 30 barragens fiscalizadas; uma equipe de 2 a 5 técnicos com dedicação exclusiva, para até 100 barragens fiscalizadas; da mesma forma, 6 a 10 técnicos, para até 300 barragens fiscalizadas, 10 a 20 técnicos, para até mil barragens fiscalizadas; e mais de 20 técnicos, para mais de mil barragens fiscalizadas. Assim, ao se compararem as equipes de cada entidade fiscalizadora com a equipe sugerida no Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens para Entidades Fiscalizadoras, verifica-se que 60% delas (ou 19 fiscalizadores) possuem o quantitativo sugerido para desempenho das atividades, e 40% não (ou 13 fiscalizadores). Ainda, cerca de 60% dos órgãos fiscalizadores não possuem uma equipe com atribuição formal para atuar em segurança de barragens e mesmo as que possuem atribuição formal acabam realizando outras atividades.

Na Tabela 40 tem-se a lista dos órgãos fiscalizadores e alguns dados para análise. Em relação às estruturas inseridas na PNSB, segundo os dados do documento, que são 4.830 barragens, tem-se que 7% ainda possuem informações insuficientes para uma avaliação mais completa e, cerca de 2% são consideradas preocupantes. Do total de barragens cadastradas, 17.604, tem-se que 62% ainda possuem dados incompletos para verificação ou não da inserção nos quesitos pertinentes à PNSB, ou seja, um quantitativo bem levado de estruturas que podem estar em situação crítica e desconhecida pelos órgãos, empreendedores e sociedade. Em 10 anos após a publicação da publicação da Lei 12.334 que instituiu a PNSB, percebe-se que o desafio ainda é imenso, mesmo com a atualização recente da Legislação, que manteve o sistema de classificação adotado em 2010.

Tabela 40 - Dados relevantes das barragens do Relatório ANA (2018). Fonte: ANA (2018)

UF	Entidade Fiscalizadora	Barragens Cadastradas	Submetidas à Lei nº 12.334/2010	Sem informações suficientes para definir se são submetidas à PNSB	Classificadas quanto ao DPA	Classificadas quanto ao CRI	Fiscalizadas	Quantas preocupam	sem informação
AC	IMAC	84	13	0	84	84	26	0	0
AL	SEMARH	91	46	0	91	91	0	6	0
AM	IPAAM	29	1	0	29	29	28	0	0
AP	IMAP	6	0	6	0	0	0	0	0
BA	INEMA	348	323	0	341	332	0	7	25
CE	SRH	228	204	0	204	115	79	8	0
DF	ADASA	97	0	26	71	81	2	0	0
ES	AGERH	93	29	29	63	63	62	0	0
GO	SECIMA	238	30	208	0	0	0	0	0
MA	SEMA	74	13	47	29	10	0	2	47
MG	IGAM	51	48	0	50	46	0	1	0
MG	SEMAD	25	23	2	0	0	10	0	0
MS	IMASUL	520	131	193	325	189	0	0	1
MT	SEMA	167	35	0	167	148	0	6	1
PA	SEMAS	143	125	7	143	143	0	0	0
PB	AESA	498	279	196	281	459	24	4	31
PE	APAC	464	168	69	442	441	27	3	23
PI	SEMAR	54	32	21	31	31	9	2	18
PR	AGUASPARANA	91	39	23	68	66	21	1	11
RJ	INEA	15	14	0	15	14	5	0	1
RN	IGARN	480	219	247	241	242	0	2	150
RO	SEDAM	82	25	0	82	82	13	0	0
RR	FEMARH	17	5	2	15	15	15	1	0
RS	SEMA	10755	1521	9234	1399	0	0	3	0
SC	SDS	38	38	0	38	38	38	9	0
SE	SEDURBS	41	19	0	41	41	4	0	0
SP	CETESB	1	1	0	1	0	0	0	0
SP	DAEE	141	88	47	81	81	0	0	0
TO	NATURATINS	691	69	409	254	254	147	5	7
FED	ANA	200	113	46	149	149	64	3	9
FED	ANEEL	907	687	0	907	907	140	2	0
FED	ANM	935	492	0	935	935	214	3	0
TOTAL		17604	4830	10812	6577	5086	928	68	324
				61,42%			1,41%	6,71%	

5.2 Barragens em Minas Gerais

Em Minas Gerais, a Fundação Estadual do Meio Ambiente possui legislação específica, regulamentando o cadastro, classificação e fiscalização das barragens de rejeito e de água. Dessa forma, as estruturas Classe I apresentam Baixo Potencial de Dano Ambiental e, Classe III, Alto Potencial de Dano Ambiental, sendo a Classe II um valor intermediário.

Com base nos dados disponibilizados pela FEAM proveniente do Banco de Declarações Ambientais, data base dezembro de 2018, tem-se 691 barragens cadastradas no estado, sendo que 62% referem-se às estruturas de mineração, conforme Tabela 41. Se considerarmos que a PNSB contempla estruturas com altura maior ou igual a 15 m e/ou reservatórios acima de 3 milhões m³ de material, e

aplicando esse critério nas estruturas apresentadas, tem-se que 66 barragens cadastradas na FEAM referem-se a barragens de rejeito.

Tabela 41 - Barragens no estado de MG. Fonte: Adaptado de FEAM (2018)

	Destilaria	Álcool	Indústria	Mineração	TOTAL		Mineração (que atendem dados PNSB)
Classe I	67	15	101	183	26%		
Classe II	98	42	163	303	44%		4
Classe III	5	35	165	205	30%		62
TOTAL	170	92	429	691			66
	25%	13%	62%				15% do Total de Mineração

Esses valores divergem do que é contabilizado pela ANM e pela ANA, conforme apresentado no item anterior a este capítulo. A ANM contabiliza 219 barragens de rejeito em MG em fevereiro de 2019 e, de acordo com os dados da ANA de dezembro de 2018, tem-se 242 estruturas. Os dois valores são superiores ao considerado pela FEAM nos dados com data base de dezembro de 2018, que é de 66 estruturas.

Com base nos dados apresentados verifica-se que ainda é grande e bem representativa a divergência dos dados apresentados por cada órgão, principalmente quanto possuem alguma interface. É de se esperar que os dados apresentados nos Relatórios da ANA sejam, no mínimo, similares ao contabilizados individualmente por ANM e ANEEL, haja visto que as estruturas são as mesmas, assim como a base de dados. Por mais que os critérios de classificação sejam os mesmos, baseado na Categoria de Risco e no Dano Potencial Associado, cada órgão apresenta uma faixa de Classe, o que também pode levar a interpretações equivocadas durante o tratamento conjunto dos dados.

No caso da FEAM, o fato do sistema de classificação ser totalmente diferenciado pode levar a separação incorreta das estruturas para comparativo com os demais órgãos. Ainda, a legislação FEAM é de 2005 e nada foi alterado desde que foi estabelecida a Lei de Segurança de Barragens em 2010. A Lei Estadual 23.291, que instituiu a Política Estadual de Segurança de Barragens em MG, não altera ou complementa por sistema de classificação estabelecido na Deliberação Normativa do Copam 87 de junho de 2005.

6 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

O grande número de rupturas de barragens que tem ocorrido nos últimos anos, aliado à amplitude das informações que vem sendo difundidas e o maior entendimento da população sobre as questões associadas a barragens, vêm mudando a forma com que os estudos são realizados. Tem sido cada vez maior o desenvolvimento de ferramentas que agregam cálculos de risco, probabilidade e potencial de falha, trazendo um maior conforto na gestão da estabilidade e facilitando a aceitação de tais estruturas na cadeia produtiva. É fato que as barragens de rejeito não trazem retorno financeiro para o empreendimento, haja vista que armazenam materiais que possuem valor econômico reduzido. Tal equação pode ser melhorada quando os resíduos são reaproveitados, por exemplo, para construção de vias, tijolos, uso como aditivos em tintas, mas o custo de manter uma barragem ainda será um fator a ser considerado. Entretanto, mesmo não oferecendo vantagem competitiva direta ao empreendimento, são elementos de extrema importância na análise de rentabilidade do empreendimento, uma vez que os custos associados à reparação de danos por conta da ruptura dessas estruturas são expressivos. Nesse sentido, novos profissionais estão sendo frequentemente vistos nas discussões relacionadas à gestão de segurança de barragens, tais como ambientalistas, grupos assistenciais, organizações de saúde, empresas de seguro, dentre outros.

Os países subdesenvolvidos estão sobrecarregados com um legado de milhares de barragens de idade avançada, que acumulam problemas construtivos e de operação e que são uma bomba relógio. Essa questão também é observada em países desenvolvidos, mas em escala menor, visto que já investiram em novas tecnologias, inclusive em processos de beneficiamento mais robustos que minimizam, e até eliminam, o volume de resíduos que requer armazenamento em barragens. Os investimentos que essas estruturas requerem podem ser bem elevados e pode culminar na decisão de um empreendedor em manter a operação ou optar pelo fechamento das instalações. As opções de descomissionamento e descaracterização têm sido as mais seguras para estruturas que apresentam um elevado risco ou grande probabilidade de falha.

Em um passado não muito distante, as questões relacionadas à gestão de segurança de barragens eram extremamente técnicas, com conceitos interligados a áreas de inundação, efeitos de sismos, condições de fundação e projeto da barragem. As questões relacionadas à operação e à manutenção eram tratadas em manuais de operação, cartas de risco e protocolos que, basicamente, avaliavam a performance da estrutura somente em relação ao que era estabelecido em projeto. O desenvolvimento de uma nova percepção da Geotecnia, requer que novos conceitos sejam incorporados na tomada de decisão acerca da estabilidade, principalmente aqueles que trazem uma visão probabilística aos conceitos que anteriormente eram tratados de forma puramente determinística.

A análise de risco permite uma estimativa mais precisa da frequência de perigos e danos esperados, antecipando planos de ação e reduzindo impactos de grande magnitude. Nessa abordagem, as incertezas estão relacionadas à aleatoriedade natural dos perigos e, em parte, em função do entendimento equivocado sobre avaliar quais perigos devem realmente ser considerados em ordem prioritária de vulnerabilidade. As perdas históricas podem explicar o passado, mas não fornecem, necessariamente, um bom guia para o futuro, haja vista que em uma visão pessimista, os piores desastres que poderiam acontecer, ainda não aconteceram. Ou seja, uma avaliação probabilística de risco pode simular futuros desastres, que com base em evidências científicas, provavelmente ocorrerão, ou ainda, o modelo probabilístico aumenta os registros históricos reproduzindo a física do evento e criando uma gama de eventos subsequentes. Os modelos determinísticos tratam a probabilidade de um evento como finito, sendo avaliado geralmente em etapas.

A inspeção de campo e a coleta de dados de instrumentação bem realizadas são o primeiro passo para o sucesso de uma avaliação de risco, principalmente as Inspeções Regulares (ISR). É fundamental que haja uma preparação prévia, bem como que sejam realizadas por profissionais altamente capacitados, sendo que todas as rotinas já devem ser previstas no Plano de Ação Emergencial. Os dados de uma inspeção devem ser criticamente avaliados em relação às edições anteriores e, verificada uma anomalia significativa, deve-se atentar para a pronta execução de um plano de ação corretivo. No acompanhamento dessas ações corretivas, o processo torna-se iterativo, até que se tenha um evento controlado e o gerenciamento de riscos efetivo.

No caso de barragens, os riscos devem ser entendidos como a medida da probabilidade da ocorrência de uma condição adversa e a gravidade das consequências de tal condição. É por essa razão que, geralmente, aplicamos técnicas de análise de risco para medir a probabilidade e, por meio das análises de falha, avaliamos as consequências de tal evento.

A avaliação de risco é o processo onde se considera a estimativa quantitativa ou qualitativa do risco, juntamente a todos os aspectos sociais, ambientais, temporais e outros, avaliando as consequências de uma falha e determinando um plano de ação para mitigar ou aceitar o risco. Essa análise deve necessariamente ser realizada por especialistas em vários campos, tais como geólogos, engenheiros geotécnicos, hidrólogos, engenheiros hidráulicos e estruturais, dentre outros. Nessa avaliação do risco, todos os riscos devem ser avaliados em termos de custos e vantagens e, uma representação esquemática da Avaliação de Risco é apresentada na Figura 52.

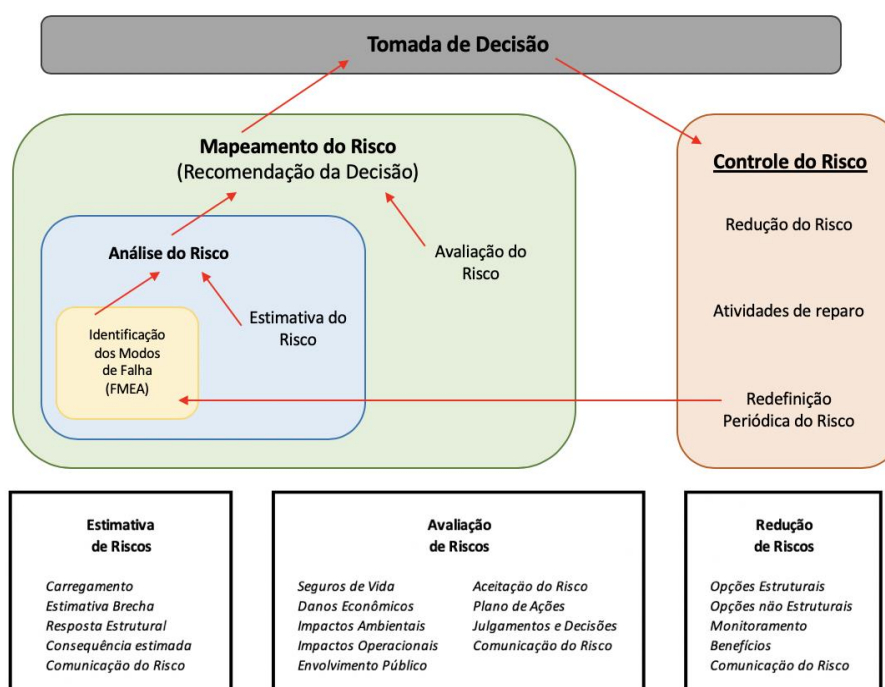


Figura 52 - Infográfico do processo de Gerenciamento de Risco em Barragens. Fonte: Adaptado de FEMA (2015)

O gerenciamento de risco tem sido amplamente utilizado na indústria desde a década de 60, mas somente no final da década de 80 que o conceito foi incorporado

no processo de tomada de decisões relacionado a barragens. Entretanto, o gerenciamento de segurança de barragens deve ser bem específico, diferenciado para cada estrutura, região, país e, principalmente, empreendimentos.

No Reino Unido, tem-se uma legislação específica para gerenciamento de segurança de barragens e a responsabilidade é dividida entre proprietários de barragens, conselhos, departamentos governamentais e técnicos responsáveis pelas estruturas que estejam devidamente registrados no Instituto de Engenheiros Civil. Não há exigência para uso da análise de risco, mas, uma pesquisa apresentada por MacGrath (2000), já apontava o uso do FMECA desde 1996 em 84 barragens, das quais 56 são consideradas grandes barragens pelo ICOLD. Ainda, de acordo com esse estudo, a probabilidade de falha de barragens é estimada em cerca de 1/10.000 por ano.

Na França, as questões relacionadas à segurança de barragens são abordadas desde os estudos conceituais de projeto e, para as estruturas maiores que 20 m ou reservatório contendo mais de $15 \times 10^6 \text{ m}^3$, sendo que os arquivos devem ser submetidos às autoridades para aprovação. Os reparos em barragens antigas são supervisionados por um comitê técnico permanente formado por membros do Ministério da Indústria, Ministério do Meio Ambiente e Ministério dos Transportes. O primeiro enchimento do reservatório também deve ser amplamente documentado pelo proprietário e, desde os primeiros momentos da operação deve haver inspeções visuais periódicas e monitoramento frequente dos instrumentos, com a descrição detalhada as anomalias. Ainda, deve haver inspeções de segurança abrangentes a cada ano, durante os cinco primeiros anos de operação, podendo ter o prazo ampliado após esse período. O Plano de Ação Emergencial é obrigatório, mas os mapas de inundação são preparados pela autoridade local onde a barragem está instalada. O processo de verificar se uma barragem atende aos padrões definidos pelos regulamentos significa não aceitar riscos em barragens, sob nenhuma hipótese.

A Suécia possui cerca de 10 mil barragens das quais 190 são classificadas como grandes barragens. A lei sueca atribui aos proprietários a total responsabilidade de suas barragens e é necessário permissão do governo para a construção e operação das estruturas, sendo que a segurança de barragens faz parte do Código Ambiental na Lei de Proteção Civil. A Vattenfall AB é uma das principais empresas de energia da Europa, proprietária de 50% das barragens no

país, e foi a primeira empresa hidrelétrica sueca a reformular as Diretrizes de Segurança Pública em 2007. A avaliação de riscos é considerada uma metodologia para priorizar as medidas corretivas das anomalias, com amplo uso.

Nos Estados Unidos, tem-se um grande número de falhas de barragens ocorridas no passado, com grandes impactos ambientais, sociais e econômicos. Após a ruptura da Barragem 3 da *Pitson Coal* na Virgínia, em 1972, o Congresso aprovou a Lei Nacional de Inspeção de Barragens em 1973 com regras para a elaboração de análises de risco. A ruptura de *Teton* em 1976 foi o marco decisório na história americana, quando o Presidente Carter exigiu que as Agências Federais adotassem imediatamente padrões de segurança de barragens. Em meados dos anos 90 a Bureau (USBR) começou a utilizar as ferramentas de análise de risco como o principal suporte para a tomada de decisões das suas, até então, 350 barragens. O Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (USACE) começou a utilizar essas ferramentas após as rupturas de Nova Orleans em 2005, com a nomenclatura de análise do modo de falha potencial – PFMA, que considera uma linha divisória na matriz FMEA representando a probabilidade de 1:10.000, que foi adotada como critério razoável para perdas de vidas (Figura 53).

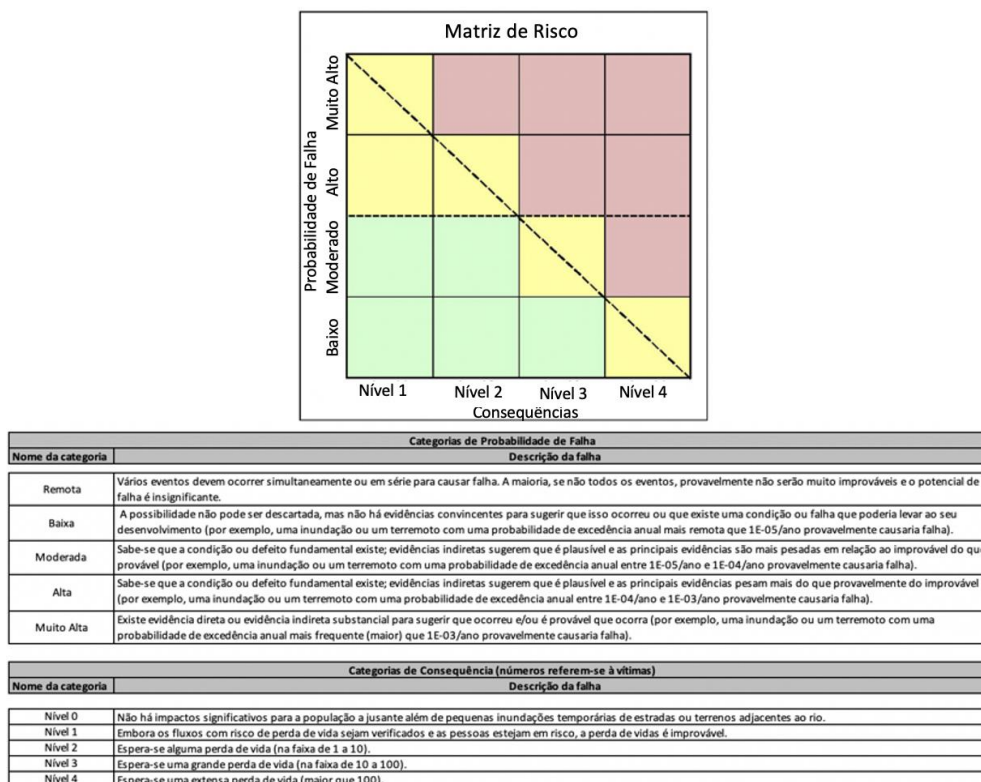


Figura 53 - Matriz FMEA da USACE. Fonte: adaptado de USACE (2014)

No Brasil, a norma ABNT ISO 31000 de 2018 apresenta princípios e diretrizes básicas para gestão de riscos, mas não possui metodologia aplicada para barragens. A legislação específica de Segurança de Barragens é de 2010 e estabelece uma Política Nacional de Segurança de Barragens, atribuindo a cada órgão específicas atribuições de legislar sobre auditorias, revisões periódicas, planos de ação emergencial e planos de segurança de barragens. Ainda que uma nova Lei tenha sido publicada em setembro de 2020 (Lei nº 14.066), não há determinação específica em relação à análises de risco, a não ser quando avaliados subjetivamente para definir hipóteses e possíveis cenários de rupturas em estudos de *Dam Break* ou, na classificação da Categoria de Risco. O sistema classificatório de Categoria de Risco (CR) e Dano Potencial Associado (DPA) é estabelecido por cada órgão fiscalizador, em legislação específica, considerando a particularidade das estruturas sob sua gestão. A Categoria de Risco, por exemplo, é baseada em um somatório de notas atribuídos às Características Técnicas (CT) que considerada altura, comprimento, vazão de projeto, método construtivo, idade da barragem, dentre outros. O Estado de Conservação (EC) compreende confiabilidade das estruturas extravasoras, percolação, deformações e recalques, deterioração de taludes e paramentos e, o Plano de Segurança (PS), documentos de projeto, estrutura organizacional, PAE, relatórios de inspeção, e etc.

Na legislação ANM publicada inicialmente em 2012 (ainda enquanto Departamento Nacional de Pesquisa Mineral - DNPM), que trata especificamente das barragens de rejeitos, não há definição sobre critérios para Análise de Risco, sendo somente citada uma classificação de Categoria de Risco, mas que não é obtida de uma análise probabilística. Os textos mais recentes desse órgão estabelecem metodologias mais restritivas para avaliação de segurança de barragens, mas, somente, para as estruturas com alteamento por montante. Para a ANEEL que atua nas barragens de geração de energia e ANA e IGAM, que respondem pelas barragens de acumulação de água, também não são mencionados procedimentos avaliativos de riscos. Vale ressaltar que a legislação específica da ANA foi publicada em 2012, seguida pela ANEEL em 2015 e pelo IGAM em 2019. O Guia de Boas Práticas para Gestão de barragens e estruturas de disposição de rejeitos foi publicado pelo Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM em 2019 e apresenta alguns tópicos de gestão de riscos, citando ferramentas que podem ser utilizadas: entretanto não menciona a metodologia mais indicada para cada caso.

6.1 Árvore de eventos aplicada a inspeções de barragens

As incertezas do comportamento geotécnico dos solos, principalmente sob a ação de carregamentos estáticos e dinâmicos, sinalizam a importância de uma análise probabilística para avaliação adequada da estabilidade das estruturas. Dessa forma, a análise de riscos consiste na verificação de diferentes componentes de um sistema, que se interagem, sendo que os cenários resultantes podem ser mais críticos ou menos críticos. Ainda, permite que os riscos sejam definidos e reconhecidos, resultando em um sistema mais efetivo no gerenciamento técnico.

A metodologia da Árvore de Eventos tem sido bem útil para a avaliação de riscos em barragens à medida que utiliza os dados provenientes das Fichas de Inspeção de Campo, que são rotinas padronizadas e com uma periodicidade razoável. Dessa forma, pode ser atualizada frequentemente, gerando parâmetros cada vez mais assertivos e diretivos para a estrutura que está sendo considerada, além de ser orientativo para as questões gerenciais de segurança de barragens.

O primeiro passo é ter uma Ficha de Inspeção bem definida, com todas as áreas da estrutura mapeadas, bem como uma lista aplicada de possíveis anomalias. No Livro “Manual para elaboração de planos de ação emergencial para barragens de mineração – Fernandes, 2017), apresenta-se um modelo de Ficha, ressaltando-se que deve ser personalizado em função da particularidade de cada barragem. A percepção de eventuais anomalias associadas à funcionalidade de uma estrutura, e seu respectivo desempenho, desencadeiam um processo de verificação de probabilidades, determinando quais as decisões ou recomendações devem ser priorizadas.

Neste item, está sendo proposta uma nova metodologia de análise de risco, baseada no modelo de árvore de eventos, mas totalmente direcionada para uso em barragens de rejeito ou de água. Tal metodologia será denominada de “Método Baldi” e consiste, basicamente, no cálculo de um Risco Probabilístico (RP), baseado em Eventos e Probabilidades decorrentes da progressão de uma anomalia identificada em Fichas de Inspeção e denominadas Probabilidade de Inspeção (PI), seguindo um ordenamento lógico e numérico, em função da Magnitude (M), do Nível de Perigo (NP), da Probabilidade da Anomalia (PA) e do Modo de Falha (MF) selecionado. Além disso, considera um descritivo probabilístico da Anomalia (DPR), que permite uma melhor visualização dos riscos associados. A aplicação do Método

Baldi é iniciada pela Ficha de Inspeção, que deve ser estruturada por códigos, sendo um exemplo listado a seguir.

A. Infraestrutura Operacional e Acessos.

B. Barragem.

1. Talude de Montante (separado por talude, ou seja, talude de Montante 1, 2 etc.);
2. Coroamento ou Crista;
3. Talude de Jusante (separado por talude, ou seja, talude de Jusante 1, 2 etc.);
4. Região a jusante;
5. Instrumentação;
6. Sistema de drenagem interna; e
7. Sistema de drenagem superficial.

C. Vertedouro.

1.1. Canais de aproximação e restituição;

1.2. Muros laterais; e

1.3. Comportas.

D. Reservatório.

E. Torre da Tomada D`água

1. Entrada e Acionamento; e

2. Comportas.

F. Caixa de Montante.

G. Estrutura de Saída.

H. Drenagem Interna.

I. Medidor de Vazão.

J. Drenos de Segurança.

K. Sistema de aspersores.

L. Estações de bombeamento.

M. Outros.

Para cada região da barragem são listadas as prováveis anomalias, que possuem codificação subsequente como no exemplo a seguir, ainda sendo definidas, para cada uma delas, a Magnitude e o Nível de Perigo.

B – Barragem.

B.1 – Barragem-Talude de Montante 1.

B.1.1 – Erosões;

B.1.2 – Escorregamentos; e

B.1.3 – Rachaduras e Trincas.

A Magnitude (M) define a dimensão e a evolução dessa anomalia, comparativamente a inspeções anteriores e, com base no que foi verificado em campo durante inspeção utilizada como base da Análise de Risco. Para magnitude, têm-se as seguintes categorias:

I. Insignificante, anomalia de pequenas dimensões, sem aparente evolução;

P. Pequena, anomalia de pequena dimensão, com evolução ao longo do tempo;

M. Média, anomalia de média dimensão, sem aparente evolução; e

G. Grande, anomalia de média dimensão, com evidente evolução, ou anomalia de grande dimensão.

O nível de perigo (NP) apresenta uma classificação numérica para a anomalia identificada, baseando-se no grau de comprometimento da estabilidade e segurança da estrutura, sendo:

0. Normal, anomalia não compromete a segurança da barragem;

1. Atenção, anomalia não compromete de imediato a segurança da barragem, mas caso venha a progredir, pode comprometê-la, devendo ser controlada, monitorada ou reparada;

2. Alerta, anomalia compromete a segurança da barragem, devendo ser tomadas providências imediatas para sua eliminação; e

3. Emergência, anomalia representa alta probabilidade de ruptura da barragem.

Dessa forma, ao final da avaliação, será possível estabelecer um sequenciamento de anomalias, por região, que apresentarão uma magnitude e um nível de perigo, conforme exemplificado na Tabela 42.

Para a Árvore de Eventos, é necessário definir alguns intervalos probabilísticos, bem como modos de falha a serem considerados, número de eventos, dentre outros. Nessa etapa, é importante que se faça uma avaliação multidisciplinar do histórico da estrutura, para que os intervalos definidos sejam coerentes e aplicáveis. A discussão com vários níveis de profissionais de diferentes pontos de vista e especialidades contribui significativamente para a redução da subjetividade na definição dos índices e progressão das anomalias, haja visto que deve haver um comum acordo entre as partes.

Tabela 42 - Exemplo de Lista de Anomalias, magnitudes e níveis de perigo pelo Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora

CÓDIGO	LOCALIZAÇÃO DA ANOMALIA	SITUAÇÃO	MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)
A.1	INFRAESTRUTURA OPERACIONAL	Falta de documentação sobre barragem	M	1
A.8		Falta ou deficiência nas placas de aviso	P	0
B.1.1	TALUDE DE MONTANTE	Erosões	M	1
B.1.2		Escorregamentos	M	1
B.1.4		Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado	M	1
B.1.6		Árvores e arbustos	P	1
B.1.9		Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	P	1
B.1.10		Sinais de movimento	M	1
B.2.4		COROAMENTO	Falha no revestimento	P
B.2.5	Afundamentos e buracos		P	1
B.2.6	Árvores e arbustos		M	1
B.2.9	Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais		P	1
B.2.12	Ameaça de transbordamento da barragem		G	1
B.3.5	TALUDE DE JUSANTE	Falha na proteção vegetal	P	1
B.3.7		Árvores e arbustos	M	1
B.3.11		Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	P	1

A Probabilidade da Anomalia (PA) varia de 1 a 100%, apresentada em decimais. Sendo assim, haverá variações entre 0 e 1,0, dependendo da composição

de magnitude e do nível de perigo apresentados na Ficha de Inspeção. Ressalta-se que os valores 0% e 100% podem ser desconsiderados por se tratar de extremos e, para garantir uma margem de segurança em relação à subjetividade no preenchimento da Ficha de Inspeção. As faixas devem ser definidas com base nas análises de estabilidade e, de acordo com as potenciais falhas da estrutura verificadas no histórico de inspeções regulares. Para o Método Baldi, os intervalos probabilísticos da interação entre Magnitude e Nível de Perigo foi estabelecido conforme apresentado a seguir:

- a. Magnitude Insignificante (I) com:
 - i. Nível de Perigo Normal (0) – Probabilidade de 0,10;
 - ii. Nível de Perigo Atenção (1) – Probabilidade de 0,15;
 - iii. Nível de Perigo Alerta (2) – Probabilidade de 0,20; e
 - iv. Nível de Perigo Emergência (4) – Probabilidade de 0,25.
- b. Magnitude Pequena (P) com:
 - i. Nível de Perigo Normal (0) – Probabilidade de 0,30;
 - ii. Nível de Perigo Atenção (1) – Probabilidade de 0,40;
 - iii. Nível de Perigo Alerta (2) – Probabilidade de 0,50; e
 - iv. Nível de Perigo Emergência (4) – Probabilidade de 0,55.
- c. Magnitude Média (M) com:
 - i. Nível de Perigo Normal (0) – Probabilidade de 0,60;
 - ii. Nível de Perigo Atenção (1) – Probabilidade de 0,65;
 - iii. Nível de Perigo Alerta (2) – Probabilidade de 0,70; e
 - iv. Nível de Perigo Emergência (4) – Probabilidade de 0,75.
- d. Magnitude Grande (G) com:
 - i. Nível de Perigo Normal (0) – Probabilidade de 0,80;
 - ii. Nível de Perigo Atenção (1) – Probabilidade de 0,85;
 - iii. Nível de Perigo Alerta (2) – Probabilidade de 0,90; e
 - iv. Nível de Perigo Emergência (4) – Probabilidade de 0,95.

O Modo de Falha (MF), também definido como Consequência, consiste no evento último, subsequente à progressão da anomalia, que leva a estrutura a uma condição de ruptura. No Método Baldi, os modos de falha considerados seguem o

padrão dos modos de falha identificados nos estudos de ruptura avaliados, tais como:

- Galgamento;
- *Piping*;
- Problemas Estruturais (Instabilidade, terremotos, liquefação, deformação, etc); e
- Gestão.

Os eventos são o desdobramento das observações feitas na Ficha de Inspeção, bem como análise do relatório fotográfico, com o sequenciamento possível e provável de progressão da anomalia, até o modo de falha considerado. Os eventos são sucessivos, ou seja, o Evento 5 é um desdobramento do Evento 4 que, por consequência, é desdobramento do Evento 3, e assim por diante. Os eventos são definidos em número suficientes para a total descrição da progressão da anomalia ao modo de falha. Geralmente, os eventos são definidos como os “nós” da árvore, e desdobram-se em duas ramificações, ou mais.

A Probabilidade da Inspeção (PI) é o produto da Probabilidade da Anomalia (PA) pelo percentual probabilístico atribuído a cada evento. Na Equação (2), tem-se:

$$PI_n = (PI_{n-1}) \times (PE_{\text{evento}^n}) \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

(n) corresponde ao número de eventos. Para o primeiro evento $PI_1 = PA \times PE_{\text{evento}}$.

A relação numérica da probabilidade de ocorrência de cada evento analisado é feita com base no relatório fotográfico e nas observações da Ficha de Inspeção. Os eventos são complementares, ou seja, a soma dos ramos de cada “nó” deve ser 100%. Ainda, para cada evento, o somatório das probabilidades de todos os ramos é 100%.

Caso a Análise de Risco seja usada como pré-requisito para uma Análise de Falha, como por exemplo, tipo FMEA, é essencial que o Evento Final da árvore considere processos de instabilidade local e global.

O Risco Probabilístico (RP) é o produto da Probabilidade da Anomalia (PA) pelas probabilidades da Inspeção (PI) para cada Evento. Ou seja, é a probabilidade de cada ramo da árvore. É interessante organizá-los em ordem prioritária, ou seja, da maior para a menor probabilidade.

Na Tabela 43, tem-se um exemplo das Probabilidades (PA) e os Modos de Falha (MF) para determinadas anomalias, considerando o Método Baldi. É importante que haja um ordenamento crescente em termos de Magnitude e Nível de Perigo, para auxiliar no processo do cálculo do Risco. Na Tabela 44 é mostrado um exemplo de árvore de eventos para a anomalia B.1.1, de erosões no Talude de Montante, aplicando o Método Baldi.

Após o cálculo do Risco Probabilístico (RP) de cada anomalia, realiza-se o Descritivo Probabilístico da Anomalia (DPR), organizando o RP de cada árvore em um sequenciamento, do maior para o menor, conforme exemplo apresentado na Tabela 45. A descrição deve ser completa, iniciada com a anomalia e seguida do local onde foi constatada, com a inserção de todos os eventos. Geralmente, é mais fácil descrever cada bloco em separado, começando pelo ramo com menos eventos e progredindo para o que possui mais eventos.

Tabela 43 - Exemplo de Probabilidades (PA) e os Modos de Falha (MF) para determinadas anomalias, pelo Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora

MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)	CÓDIGO	PROBABILIDADE (PA)	MODO DE FALHA (MF)
I	0	D.3	0,10	Gestão
P	0	A.8	0,30	Gestão
P	0	B.2.4	0,30	Problema Estrutural
P	1	B.1.6	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.1.9	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.2.5	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.2.9	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.3.5	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.3.11	0,40	Problema Estrutural
P	1	C.1.2	0,40	Galgamento
P	1	C.2.3	0,40	Galgamento
P	1	C.3.3	0,40	Problema estrutural
P	1	C.3.9	0,40	Problema estrutural

P	1	C.4.5	0,40	Problema estrutural
P	1	C.4.6	0,40	Problema estrutural
M	1	A.1	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.1.1	0,65	<i>Piping</i>

Tabela 44 - Árvore de Eventos para Anomalia B.1.1. Fonte: Elaborado pela autora

REGIÃO DA BARRAGEM	ANOMALIA		MODO DE FALHA (MF)	PROBABILIDADE DA INSPEÇÃO (PI)										RISCO PROBABILÍSTICO (RP)	ORDEM						
				EVENTO 1	PROBABILIDADE P1	EVENTO 2	PROBABILIDADE P2	EVENTO 3	PROBABILIDADE P3	EVENTO 4	PROBABILIDADE P4	EVENTO 5	PROBABILIDADE P5			EVENTO 6	PROBABILIDADE P6				
Barragem (B)	Talude de Montante (B.1)	Erosões (B.1.1)	Probabilidade da anomalia (PA) 0,9	Piping	Ocorrem erosões superficiais ou na proteção vegetal 0,6	0,54	Sulcos erosivos isolados 0,6	0,324	Desenvolvimento progressivo das erosões 0,8	0,2592	Presença de água 0,2	0,05184	Carreamento de sedimentos 0,1	0,005184	Instabilidade Global 0,5	0,002592	10a				
																		Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2	Sem presença de água 0,8	Sem carreamento de sedimentos 0,9	Instabilidade Local 0,5
							Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2	Sem presença de água 0,8	Sem carreamento de sedimentos 0,9	Instabilidade Local 0,5											
											Sulcos erosivos isolados 0,6	0,216	Desenvolvimento progressivo das erosões 0,8	0,1728	Presença de água 0,2	0,03456	Carreamento de sedimentos 0,1	0,003456	Instabilidade Global 0,5	0,001728	11a
							Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2	Sem presença de água 0,8	Sem carreamento de sedimentos 0,9	Instabilidade Local 0,5											
					Sulcos erosivos múltiplos 0,4	0,144															
							Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2	Sem presença de água 0,9	Sem carreamento de sedimentos 0,9	Instabilidade Local 0,5											
											Sulcos erosivos isolados 0,6	0,216	Desenvolvimento progressivo das erosões 0,8	0,1728	Presença de água 0,2	0,03456	Carreamento de sedimentos 0,1	0,003456	Instabilidade Global 0,5	0,001728	11c
					Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2	Sem presença de água 0,8	Sem carreamento de sedimentos 0,9	Instabilidade Local 0,5													
									Sulcos erosivos múltiplos 0,4	0,144											
					Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2	Sem presença de água 0,9	Sem carreamento de sedimentos 0,9	Instabilidade Local 0,5													
Sulcos erosivos múltiplos 0,4	0,144	Desenvolvimento progressivo das erosões 0,8	0,1152	Presença de água 0,1							0,01152	Carreamento de sedimentos 0,1	0,001152	Instabilidade Global 0,5	0,000576	9					
					Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2	Sem presença de água 0,9	Sem carreamento de sedimentos 0,9	Instabilidade Local 0,5													
									Sulcos erosivos múltiplos 0,4	0,144							Desenvolvimento progressivo das erosões 0,8	0,1152	Presença de água 0,1	0,01152	Carreamento de sedimentos 0,1
Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2	Sem presença de água 0,9	Sem carreamento de sedimentos 0,9	Instabilidade Local 0,5																		
				Sulcos erosivos múltiplos 0,4	0,144	Desenvolvimento progressivo das erosões 0,8	0,1152	Presença de água 0,1			0,01152	Carreamento de sedimentos 0,1	0,001152	Instabilidade Global 0,5	0,000576	8					
Sem desenvolvimento progressivo das erosões 0,2	Sem presença de água 0,9	Sem carreamento de sedimentos 0,9	Instabilidade Local 0,5																		

Tabela 45 - Descritivo probabilístico da Anomalia B.1.1, com base na Árvore de Eventos do Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora

	RP	CÓDIGO	DESCRITIVO PROBABILÍSTICO DA ANOMALIA (DPR)
1	0,20736	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos isolados superficiais, ou na proteção
2	0,13824	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos múltiplos superficiais, ou na proteção
3	0,13824	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos isolados em profundidade, ou abaixo da proteção
4	0,10368	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos múltiplos em profundidade, ou abaixo da proteção, gerando estabilidade local
5	0,0648	B.1.1	Erosões no talude montante em sulcos erosivos isolados superficiais, ou na proteção
6	0,046656	B.1.1	Desenvolvimento progressivo erosões talude de montante, com presença de água e sem carreamento sedimentos, sulcos erosivos isolados superficiais, ou na proteção
7	0,0432	B.1.1	Erosões talude de montante sulcos erosivos múltiplos superficiais, ou na proteção
8	0,0432	B.1.1	Erosões no talude de montante em sulcos erosivos isolados em profundidade, ou abaixo da proteção
9	0,031104	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, com presença de água e sem carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos múltiplos superficiais, ou na proteção
10	0,031104	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos isolados em profundidade, ou abaixo da proteção
11	0,0288	B.1.1	Erosões talude montante em sulcos erosivos múltiplos em profundidade, ou abaixo da proteção
12	0,010368	B.1.1	Desenvolvimento progressivo erosões no talude montante, sem presença água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos múltiplos em profundidade, ou abaixo da proteção
13	0,002592	B.1.1	Desenvolvimento progressivo erosões talude montante, com presença água e carreamento de sedimentos, sulcos erosivos isolados superficiais, ou na proteção, gerando instabilidade global
14	0,002592	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, com presença de água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos isolados superficiais, ou na proteção, gerando instabilidade local
15	0,001728	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, com presença de água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos múltiplos superficiais, ou na proteção, gerando instabilidade global
16	0,001728	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, com presença de água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos múltiplos superficiais, ou na proteção, gerando instabilidade local
17	0,001728	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, com presença de água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos isolados em profundidade, ou abaixo da proteção, gerando instabilidade global
18	0,001728	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, com presença de água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos isolados em profundidade, ou abaixo da proteção, gerando instabilidade global
19	0,000576	B.1.1	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, com presença de água e carreamento de sedimentos, em sulcos erosivos múltiplos em profundidade, ou abaixo da proteção, gerando instabilidade global

Ao final, todas as RP's das árvores são compiladas e tem-se o sequenciamento prioritário para tratamento das anomalias, com base na probabilidade de falha. Esse produto do Método Baldi é a Análise de Risco, ou seja, a definição dos riscos probabilísticos do sequenciamento progressivo de cada anomalia, para determinados modos de falha.

As RP's podem ser agrupadas em zonas aceitáveis e inaceitáveis, conforme proposto por Brazendale e Bell (1994) e apresentado anteriormente. Nesse caso, definem-se os extremos como uma faixa de Risco Aceitável, e uma faixa de Risco Inaceitável. Intermediário a essas duas faixas, tem-se a zona de Risco Tolerável. Para o Método Baldi, define-se que os Riscos Probabilísticos (RP) iguais ou maiores do que 20% representam um grande potencial de falha e devem ser considerados em uma análise mais pormenorizada, como Riscos Inaceitáveis. Os Riscos Toleráveis são aqueles na faixa entre $10 \leq RP < 20$ e os Riscos Aceitáveis aqueles de valor menor que 10%.

6.2 Análise FMEA aplicada a inspeção de barragens

As incertezas do comportamento geotécnico dos solos, principalmente sob a ação de carregamentos estáticos e dinâmicos, sinalizam a importância de uma análise probabilística para avaliação adequada da estabilidade das estruturas. Dessa forma, a análise de falhas consiste na verificação de diferentes componentes de um sistema, que se interagem, sendo que os cenários resultantes podem mais críticos ou menos críticos. Ainda, permite que os riscos sejam definidos e reconhecidos, resultando em um plano de ação mais efetivo e integrado.

Para cada sistema e subsistema definido na Análise de Risco como Risco Inaceitável, deve-se estabelecer uma Função, Falha, Efeito Final, Causa, Controle e Tipo de Controle, além do cálculo do RPN.

Para o item FUNÇÃO é desejável que contenha verbos transitivos que, tendo sentido incompleto, necessitam de um complemento verbal para completar o seu sentido, ou seja, necessitam de um objeto direto ou indireto. Alguns exemplos de verbo transitivo ligado ao objeto são: conter, reter, prover, drenar, promover, dentre outros. Neste item, adiciona-se algo que esteja relacionado à anomalia considerada para o item.

Para o item FALHA, associa-se o Modo de Falha para caso o sistema seja impedido de exercer a função definida e, geralmente, é a negação direta do item Função. Caso a Análise de Falha esteja sendo utilizada como passo seguinte à Análise de Risco pelo Método Baldi, também podem ser utilizados os Modos de

Falha definidos para a Probabilidade de Anomalia (PA), associado à anomalia considerada para o item.

O EFEITO FINAL é a consequência da falha e é o item que deve ser avaliado conjuntamente ao Índice de Severidade (S). Caso a Análise de Falha esteja sendo utilizada como passo seguinte a uma Análise de Risco, o efeito final refere-se ao desdobramento progressivo da anomalia, ou seja, o último Evento considerado, que geralmente indica uma instabilidade global ou local. Cada efeito final deve conter um indicativo numérico de Severidade (S).

A CAUSA deve ser avaliada em duas escalas. Na microescala, geralmente está associada a uma anomalia e, nesse caso, podem ser utilizadas as anomalias relacionadas nas Análises de Risco. A progressão das anomalias leva a uma avaliação em macro escala, e geralmente refere-se a questões relacionadas à inadequação de projetos, técnicas construtivas ineficientes ou problemas de manutenção da estrutura. Cada causa deve conter um indicativo numérico de Ocorrência (O). Caso a Análise de Falha esteja sendo utilizada como passo seguinte à uma Análise de Risco, a Probabilidade de Ocorrência é interpretada conforme o Risco Probabilístico (RP) da Análise de Risco.

O plano de ação estabelecido para o controle de cada causa pode ser desmembrado em quantas atividades forem necessárias para que haja o controle do que está causando determinada falha. Nesse caso, são elencados como CONTROLE e, geralmente são estabelecidas medidas para adequação e revisão de projeto, inspeções visuais, verificação dos níveis de instrumentação, análises de estabilidade ou ações mais particulares. O TIPO DE CONTROLE é geralmente definido como prevenção e detecção. A prevenção refere-se às medidas que requerem um planejamento para que ocorram e o envolvimento de uma equipe multidisciplinar para esta ação como, por exemplo, as adequações de projeto. Já a detecção refere-se a atividades que devem ser realizadas diretamente na estrutura e que não requerem grandes intervenções para que sejam realizadas sendo, geralmente, as atividades de rotina já estabelecidas como inspeção e monitoramento. É desejável que para cada causa sejam estabelecidos, no mínimo, dois tipos de controles e, conseqüentemente, dois tipos de controle, sendo um de prevenção e outro de detecção. Cada dupla de prevenção x detecção deve conter um indicativo numérico de Detecção (D).

O Índice de Ocorrência (O) representa a probabilidade da ocorrência da anomalia que resultará em uma falha, ou seja, a frequência com que estas falhas podem ocorrer por ano, variando de 1 a 10. Nesse sentido, a Tabela 46 define as probabilidades de Ocorrência para uso conjunto do Método Baldi e, quando maior o Índice de Ocorrência, maior será a probabilidade de ocorrência da falha. Os valores percentuais estão associados ao Risco Probabilístico (RP) calculado em cada árvore.

Tabela 46 - Índice de Ocorrência (O) – Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora

Índice de Ocorrência (O)	Probabilidade de Ocorrência (eventos por ano)
1	Improvável ($\leq 0,01\%$)
2	Remota ($> 0,01$ e $\leq 0,1\%$)
3	Insignificante ($> 0,1$ e $\leq 1\%$)
4	Ocasional (> 1 e $\leq 10\%$)
5	Frequente (> 10 e $\leq 25\%$)
6	Alto (> 25 e $\leq 40\%$)
7	Elevado (> 40 e $\leq 60\%$)
8	Esperado (> 60 e $\leq 80\%$)
9	Provável (> 80 e $\leq 90\%$)
10	Muito Provável (> 90 e $\leq 100\%$)

O Índice de Detecção (D) considera a possibilidade de serem detectados novos modos de falha antes que elas ocorram e varia em uma escala de 1 a 10. No caso das barragens é um importante índice, uma vez que alguns mecanismos deflagradores de falhas não demonstram sinais claros ou a tempo de se evitar a ruptura. É por esse motivo que as inspeções devem ser realizadas por equipe extremamente qualificada, considerando os mais elevados critérios de avaliação, uma vez que a situação envolve um alto risco e um elevado potencial de dano. A Tabela 47 define o Índice de Detecção (D) para aplicação no Método Baldi e, quanto maior o Índice de Detecção, menor a possibilidade de detecção da falha.

O Índice de Severidade (S) considera os impactos e danos resultantes da falha e também varia em uma escala de 1 a 10, sendo que quanto maior a severidade, maior o dano associado. No âmbito da palavra dano, consideram-se os

impactos sociais, ambientais e econômicos. A Tabela 48 define o Índice de Severidade (S) para o Método Baldi.

O RPN é a multiplicação dos índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D). Na Figura 54 tem-se a representação gráfica do exemplo de análise FMEA para barragem da Tabela 49 para talude de montante e coroamento, com os respectivos índices e cálculo do RPN, aplicando os valores de índices estabelecidos no Método Baldi. Já na Tabela 50 têm-se indicativos de termos para demais estruturas de um barramento.

Tabela 47 - Índice de Detecção (D) – Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora

Índice de Detecção (D)	Probabilidade de Detecção
1	Muito provável
2	Elevada
3	Alta
4	Moderadamente Alta
5	Ocasional
6	Baixa
7	Muito baixa
8	Remota
9	Muito Remota
10	Improvável

Tabela 48 - Índice de Severidade (S) – Método Baldi. Fonte: Elaborado pela autora

Índice de Severidade (S)	Danos e Impactos
1	Sem danos
2	Danos isolados de pequena magnitude
3	Danos individuais reversíveis a curto prazo
4	Danos individuais reversíveis a longo prazo
5	Danos individuais de grande magnitude
6	Danos coletivos reversíveis a curto prazo
7	Danos coletivos reversíveis a longo prazo
8	Danos coletivos de grande magnitude
9	Danos individuais irreversíveis
10	Danos coletivos irreversíveis

A matriz FMEA da Figura 54 considera os valores de Severidade e Ocorrência para o exemplo da Tabela 49 e, nesse caso, tem-se que o item “B = Barragem”, exige uma atenção maior, por estar em uma zona mais crítica. Entretanto, em termos de RPN, tem-se que os valores calculados B.2.a são maiores, mas devido à baixa ocorrência, estão em uma zona menos crítica, que mesmo assim ainda exige atenção.

Na matriz FMEA, as Falhas Brandas são os contemplados nas porções em verde da matriz, sendo as Intermediárias na região em azul e as Severas nas porções em laranja e vermelho. A definição de cores pelo Método Baldi levou em consideração que:

- Danos coletivos estão relacionados a falhas severas, logo, Índice de Severidade ≥ 6 ;
- Danos individuais estão relacionados a falhas intermediárias, logo, $6 > \text{Índice de Severidade} \geq 3$;
- Danos isolados ou sem danos estão relacionados a falhas brandas, logo, Índice de Severidade < 3 ;
- Índice de Ocorrência ≥ 6 (alto à muito provável) combinado com Índice de Severidade ≥ 9 são zonas de falhas severas;
- Índice de Ocorrência ≥ 7 (elevado à muito provável) combinado com Índice de Severidade ≥ 9 são zonas de falhas severas. O mesmo é válido para Índice de Ocorrência = 6 (alto) e Índice de Severidade 10. A definição levou em consideração o grande impacto dos danos e a alta probabilidade de ocorrência dos eventos no ano; e
- A demarcação das demais zonas severas, intermediárias e brandas segue a proporção da severidade de cada falha quando combinada com a ocorrência dos eventos.

De acordo com as faixas de RPN obtidas em cada análise, deve-se propor uma segmentação do RPN, no mínimo, em três faixas, tais como Risco Aceitável, Risco Tolerável e Risco Intolerável. Quanto maior o valor de RPN, menor a tolerância para determinado evento, ou seja, maior deve ser a assertividade na resposta e medidas imediatas devem ser implantadas. Na definição do Plano de

Ação, um ordenamento prioritário de ações com base no RPN poderia ser desenvolvido, por exemplo, da seguinte forma:

- Prioridade 0 – B e B.2.a;
- Prioridade 1 – B.2.b; e
- Prioridade 2 – B.1.a e B.1.b.

Índice de Severidade (S)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10										
9										
8										
7						B.2.b				
6										
5						B.1.b				
4								B.2.a		B
3										
2								B.1.a		
1										

Figura 54 - Matriz FMEA para o exemplo da Tabela 49. Fonte: elaborado pela autora

Tabela 49 - Exemplo de análise FMEA para Barragem, Talude de Montante e Coroamento. Fonte: Elaborado pela autora

ESTRUTURA	FUNÇÃO	FALHA	EFEITO FINAL	(S)	CAUSA	(O)	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	(D)	RPN
B. Barragem	a. Conter rejeitos	Insuficiente capacidade de conter rejeitos	Instabilidade Global da Barragem	10	Inadequação do projeto e/ou construção e/ou manutenção	4	Adequação de projeto	Prevenção	3	120
							Inspeção Visual e Instrumentação	Deteção		
B.1 Talude de Montante	a. Reter rejeitos	Instabilidade devido a movimentos de massa	Redução do volume do maciço e perda de massa, com consequente redução da estanqueidade do sistema e Instabilidade Global	8	Alteração físico-química dos sólidos e/ou deficiente ligação entre as camadas de compactação	2	Adequação de projeto	Prevenção	1	16
							Inspeção Visual e Instrumentação	Deteção		
	b. Prover estabilidade mecânica	Deformação excessiva	Redução do FS em função de erosão superficial, com Instabilidade Local	6	Deficiente ligação entre as camadas de compactação	5	Adequação de projeto	Prevenção	2	60
							Inspeção Visual e Instrumentação	Deteção		
B.2 Coroamento	a. Conter rejeitos	Liquefação	Rompimento da crista da barragem, com Instabilidade Global	8	Inadequação do projeto e/ou construção e/ou manutenção	4	Adequação de projeto	Prevenção	6	192
							Inspeção Visual e Instrumentação	Deteção		
	b. Permitir acesso a estrutura	Não permitir acesso a barragem	Impossibilidade de realizar inspeções	6	Inadequação do projeto e/ou construção e/ou manutenção	7	Adequação de projeto	Prevenção	1	42
							Inspeção Visual e Instrumentação	Deteção		

Tabela 50 - Termos para diversas regiões de barragens. Fonte: Elaborado pela autora

ESTRUTURA		FUNÇÃO	FALHA	EFEITO FINAL	CAUSA	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE
Barragem	Núcleo da barragem	Reduzir condutividade hidráulica	Redução de percolação	Liquefação	Dissolução de materiais	Projeto, Inspeção e Instrumentação	Prevenção e Detecção
Sistema de drenagem interna		Drenar e filtra a água	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade Local	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajuste de projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
			Erosão Interna (Piping)	Instabilidade Global	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajuste de projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
Sistema de drenagem interna	Filtro vertical	Interceptar, drenar e filtrar a água do reservatório	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade Global	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajustes construtivos Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
			Erosão Interna (Piping)	Instabilidade Global	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajustes construtivos Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
	Tapete drenante	Drenar e filtrar a água proveniente das ombreiras, da fundação e do filtro	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade Local	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajustes construtivos Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
				Instabilidade Global	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajustes construtivos Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
			Erosão Interna (Piping)	Instabilidade Local	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajustes construtivos Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
				Instabilidade Global	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajustes construtivos Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
Saída do dreno de fundo	Promover a função do filtro	Erosão Interna (Piping)	Instabilidade Local	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajuste de projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção	
Sistema de drenagem superficial		Disciplinar as águas de chuva, direcionando para o exterior do maciço	Incapacidade de vazão	Surgimento de processos erosivos	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Projeto, Inspeção e Instrumentação	Prevenção e Detecção
Sistema de drenagem superficial	Vertedouro	Impedir a passagem de água sobre a barragem	Incapacidade de vazão	Instabilidade Global	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Adequação de geometria, Inspeção e Instrumentação	Prevenção e Detecção
Fundação		Assegurar a estabilidade do maciço	Perda da estabilidade mecânica da fundação	Instabilidade Global	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Ajustes construtivos Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
		Não gerar subpressões elevadas	Gerar subpressões elevadas na fundação	Instabilidade Global	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Execução de poços de alívio Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
Reservatório		Acumular rejeitos totais	Capacidade insuficiente de conter rejeitos	Ineficiência do reservatório	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Adequação da geometria Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção
		Amortecimento de cheias	Não amortecer cheias	Instabilidade Global	Inadequação projeto e/ou construção e/ou manutenção	Adequação da geometria Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção

7 APLICAÇÃO DO MÉTODO

Neste item serão avaliadas três barragens à luz da metodologia descrita no capítulo 6, definida como Método Baldi. A identificação das barragens, bem como o relatório fotográfico das estruturas foi suprimido para proteger os empreendimentos proprietários das estruturas, haja visto que não se tem autorização para divulgação detalhada das barragens. Essa omissão não compromete o estudo, uma vez que o que se discute e apresenta é a aplicação do método baseado na Ficha de Inspeção e identificação das anomalias.

A Barragem A é uma estrutura em solo, com seção homogênea, 6 m de altura e 200 m de comprimento no coroamento, construída para acumulação de água de uma indústria alimentícia. O vertedouro é de soleira livre (TR de 500 anos), em canal retangular, com dispositivo de descarga de fundo sob o vertedouro. As obras de construção foram finalizadas em 1995 e, em 2004, realizadas pequenas intervenções para melhoria do sistema de vertimento.

A Barragem B é em concreto, com altura máxima de 10 m, 130 m de comprimento e vertedouro de soleira livre (TR milenar), com acumulação de água para fins de geração de energia elétrica. Construída em 1930, teve sua crista nivelada em 2011 e algumas pequenas obras de melhoria estrutural.

A Barragem C é em solo, com seção homogênea, 14 m de altura e 800 m de comprimento, construída para acumulação de resíduos de uma mineração de ouro. A largura da crista é de 7 m, com taludes de montante 1,0V:2,5H e de jusante com 1,0V:2,0H. O vertedouro é localizado na ombreira esquerda, em canal de 5 m de largura, com estação de tratamento de efluentes, com operação por galerias. O vertedouro foi ampliado em 2009 para TR de 500 anos, sendo que a barragem foi construída em 1982 para CMP – cheia máxima de projeto.

A inspeção das três estruturas foi realizada entre o período de novembro de 2019 e março de 2020.

A aplicação do Método será feito em etapas para que seja avaliada individualmente a sua efetividade, nos tópicos descritos a seguir.

A- Desenvolvimento de uma Ficha de Inspeção de Barragens que permita identificar as anomalias em campo, bem como determinar a Magnitude e Nível de Perigo, caso existentes

A Ficha de Inspeção utilizada para análise das três estruturas possuem a mesma padronização de códigos e pequenas diferenças na listagem das anomalias em função do tipo de estrutura, sendo apresentadas no Apêndice A. Durante a elaboração da Ficha, é importante que sejam contempladas todas as estruturas da barragem e, para cada estrutura deve ser listadas as anomalias que possam ocorrer no curto e longo prazo. Para cada anomalia deve-se ter o registro da “situação” no momento da inspeção e, para estes casos, definiu-se que:

- NA = anomalia não se aplica à estrutura;
- NE = anomalia não existente;
- PV = anomalia identificada pela primeira vez;
- DS = anomalia desapareceu;
- DI = anomalia diminuiu;
- PC = anomalia permaneceu constante;
- AU = anomalia aumentou; e
- NI = anomalia não inspecionada;

Ainda é possível acrescentar observações para cada anomalia que subsidiam o estabelecimento das probabilidades para cada evento na Análise de Risco.

B- Para as anomalias identificadas como PV, DS, DI, PC e AU, necessariamente, devem ser atribuídos valores de Magnitude e Nível de Perigo.

Essa separação tem como objetivo trazer as anomalias existentes em cada estrutura para o cenário da Análise de Risco e, posteriormente, caso sejam representativas, para a Análise de Falha.

A Magnitude (M) define a dimensão e a evolução desta anomalia, comparativamente a inspeções anteriores e, com base no que foi verificado em

campo durante inspeção utilizada como base da Análise de Risco. Para magnitude, têm-se as seguintes categorias:

- I = **Insignificante**, anomalia de pequenas dimensões, sem aparente evolução;
- P = **Pequena**, anomalia de pequena dimensão, com evolução ao longo do tempo;
- M = **Média**, anomalia de média dimensão, sem aparente evolução;
- G = **Grande**, anomalia de média dimensão, com evidente evolução, ou anomalia de grande dimensão.

O nível de perigo (NP) apresenta uma classificação numérica para a anomalia identificada, baseando-se no grau de comprometimento da estabilidade e segurança da estrutura, sendo:

- 0 = **Normal**, anomalia não compromete a segurança da barragem;
- 1 = **Atenção**, anomalia não compromete de imediato a segurança da barragem, mas caso venha a progredir, pode comprometê-la, devendo ser controlada, monitorada ou reparada;
- 2 = **Alerta**, anomalia compromete a segurança da barragem, devendo ser tomadas providências imediatas para sua eliminação;
- 3 = **Emergência**, anomalia representa alta.

No caso da Barragem A foram elencadas 50 anomalias, conforme Tabela 51. Já para a Barragem B e C, respectivamente, tem-se nas Tabelas 52 e 53, 14 anomalias e 46 anomalias, todas com as respectivas Magnitudes e Níveis de Perigo.

Tabela 51 - Anomalias da Barragem A

CÓDIGO	LOCALIZAÇÃO DA ANOMALIA	SITUAÇÃO	MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)	
A.1	INFRAESTRUTURA OPERACIONAL	Falta de documentação sobre barragem	M	1	
A.3		Falta de treinamento do pessoal	M	1	
A.4		Precariedade de acesso de veículos	M	1	
A.6		Falta de sistema de comunicação eficiente	M	1	
A.7		Falta ou deficiência de cercas de proteção	M	1	
A.10		Falta de manuais de operação e manutenção dos equipamentos hidromecânicos e elétricos	M	1	
B.1.1	TALUDE DE MONTANTE	Erosões	G	2	
B.1.2		Escorregamentos	G	2	
B.1.3		Rachaduras/afundamento (laje de concreto)	G	2	
B.1.4		Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado	G	2	
B.1.5		Afundamentos e buracos	G	2	
B.1.6		Árvores e arbustos	P	1	
B.1.7		Erosão nos encontros das ombreiras	G	2	
B.1.9		Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	G	1	
B.1.10		Sinais de movimento	G	2	
B.2.1		COROAMENTO	Erosões	M	2
B.2.3	Falta de revestimento		M	2	
B.2.4	Falha no revestimento		M	2	
B.2.5	Afundamentos e buracos		M	2	
B.2.7	Defeitos na drenagem		M	2	
B.2.8	Defeitos no meio-fio		M	1	
B.2.9	Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais		P	1	
B.2.10	Sinais de movimento		M	2	
B.2.11	Desalinhamento do meio-fio		M	2	
B.2.12	Ameaça de transbordamento da barragem		M	2	
B.3.1	TALUDE DE JUSANTE		Erosões	G	2
B.3.2			Escorregamentos	G	2
B.3.4		Falha na proteção granular	G	2	
B.3.5		Falha na proteção vegetal	G	2	
B.3.6		Afundamentos e buracos	G	2	
B.3.7		Árvores e arbustos	G	1	
B.3.8		Erosão nos encontros das ombreiras	G	2	
B.3.9		Cavernas e buracos nas ombreiras	G	2	
B.3.11		Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	G	1	
B.3.12		Sinais de movimento	G	2	
B.3.13		Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas	G	2	

Continuação da Tabela 51 - Anomalias da Barragem A

B.4.2	REGIÃO À JUSANTE DA BARRAGEM	Fuga d'água	G	2
B.4.3		Erosão nas ombreiras	G	2
B.4.4		Cavernas e buracos nas ombreiras	G	2
B.4.5		Árvores/arbusto na faixa de 10m do pé da barragem	G	1
B.5.5	INSTRUMENTAÇÃO	Falta de Instrumentação	M	1
B.5.6		Falta de registro de leituras da instrumentação	P	1
C.1.1	CANAIS DE APROXIMAÇÃO	Árvores e arbustos	M	2
C.1.2		Obstrução ou entulhos	M	2
C.1.4		Erosões ou escorregamentos nos taludes	M	2
C.1.5		Erosão na base dos canais escavados	M	2
C.1.6		Erosão na área a jusante (erosão regressiva)	M	2
C.2.1	ESTRUTURA DE FIXAÇÃO DA SOLEIRA	Rachaduras ou trincas no concreto	M	2
C.2.4		Descalçamento da estrutura	M	2
C.2.6		Sinais de deslocamentos das estruturas	M	2

Tabela 52 - Anomalias da Barragem B

CÓDIGO	LOCALIZAÇÃO DA ANOMALIA	SITUAÇÃO	MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)
A.3	INFRAESTRUTURA OPERACIONAL	Falta de treinamento do pessoal	G	1
A.7		Falta ou deficiência de cercas de proteção	P	1
B.1.7	TALUDE DE MONTANTE	Erosão nos encontros das ombreiras	P	1
B.4.1	REGIÃO À JUSANTE DA BARRAGEM	Construções irregulares próximas ao leito do rio	M	1
B.4.3		Erosão nas ombreiras	P	1
D.1	RESERVATÓRIO	Réguas danificadas ou faltando	P	1
D.2		Construções em áreas de proteção	P	1
D.3		Poluição por esgoto, lixo, entulho, pesticidas etc.	P	1
D.4		Indícios de má qualidade da água	P	1
D.5		Erosões	P	1
D.7		Desmoronamento das margens	P	1
E.1.6	ENTRADA DA TORRE	Defeitos na grade	P	1
E.2.6	ACIONAMENTO DA TORRE	Falta de indicador de abertura	P	1
E.4.6	ESTRUTURA	Deterioração do guarda-corpo no passadiço	P	1

Tabela 53 - Anomalias da Barragem C

CÓDIGO	LOCALIZAÇÃO DA ANOMALIA	SITUAÇÃO	MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)
A.1	INFRAESTRUTURA OPERACIONAL	Falta de documentação sobre barragem	M	1
A.2		Falta de material para manutenção	M	1
A.3		Falta de treinamento do pessoal	M	1
A.6		Falta de sistema de comunicação eficiente	M	1
A.7		Falta ou deficiência de cercas de proteção	M	1
A.10		Falta de manuais de operação e manutenção dos equipamentos hidromecânicos e elétricos	M	1
B.1.1	TALUDE DE MONTANTE	Erosões	M	1
B.1.4		Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado	P	1
B.1.6		Árvores e arbustos	M	1
B.1.9		Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	P	1
B.2.1	COROAMENTO	Erosões	M	1
B.2.3		Falta de revestimento	M	1
B.2.4		Falha no revestimento	M	1
B.2.5		Afundamentos e buracos	M	1
B.2.7		Defeitos na drenagem	M	1
B.2.8		Defeitos no meio-fio	M	1
B.2.12		Ameaça de transbordamento da barragem	G	2
B.3.1	TALUDE DE JUSANTE	Erosões	P	1
B.3.5		Falha na proteção vegetal	M	1
B.3.7		Árvores e arbustos	M	1
B.3.10		Canaletas quebradas ou obstruídas	M	1
B.3.11		Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	P	1
B.3.13		Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas	P	1
B.4.2	REGIÃO À JUSANTE DA BARRAGEM	Fuga d'água	P	1
B.4.5		Árvores e arbustos	P	1
B.5.5	INSTRUMENTAÇÃO	Falta de Instrumentação	M	1
B.5.6		Falta de registro de leituras da instrumentação	P	1
C.1.1	CANALIS DE APROXIMAÇÃO	Árvores e arbustos	M	2
C.1.2		Obstrução ou entulhos	G	2
C.1.4		Erosões ou escorregamentos nos taludes	M	1
C.1.5		Erosão na base dos canais escavados	G	1
C.2.1	ESTRUTURA FIXAÇÃO DA SOLEIRA	Rachaduras ou trincas no concreto	M	1
C.2.2		Ferragem do concreto exposta	M	1
C.3.5	RÁPIDO/ BACIA AMORTECEDORA	Erosões	M	2
C.3.6		Presença de entulhos na bacia	M	1
C.3.7		Presença de vegetação na bacia	M	1
C.3.8		Falha no enrocamento da proteção	M	1

Continuação da Tabela 53 - Anomalias da Barragem C

E.1.4	ENTRADA DA TORRE	Registros defeituosos	M	1
E.2.1	ACIONAMENTO DA TORRE	Hastes (travada no mancal, corrosão e empenamento)	P	0
E.2.2		Base dos mancais (corrosão, falta de chumbadores)	P	0
E.2.4		Corrosão nos mancais	P	0
E.2.5		Falhas nos chumbadores, lubrificação e pintura do pedestal	P	0
E.2.6		Falta de indicador de abertura	P	0
E.2.7		Falta de Volante	P	0
E.4.1	ESTRUTURA DA TORRE	Ferragem exposta da torre	P	1
G.8	GALERIA	Precriedade de acesso	M	1

C- Elencar as anomalias em uma sequencia de menor Magnitude e Nível de Perigo para os maiores índices, inserindo o Modo de Falha

O ordenamento das anomalias referente à Magnitude (M) e ao Nível de Perigo (NP) permite que seja feito, em um primeiro momento, o ordenamento das anomalias potencialmente críticas. Além disso, é possível atribuir Modos de Falha característicos da estrutura com a progressão de cada anomalia, o que facilita o entendimento e o desdobramento dos eventos nas Árvores. Para o estudo apresentado, define-se como críticas as anomalias que apresentam Nível de Perigo igual ou superior a 2 (Alerta ou Emergência, já que requerem uma intervenção reparadora imediata). Os Modos de Falha considerados foram *piping*, galgamento, gestão e problemas estruturais.

A avaliação dos dados, até o momento, não permite uma análise mais diretiva no tratamento da anomalia, em termos da sua progressão e dos eventos a que ela pode estar associada durante vida útil da barragem. Sendo assim, as medidas estabelecidas para um plano de ação podem ser simplistas e não ter a efetividade necessária na mitigação da anomalia. Levando em consideração que o Nível de Perigo 2 requer providências imediatas, tem-se que, no caso da Barragem A, que 35 anomalias deveriam ser contempladas em um plano de ação corretivo mas, sem um entendimento mais aprofundado sobre a prioridade destas correções. Para a Barragem B esse valor é nulo e, para a Barragem C, tem-se 4 anomalias críticas.

Por exemplo, para a Barragem A, tem-se que a erosão nas ombreiras na região à jusante da barragem (Anomalia B.4.3) possui uma grande magnitude e um

nível de perigo 2, de anomalia que compromete a segurança da barragem e que devem ser tomadas providências imediatas. Entretanto, não se sabe até que ponto são erosões superficiais ou profundas, se possuem desenvolvimento progressivo ou, se realmente, tem um potencial de gerar instabilidade local ou global da estrutura. Por essa razão, o plano de ação não é direcionado e não permite uma atuação efetiva no controle da anomalia, no sentido de gerar custos excessivos e não otimizar os prazos operacionais.

Nesse sentido, é essencial estabelecer a Probabilidade da Anomalia (PA) afetar a estabilidade da estrutura que, em termos numéricos, trata-se da combinação do Nível de Perigo (NP) e da Magnitude da Anomalia (M) do Método Baldi, com os valores sendo:

- Magnitude Insignificante (I) com:
 - Nível de Perigo Normal (0) – Probabilidade de 0,10;
 - Nível de Perigo Atenção (1) – Probabilidade de 0,15;
 - Nível de Perigo Alerta (2) – Probabilidade de 0,20; e
 - Nível de Perigo Emergência (4) – Probabilidade de 0,25.
- Magnitude Pequena (P) com:
 - Nível de Perigo Normal (0) – Probabilidade de 0,30;
 - Nível de Perigo Atenção (1) – Probabilidade de 0,40;
 - Nível de Perigo Alerta (2) – Probabilidade de 0,50; e
 - Nível de Perigo Emergência (4) – Probabilidade de 0,55.
- Magnitude Média (M) com:
 - Nível de Perigo Normal (0) – Probabilidade de 0,60;
 - Nível de Perigo Atenção (1) – Probabilidade de 0,65;
 - Nível de Perigo Alerta (2) – Probabilidade de 0,70; e
 - Nível de Perigo Emergência (4) – Probabilidade de 0,75.
- Magnitude Grande (G) com:
 - Nível de Perigo Normal (0) – Probabilidade de 0,80;
 - Nível de Perigo Atenção (1) – Probabilidade de 0,85;
 - Nível de Perigo Alerta (2) – Probabilidade de 0,90; e
 - Nível de Perigo Emergência (4) – Probabilidade de 0,95.

No caso da Barragem A, tem-se na Tabela 54 o ordenamento das anomalias e a indicação dos respectivos Modos de Falha (MF) e Probabilidade da Anomalia (PA), sendo 35 anomalias críticas, em rosa. Para a Barragem B e C tem-se, respectivamente, 0 e 4 anomalias críticas, conforme Tabelas 55 e 56.

Tabela 54 - Anomalias críticas da Barragem A

MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)	CÓDIGO	PROBABILIDADE (PA)	MODO DE FALHA (MF)
P	1	B.1.6	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.2.9	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.5.6	0,40	Galgamento
M	1	A.1	0,65	Problema Estrutural
M	1	A.3	0,65	Gestão
M	1	A.4	0,65	Gestão
M	1	A.6	0,65	Gestão
M	1	A.7	0,65	Gestão
M	1	A.10	0,65	Gestão
M	1	B.2.8	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.5.5	0,65	Galgamento
M	2	B.2.1	0,70	<i>Piping</i>
M	2	B.2.3	0,70	Problema estrutural
M	2	B.2.4	0,70	Problema estrutural
M	2	B.2.5	0,70	Problema estrutural
M	2	B.2.7	0,70	Problema Estrutural
M	2	B.2.10	0,70	Problema Estrutural
M	2	B.2.11	0,70	Problema Estrutural
M	2	B.2.12	0,70	Galgamento
M	2	C.1.1	0,70	Problema Estrutural
M	2	C.1.2	0,70	Galgamento
M	2	C.1.4	0,70	Problema Estrutural
M	2	C.1.5	0,70	Problema Estrutural
M	2	C.1.6	0,70	<i>Piping</i>
M	2	C.2.1	0,70	Problema Estrutural
M	2	C.2.4	0,70	Problema Estrutural
M	2	C.2.6	0,70	Problema Estrutural
G	1	B.1.9	0,85	Problema Estrutural
G	1	B.3.7	0,85	Problema Estrutural
G	1	B.3.11	0,85	Problema Estrutural
G	1	B.4.5	0,85	Problema Estrutural
G	2	B.1.1	0,90	<i>Piping</i>

Continuação da Tabela 54 - Anomalias críticas da Barragem A

G	2	B.1.2	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.1.3	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.1.4	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.1.5	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.1.7	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.1.10	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.3.1	0,90	<i>Piping</i>
G	2	B.3.2	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.3.4	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.3.5	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.3.6	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.3.8	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.3.9	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.3.12	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.3.13	0,90	<i>Piping</i>
G	2	B.4.2	0,90	<i>Piping</i>
G	2	B.4.3	0,90	Problema Estrutural
G	2	B.4.4	0,90	Problema Estrutural

 Anomalias críticas

Tabela 55 - Anomalias críticas da Barragem B

MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)	CÓDIGO	PROBABILIDADE (PA)	MODO DE FALHA (MF)
P	1	A.7	0,40	Gestão
P	1	B.1.7	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.4.3	0,40	Problema Estrutural
P	1	D.1	0,40	Galgamento
P	1	D.2	0,40	Gestão
P	1	D.3	0,40	Gestão
P	1	D.4	0,40	Gestão
P	1	D.5	0,40	Problema Estrutural
P	1	D.7	0,40	Problema Estrutural
P	1	E.1.6	0,40	Problema Estrutural
P	1	E.2.6	0,40	Problema Estrutural
P	1	E.4.6	0,40	Gestão
M	1	B.4.1	0,65	Problema Estrutural
G	1	A.3	0,85	Gestão

Tabela 56 - Anomalias críticas da Barragem C

MAGNITUDE (M)	NÍVEL DE PERIGO (NP)	CÓDIGO	PROBABILIDADE (PA)	MODO DE FALHA (MF)
P	0	E.2.1	0,30	Problema Estrutural
P	0	E.2.2	0,30	Problema Estrutural
P	0	E.2.4	0,30	Problema Estrutural
P	0	E.2.5	0,30	Problema Estrutural
P	0	E.2.6	0,30	Problema Estrutural
P	0	E.2.7	0,30	Problema Estrutural
P	1	B.1.4	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.1.9	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.3.1	0,40	Piping
P	1	B.3.11	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.3.13	0,40	<i>Piping</i>
P	1	B.4.2	0,40	<i>Piping</i>
P	1	B.4.5	0,40	Problema Estrutural
P	1	B.5.6	0,40	Galgamento
P	1	E.4.1	0,40	Problema Estrutural
M	1	A.1	0,65	Problema Estrutural
M	1	A.2	0,65	Gestão
M	1	A.3	0,65	Gestão
M	1	A.6	0,65	Gestão
M	1	A.7	0,65	Gestão
M	1	A.10	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.1.1	0,65	<i>Piping</i>
M	1	B.1.6	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.2.1	0,65	<i>Piping</i>
M	1	B.2.3	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.2.4	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.2.5	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.2.7	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.2.8	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.3.5	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.3.7	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.3.10	0,65	Problema Estrutural
M	1	B.5.5	0,65	Galgamento
M	1	C.1.4	0,65	Problema Estrutural
M	1	C.2.1	0,65	Problema Estrutural
M	1	C.2.2	0,65	Problema Estrutural
M	1	C.3.6	0,65	Problema Estrutural
M	1	C.3.7	0,65	Problema Estrutural
M	1	C.3.8	0,65	Problema Estrutural

Continuação da Tabela 56 - Anomalias críticas da Barragem C

M	1	E.1.4	0,65	Problema Estrutural
M	1	G.8	0,65	Gestão
M	2	C.1.1	0,70	Problema Estrutural
M	2	C.3.5	0,70	Problema Estrutural
G	1	C.1.5	0,85	Problema Estrutural
G	2	B.2.12	0,90	Galgamento
G	2	C.1.2	0,90	Galgamento

 Anomalias críticas

D- Desenho das árvores de eventos, considerando a Probabilidade da Anomalia comprometer a estabilidade da estrutura

Cada anomalia deve ser desdobrada em uma sequência de eventos, com o cálculo de probabilidades para cada cenário, ou seja, a Probabilidade da Inspeção (PI), conforme a metodologia descrita no Capítulo 6.1. Os percentuais atribuídos a cada evento são provenientes das observações das Fichas de Inspeção e da avaliação do relatório fotográfico. A Probabilidade da Inspeção (PI) do Evento 1 é o produto da Probabilidade da Anomalia (PA) pelo percentual probabilístico atribuído ao Evento 1 e, no desdobramento da árvore, cada Probabilidade de Inspeção (PI) é produto da probabilidade de cada evento pela probabilidade do evento anterior. Vale ressaltar que os eventos são complementares, ou seja, a soma dos ramos de cada “nó” deve ser 100%. Como o objetivo da Análise de Risco é que seja usada como pré-requisito para uma Análise de Falha, é essencial que o Evento Final da árvore considere processos de instabilidade local e global.

O Risco Probabilístico (RP) é o produto da Probabilidade da Anomalia (PA) pelas probabilidades da Inspeção (PI) para cada evento, ou seja, é a probabilidade em cada ramo da árvore. No Apêndice B tem-se as árvores correspondentes as anomalias de cada barragem.

Para o caso da anomalia B.4.3 da Barragem A foram considerados 20 cenários de Risco Probabilístico, ou seja, a anomalia que teria um suposto plano de ação baseado em um único item foi desdobrada para 20 possíveis cenários de instabilidade. Ao todo, a Barragem A apresenta 749 cenários avaliados, sendo 150 para a Barragem B e 634 para a Barragem C.

E- Ordenamento do Risco Probabilístico (RP) das anomalias

O ordenamento do Risco Probabilístico (RP) é feito, preliminarmente para cada anomalia, acompanhado do Descritivo Probabilístico do Risco (DPR). Dessa forma, é possível verificar quais os eventos associados a cada anomalia são mais próximos de uma instabilidade local ou global, direcionando o plano corretivo da anomalia.

No caso da anomalia B.4.3 da Barragem A tem-se que as erosões superficiais são mais frequentes que as erosões profundas e, os sulcos erosivos isolados possuem um potencial de desenvolver as erosões progressivamente. Como não foi identificada a presença de água nas erosões, os processos instabilizantes com presença de água foram, automaticamente, direcionados para o fim da listagem de priorização para instabilidade local e global.

No Apêndice C tem-se o ordenamento do RP e o Descritivo Probabilístico da Anomalia (DPR) para cada barragem.

Após a descrição de todas as anomalias, os RP's são agrupados em uma listagem única e, desta forma, tem-se o cenário geral da estrutura em termos das anomalias identificadas durante a visita de campo.

F- Definição das zonas de Risco Aceitáveis, Toleráveis e Inaceitáveis

Para o Método Baldi, define-se que os Riscos Probabilísticos (RP) iguais ou maiores do que 20% representam um grande potencial de falha e devem ser considerados em uma análise mais pormenorizada, como Riscos Inaceitáveis. Os Riscos Toleráveis são aqueles na faixa entre $10 \leq RP < 20$ e os Riscos Aceitáveis aqueles de valor menor que 10%.

A classificação dos riscos de cada barragem é apresentada no Apêndice D.

Para a Barragem A, tem-se 45 eventos inaceitáveis, ou seja, eventos associados a uma provável falha da estrutura. Para a Barragem B o quantitativo é de 4 e para a Barragem C, 17 eventos. Estes eventos são direcionados para uma análise mais completa, através da Análise de Falhas do Modo FMEA.

G- Ordenamento dos Riscos Probabilísticos (RP) Inaceitáveis

A Barragem A apresenta 50 anomalias, das quais 35 seriam previamente tratadas como prioridade, mas de forma simplificada e sem ordenamento prioritário das ações. O desdobramento das anomalias em cenários de risco, com o devido cálculo de probabilidade da anomalia desencadear uma situação de instabilidade, retorna 45 cenários que precisam ser melhor avaliados. Somente com a Análise de Risco implantada no sistema de Gestão de Segurança de Barragens, tem-se um ganho no detalhamento dos caminhos críticos, além do estabelecimento o ordenamento prioritário das ações para os Riscos Inaceitáveis, conforme Tabela 57.

Tabela 57 - Ordenamento prioritários dos Riscos Inaceitáveis da Barragem A

CÓDIGO	ANOMALIA	DESCRIPTIVO PROBABILÍSTICO DA ANOMALIA (DPR)	PERCENTUAL
B.3.6	Talude Jusante	Não há erosões superficiais devido a afundamentos e buracos no talude jusante	72,00%
A.4	Infra Operacional	Ausência de cercas de proteção em local com fluxo constante de pessoas e veículos, sem acesso para locais públicos	52,65
B.1.7	Talude Montante	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos isolados superficiais, ou na proteção	46,66%
A.3	Infra Operacional	Realiza inspeções regulares, com equipe sem treinamento adequado para emergência	40,95%
C.1.1	Canal Aproximação	Árvores e arbustos de pequeno porte no canal de aproximação, em quantidade significativa, mas sem sinais de inclinação	39,00%
B.3.1	Talude Jusante	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de jusante, sem presença de água, em sulcos erosivos isolados em profundidade	34,99%
B.3.8	Talude Jusante	Desenvolvimento progressivo de erosões em profundidade na saída do vertedouro (OD) com o talude de jusante, com sulcos erosivos isolados, sem presença de água	34,99%
B.4.3	Área Jusante	Desenvolvimento progressivo de erosões superficiais na região à jusante, na ombreira direita, sem presença de água, em sulcos erosivo isolados	34,99%
B.3.5	Talude Jusante	Falhas na proteção vegetal de grandes dimensões no talude de jusante, com caminhos de percolação sem acúmulo de água	34,56%
B.3.13	Talude Jusante	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de Jusante, com desenvolvimento progressivo de erosões significativas no pé do talude em sulcos erosivos múltiplos, com presença de água, mas sem acarretamento de sedimentos	32,66%
B.3.4	Talude Jusante	Falhas de grande magnitude na proteção granular do Talude de Jusante, sem surgimento de processos erosivos	32,40%
B.3.9	Talude Jusante	Formação de buracos erosivos progressivos na saída do vertedouro (OD) com o talude de jusante, com sulcos erosivos isolados, sem perda de massa	31,10%

Continuação da Tabela 57 - Ordenamento prioritários dos Riscos Inaceitáveis da Barragem A

B.4.4	Área Jusante	Desenvolvimento progressivo de cavernas e buracos nas ombreiras da região à Jusante, com erosões na saída do vertedouro, em sulcos erosivos isolados, sem perda de massa	31,10%
B.4.5	Área Jusante	Árvores e arbustos de grande porte na região de jusante, em quantidade significativa, mas sem sinais de inclinação	30,60%
B.2.12	Coroamento	Ameaça de transbordo pelo coroamento, com vertedouro em desacordo com o projeto mais de 50%, com FS aceitável	28,35%
B.4.2	Área Jusante	Fuga d'água na região à Jusante, com pequenas erosões superficiais no pé do talude em sulcos erosivos isolados, com desenvolvimento progressivo, com presença de água, sem carreamento de sedimentos	27,99%
B.1.4	Talude Montante	Sem desenvolvimento de erosões superficiais no rip-rap do talude de montante	27,00%
B.2.3	Coroamento	Falhas de pequenas dimensões no revestimento do coroamento com formação de caminhos de percolação, sem acúmulo de água	26,88%
B.2.4	Coroamento	Falhas de pequenas dimensões no revestimento do coroamento com formação de caminhos de percolação sem acúmulo de água	26,88%
C.2.4	Fixação Soleira	Estrutura de fixação da soleira com falhas de grandes dimensões de descalçamento da estrutura do vertedouro, com formação de caminhos de percolação, sem acúmulo de água	26,88%
B.5.5	Instrumentação	Borda livre de acordo com o estabelecido em projeto, em mais de 50%, com FS aceitável	26,33%
A.1	Infra Operacional	Estabilidade comprometida mesmo com documentação de Plano de Segurança de Barragens	26,00%
C.1.1	Canal Aproximação	Árvores e arbustos de pequeno porte no canal de aproximação, em quantidade insignificante, sem sinais de inclinação	26,00%
B.2.12	Coroamento	Ameaça de transbordo pelo coroamento, com vertedouro em desacordo com o projeto mais de 50%, com análise de estabilidade com FS não aceitável e sistema alternativo para escoamento	25,52%
B.1.3	Talude Montante	Rachaduras na parede de concreto do Talude de Montante, com erosões superficiais, sulcos erosivos múltiplos, desenvolvimento progressivo de erosões e com perda de massa significativa, sem instabilidade local	25,40%
B.3.12	Talude Jusante	Sinais de movimento sem profundidade no talude jusante, com desenvolvimento progressivo e sem formação de cunhas	25,20%
B.1.4	Talude Montante	Desenvolvimento progressivo de erosões superficiais no rip-rap do talude de montante, sem perda de massa, em sulcos erosivos isolados	24,19%
B.5.5	Instrumentação	Borda livre de acordo com o estabelecido em projeto, em mais de 50%, com FS não aceitável, com sistema alternativo para escoamento	23,69%
A.7	Infra Operacional	Ausência de cercas de proteção em local com fluxo constante de pessoas e veículos, sem acesso para locais públicos	23,40%
C.1.1	Canal Aproximação	Árvores e arbustos de pequeno porte no canal de aproximação, em quantidade significativa, com sinais de inclinação, mas sem desprendimento	23,40%
B.3.1	Talude Jusante	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de jusante, sem presença de água, em sulcos erosivos múltiplos em profundidade	23,33%
B.3.8	Talude Jusante	Desenvolvimento progressivo de erosões em profundidade na saída do vertedouro (OD) com o talude de jusante, com sulcos erosivos múltiplos, sem presença de água	23,33%
B.4.3	Área Jusante	Desenvolvimento progressivo de erosões superficiais na região à jusante, na ombreira direita, sem presença de água, em sulcos erosivo múltiplos	23,33%

Continuação da Tabela 57 - Ordenamento prioritários dos Riscos Inaceitáveis da Barragem A

B.1.9	Talude Montante	Presença de ninhos de formigas e cupins, construções e tocas de pequeno porte no talude de montante, rasa e em grande extensão	23,32%
B.3.5	Talude Jusante	Falhas na proteção vegetal de grandes dimensões no talude de jusante, sem caminhos de percolação sem acúmulo de água	23,04%
A.6	Infra Operacional	Estabilidade global da estrutura comprometida por não realizar simulados e sem sequenciamento de atribuições e responsabilidades, em decorrência de não se ter fluxograma de comunicação	22,11%
A.10	Infra Operacional	Estabilidade global da estrutura comprometida por não realizar tratamento de dados, sem procedimento isolados de operação e sem Manuais dos sistemas operacionais	22,11%
B.1.5	Talude Montante	Afundamentos e buracos no talude montante, com movimentos superficiais em desenvolvimento progressivo, com formação de cunhas de ruptura, sem instabilidade local	22,5%
B.2.8	Coroamento	Defeitos no meio-fio do coroamento, com falhas de grandes dimensões e formação de caminho de percolação, mas sem o acúmulo de água	21,84%
B.1.10	Talude Montante	Sinais de movimentação em superfície no talude de montante, com desenvolvimento progressivo sem formação de cunhas	21,60%
B.3.2	Talude Jusante	Escorregamentos no talude jusante, com movimentos em profundidade em desenvolvimento progressivo, sem formação de cunhas	21,60%
C.2.1	Fixação Soleira	Existência de rachaduras profundas na estrutura de fixação da soleira, com desenvolvimento progressivo de trincas isoladas, sem perda de massa	21,50%
B.1.1	Talude Montante	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos isolados superficiais, ou na proteção	20,74%
B.3.9	Talude Jusante	Formação de buracos erosivos progressivos na saída do vertedouro (OD) com o talude de jusante, com sulcos erosivos isolados, sem perda de massa	20,74%
B.4.4	Área Jusante	Desenvolvimento progressivo de cavernas e buracos nas ombreiras da região à Jusante, com erosões na saída do vertedouro, em sulcos erosivos múltiplos, sem perda de massa	20,74%

Para a Barragem B tem-se 14 anomalias, sendo que nenhuma seria tratada como prioridade pelo fato de não retornar Nível de Perigo 2. O desdobramento das anomalias em cenários de risco, com o devido cálculo de probabilidade da anomalia desencadear uma situação de instabilidade, retorna 6 cenários que precisam ser melhor avaliados. Somente com a Análise de Risco implantada no sistema de Gestão de Segurança de Barragens, tem-se um ganho no detalhamento dos caminhos críticos, além do estabelecimento do ordenamento prioritário das ações para os Riscos Inaceitáveis, conforme Tabela 58.

Tabela 58 - Ordenamento prioritários dos Riscos Inaceitáveis da Barragem B

CÓDIGO	ANOMALIA	DESCRIPTIVO PROBABILÍSTICO DA ANOMALIA (DPR)	PERCENTUAL
B.4.1	Área Jusante	Construções irregulares na região a jusante, sem obstruções de fluxo	58,50%
A.3	Infra Operacional	Estabilidade global da estrutura comprometida pela ineficiência de inspeções e tratamento de leituras em função da equipe não possuir treinamento adequado de emergência	28,92%
D.4	Reservatório	Indícios de má qualidade da água do reservatório, sem uso recreativo	24,00%
A.3	Infra Operacional	Realiza inspeções regulares, com equipe sem treinamento adequado para emergência	22,95%
A.3	Infra Operacional	Ineficiência de inspeções em função da equipe não possuir treinamento adequado de emergência, com acompanhamento de dados de instrumentação	21,42%
B.1.7	Talude de Montante	Desenvolvimento progressivo de erosões no talude de montante, sem presença de água, em sulcos erosivos isolados em profundidade, ou na proteção	20,74%

Para a Barragem C tem-se 46 anomalias, das quais 4 seriam previamente tratadas como prioridade, mas de forma simplificada e sem ordenamento prioritário das ações. O desdobramento das anomalias em cenários de risco, com o devido cálculo de probabilidade da anomalia desencadear uma situação de instabilidade, retorna 17 cenários que precisam ser melhor avaliados. Somente com a Análise de Risco implantada no sistema de Gestão de Segurança de Barragens, tem-se um ganho no detalhamento dos caminhos críticos, além do estabelecimento o ordenamento prioritário das ações para os Riscos Inaceitáveis, conforme Tabela 59.

Tabela 59 - Ordenamento prioritários dos Riscos Inaceitáveis da Barragem C

CÓDIGO	ANOMALIA	DESCRIPTIVO PROBABILÍSTICO DA ANOMALIA (DPR)	PERCENTUAL
E.1.4	Entrada da Torre	Registros defeituosos na entrada da torre da tomada da água, mas as manobras não são comprometidas	52,00%
A.3	Infra Operacional	Realiza inspeções regulares, com equipe sem treinamento adequado para emergência	40,95%
B.2.12	Coroamento	Ameaça de transbordo pelo coroamento, com borda livre em desacordo com o projeto mais de 50%, com FS aceitável	36,45%

Continuação da Tabela 59 - Ordenamento prioritários dos Riscos Inaceitáveis da Barragem C

A.2	Infra Operacional	Sem equipamentos para manutenção básica, mas com acesso aos mesmos em unidades próximas	35,10%
C.1.1	Canal Aproximação	Árvores e arbustos no canal de aproximação do vertedouro, de pequeno porte, em quantidade significativa, sem sinais de inclinação	33,00%
B.2.12	Coroamento	Ameaça de transbordo pelo coroamento, com borda livre em desacordo com o projeto mais de 50%, com análise de estabilidade com FS não aceitável, com sistema alternativo para escoamento	32,81%
A.1	Infra Operacional	Estabilidade comprometida pela falta de documentação de projeto Executivo e/ou As built, com realização de inspeções regulares	31,20%
C.1.4	Canal Aproximação	Erosões ou escorregamentos nos taludes do canal de aproximação do vertedouro, com desenvolvimento progressivo de movimentos superficiais, com formação de cunhas mas com instabilidade local	29,95%
B.3.7	Talude Jusante	Árvores e arbustos de pequeno porte no talude jusante, em quantidade significativa e sem sinal de inclinação	28,08%
B.1.4	Talude Montante	Erosões superficiais no rip-rap do talude de montante com sulcos erosivos isolados	25,92%
C.3.7	Bacia Amortecedora	Vegetação de pequeno porte na bacia do vertedouro, em quantitativo significativo, sem sinais de inclinação	25,50%
A.10	Infra Operacional	Estabilidade global da estrutura comprometida por não realizar tratamento de dados, sem procedimento isolados de operação e sem Manuais dos sistemas operacionais	25,27%
A.7	Infra Operacional	Ausência de cercas de proteção em local com fluxo constante de pessoas e veículos, principalmente na região do vertedouro, sem sistema de monitoramento, gerando Instabilidade global	22,74%
A.6	Infra Operacional	Estabilidade global da estrutura comprometida por não realizar simulados e sem sequenciamento de atribuições e responsabilidades, em decorrência de não se ter fluxograma de comunicação	22,11%
C.1.1	Canal Aproximação	Árvores e arbustos no canal de aproximação do vertedouro, de pequeno porte, em quantidade insignificante, sem sinais de inclinação	22,00%
B.2.3	Coroamento	Falhas de pequenas dimensões no revestimento do coroamento com formação de caminhos de percolação, sem acúmulo de água	21,06%
B.2.4	Coroamento	Falhas de pequenas dimensões no revestimento do coroamento com formação de caminhos de percolação sem acúmulo de água	21,06%

H- Análise de Falha

Os Riscos Inaceitáveis foram direcionados para as Análises de Falha e tem-se nas Figura 55 a 57 as Matrizes FMEA das Barragens A, B e C.

A Análise de Falha considera os Riscos Inaceitáveis provenientes da Análise de Risco, descritos em termos da função, modo de falha, efeito final, causa, controle e tipo de controle, conforme definido no capítulo 6.2. O cálculo do RPN considera o

sistema numérico estabelecido nesse mesmo item para Severidade, Ocorrência e Controle.

No Apêndice E tem-se a análise FMEA de cada barragem, bem como a matriz classificatória dos eventos. Nesta análise, as Falhas Brandas são os contemplados nas porções em verde da matriz, sendo as Intermediárias na região em azul e as Severas nas porções em laranja e vermelho.

Para a Barragem A, dos 45 Riscos Probabilísticos relacionados como Inaceitáveis, 33 provocam Falhas Intermediárias, devendo ser priorizados em um plano de ação em relação aos 12 relacionados a Falhas Brandas. As 3 Falhas Severas são associadas as estruturas avaliadas como um todo, sendo Infraestrutura Operacional, Barragem e Vertedouro, o que indica que são estruturas potencialmente causadoras de anomalias mais representativas.

Para a Barragem B, dos 6 Riscos Probabilísticos relacionados como Inaceitáveis, nenhum provoca Falha Severa, sendo 4 Falhas Intermediárias que devem ser priorizadas em um plano de ação em relação aos 2 relacionados à Falhas Brandas. As 3 Falhas Severas são associadas as estruturas avaliadas como um todo, sendo Infraestrutura Operacional, Barragem e Reservatório, o que indica que são estruturas potencialmente causadoras de anomalias mais representativas.

Para a Barragem C, dos 17 Riscos Probabilísticos relacionados como Inaceitáveis, 14 provocam Falhas Intermediárias, devendo ser priorizados em um plano de ação em relação aos 3 relacionados a Falhas Brandas. Há 4 Falhas Severas associadas às estruturas avaliadas como um todo, sendo Infraestrutura Operacional, Barragem, Vertedouro e Estrutura da Torre, o que indica que são estruturas potencialmente causadoras de anomalias mais representativas.

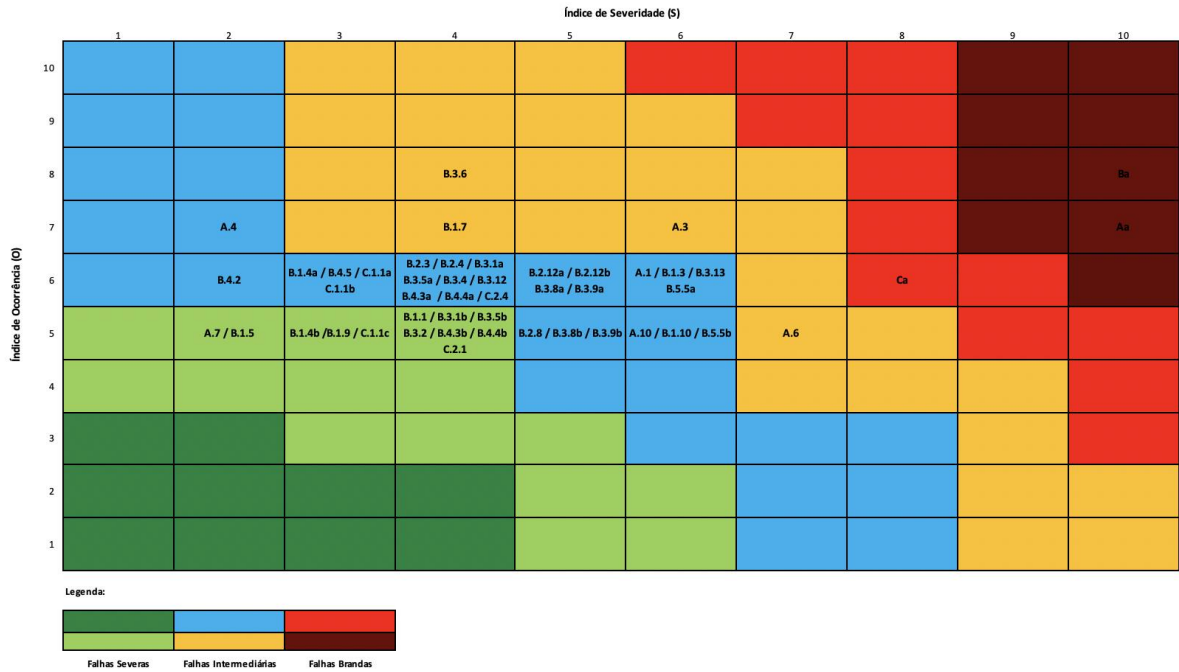


Figura 55 - Matriz FMEA da Barragem A. Fonte: Elaborado pela autora

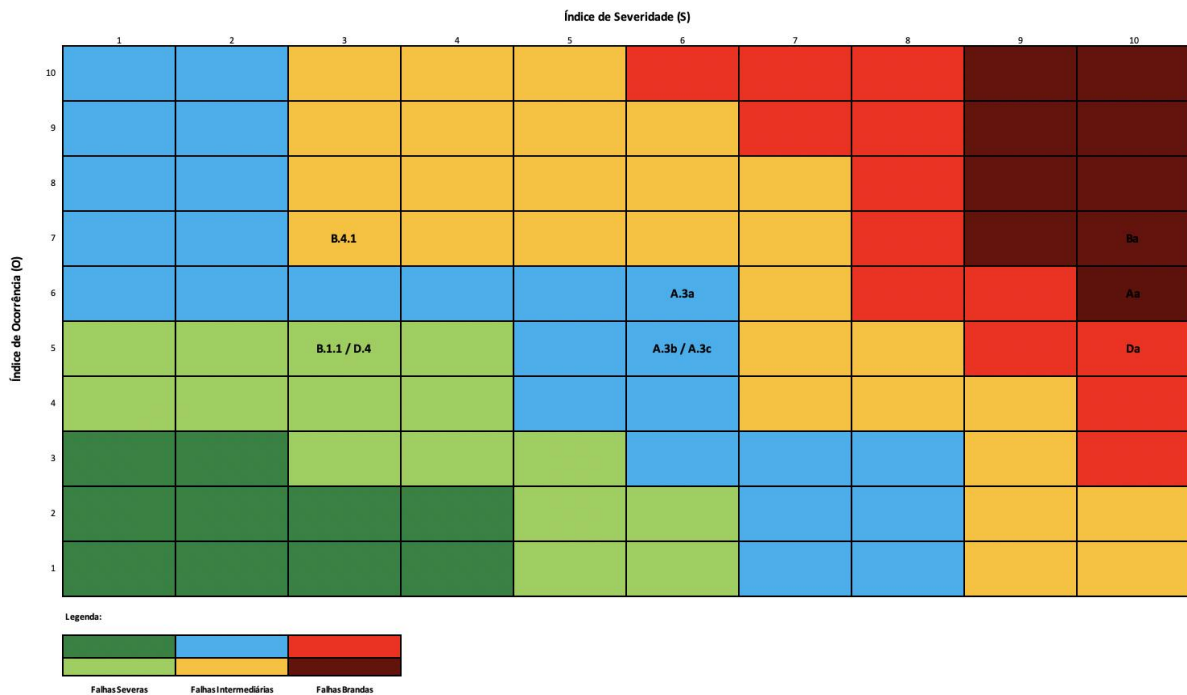


Figura 56 - Matriz FMEA da Barragem B. Fonte: Elaborado pela autora

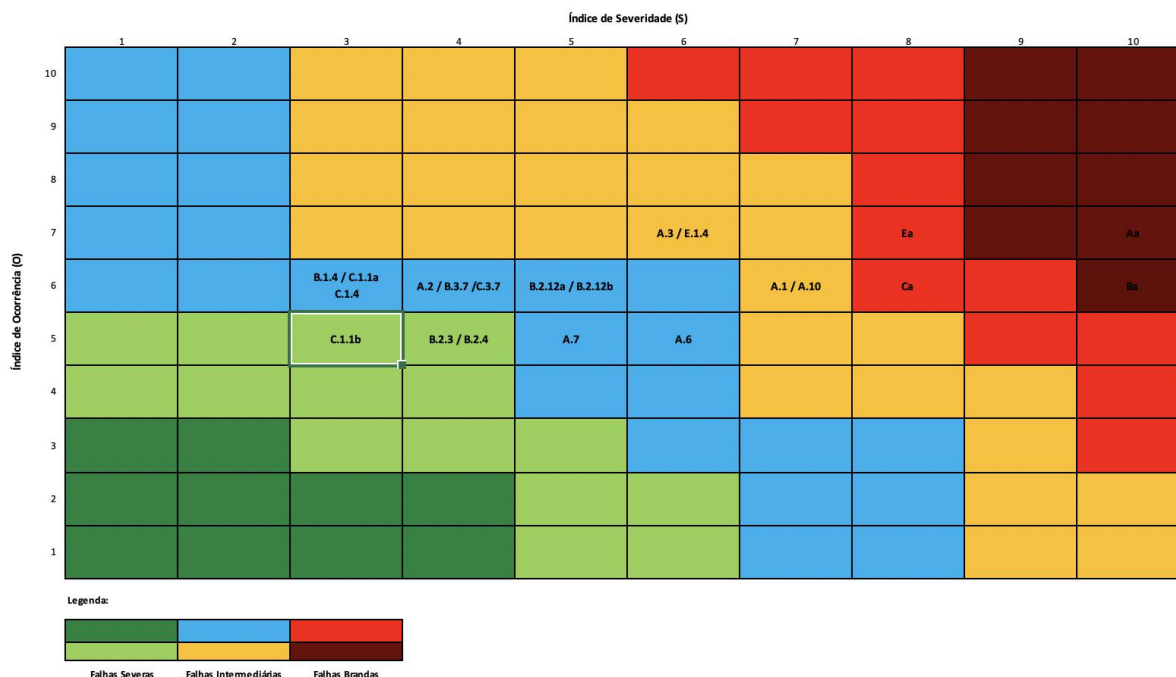


Figura 57 - Matriz FMEA da Barragem C. Fonte: Elaborado pela autora

O ordenamento numérico das falhas em função do valor do RPN das anomalias avaliadas com elevada probabilidade gerar falhas, sendo riscos inaceitáveis, permite que os planos de ação para correção das anomalias sejam muito mais práticos e efetivos. Sendo assim, RPN nas faixas de Falhas Severas devem ter um plano prioritário para redução dos riscos, que pode ser ampliado à medida em que se caminha para as zonas de Falhas Brandas.

Considerando que a legislação brasileira atribui uma periodicidade quinzenal para as inspeções regulares de barragens, tem-se a cada 15 dias a possibilidade de ampliar as análises e verificar a eficiência do sistema de gestão tendo em vista que é esperado que o quantitativo de anomalias inaceitáveis diminuam ao longo da gestão. A manutenção do banco de dados das análises é fundamental para alimentar as análises de risco e falha de uma estrutura, durante toda sua vida útil operacional e, até mesmo, pós descomissionamento.

Na Tabela 60 tem-se um compilado dos dados provenientes das análises das três barragens. Ressalta-se que para as Análises de Falha, obrigatoriamente, deve-se realizar uma análise para a estrutura que apresenta a anomalia, de uma forma geral e, pelo fato de que a ruptura da barragem, vertedouro, reservatório, ou demais

estruturas, possuem severidade ampliada, estes itens acabam retornando uma Falha Severa neste tipo de metodologia.

Tabela 60 - Resumo das análises realizadas

	Barragem A		Barragem B		Barragem C	
Anomalias	NP=0	0	NP=0	0	NP=0	6
	NP=1	15	NP=1	14	NP=1	36
	NP=2	35	NP=2	0	NP=2	4
	NP=3	0	NP=3	0	NP=3	0
	Total	50	Total	14	Total	46
Riscos Probabilísticos (RP)	749		150		634	
	Inaceitáveis	45	Inaceitáveis	6	Inaceitáveis	17
	Toleráveis	76	Toleráveis	11	Toleráveis	64
	Aceitáveis	628	Aceitáveis	133	Aceitáveis	553
Análise de Falha dos RP's Inaceitáveis	45		6		17	
	Severas	0	Severas	0	Severas	0
	Intermediárias	33	Intermediárias	4	Intermediárias	14
	Brandas	12	Brandas	2	Brandas	3
Análise de Falha Geral da estrutura onde encontra-se a anomalia	Severas	3	Severas	3	Severas	4
	Intermediárias	0	Intermediárias	0	Intermediárias	0
	Brandas	0	Brandas	0	Brandas	0

A aplicação individual do Método Baldi não é garantia para estabilidade das estruturas, sendo uma ferramenta adicional a ser utilizada em conjunto com as inspeções visuais, leituras de instrumentação, análises de estabilidade, percolação e deformação, bem como a diretrizes estabelecidas nos Manuais e Operação e Carta de Risco. A aplicação do método é uma diretriz teórico-prática para o ordenamento do plano de ação, conduzindo à tomada de decisões para um ordenamento prioritário aos Riscos Inaceitáveis, principalmente aqueles que induzem Falhas Severas.

I- Plano de Ação

O desenvolvimento de um plano de ação deve ser coordenado com base nas diretrizes internas de cada empresa para inspeção, manutenção e gestão de risco e falhas. Entretanto, ao estabelecer o ordenamento dos riscos e das falhas, é possível direcionar estas ações, reduzindo o tempo de intervenção e ampliando a garantia de estabilidade das estruturas. A seguir, tem-se um exemplo de plano de ação para a Barragem C.

O preenchimento da Ficha de Inspeção baseado no Método Baldi, retorna para a Barragem C um total de 4 anomalias críticas, listadas seguir. Nesta primeira análise, identifica-se que é necessário uma intervenção imediata no coroamento da barragem para reduzir a ameaça de transbordamento, além de avaliar árvores, arbustos e entulhos no canal de aproximação, e verificar as erosões no rápido/bacia amortecedora. Apesar do levantamento destas anomalias críticas ($NP \geq 2$), não há uma definição de qual anomalia pode representar uma falha mais severa ou, ainda, qual o plano de ação para o desdobramento destas anomalias e o cenário a que elas estão relacionadas.

- Anomalias críticas
 - B.2.12 – Coroamento – Ameaça de transbordamento da barragem (G, NP=2)
 - C.1.2 – Canal de aproximação – Obstruções ou entulhos (G, NP=2)
 - C.1.1 – Canal de aproximação – Árvores e arbustos (M, NP=2)
 - C.3.5 – Rápido/Bacia amortecedora – Erosões (M, NP=2)

As árvores de eventos do Método Baldi permitem identificar os riscos de cada anomalia, bem como o cenário a que elas estão relacionadas em termos de instabilidade e, desta forma, conduzir os riscos inaceitáveis ($RP \geq 20$) para a análise de falha. O desdobramento das anomalias da Barragem C em sequência de eventos, para identificação da probabilidade de gerar instabilidade na estrutura, retorna 17 Riscos Inaceitáveis ($RP \geq 20\%$), 64 Riscos Toleráveis ($10 \leq RP < 20$) e 553 Riscos Aceitáveis ($RP < 10\%$).

Dessa forma, com base no número do potencial de risco (RPN) para os Riscos Inaceitáveis e, de acordo com o zoneamento das falhas na matriz FMEA,

ordena-se o plano de ação considerando, à princípio, as falhas mais severas, seguidas das intermediárias e das brandas. Para a Barragem C, tem-se:

- Risco Inaceitável - Falhas Intermediárias
 - E.1.4 – Entrada da torre – registros defeituosos na entrada da torre da tomada d'água, que não comprometem a manobra (RPN=210)
 - A.3 – Infraestrutura operacional – Falta de treinamento do pessoal para situações de emergência, principalmente, nas inspeções regulares (RPN=126)
 - A.1 – Infraestrutura operacional – Falta de documentação de projeto “*as built*”, mas com realização de inspeções regulares (RPN=126)
 - A.10 – Infraestrutura operacional – Falta de manuais de operação e manutenção dos equipamentos. Não é realizado tratamento de dados das inspeções e instrumentação, comprometendo a estabilidade global (RPN=126)
 - A.6 – Infraestrutura operacional – Falta de sistema de comunicação eficiente, sem a realização de simulados de emergência e sequenciamento das atribuições e responsabilidades em fluxogramas de comunicação (RPN=90)
 - A.7 – Infraestrutura operacional – Falta ou deficiência de cercas de proteção em locais com fluxo constante de pessoas ou veículos, principalmente na região do vertedouro, sem sistema de monitoramento na área (RPN=75)
 - A.2 – Infraestrutura operacional – Falta de material para manutenção básica na unidade, mas com acesso aos equipamentos de uma unidade próxima (RPN=72)
 - C.3.7 – Rápido/Bacia amortecedora – Presença de vegetação de pequeno porte na bacia do vertedouro, em quantidade significativa e sem sinais de inclinação (RPN=72)
 - B.3.7 – Talude de jusante – Árvores e arbustos de pequeno porte no talude de jusante, em quantidade significativa e sem sinal de inclinação (RPN=48)
 - B.2.12a – Coroamento – Ameaça de coroamento da barragem, com borda livre em desacordo com o projeto em mais de 50%, mas ainda com FS aceitável (RPN=30)

- B.2.12b – Coroamento – Ameaça de coroamento da barragem, com borda livre em desacordo com o projeto em mais de 50%, mas com FS não aceitável (RPN=30)
- B.1.4 – Talude de Montante – Rip-rap incompleto com erosões superficiais e sulcos erosivos isolados (RPN=18)
- C.1.1a – Canal de Aproximação – Árvores e arbustos de pequeno porte no canal de aproximação do vertedouro, em quantidade significativa, mas sem sinais de inclinação (RPN=54)
- C.1.4 – Canal de Aproximação – Erosões ou escorregamentos nos taludes do canal de aproximação, com desenvolvimento progressivo de movimentos superficiais, formando cunhas de ruptura e gerando instabilidade local (RPN=54)
- Risco Inaceitável - Falhas Brandas
 - B.2.3 – Coroamento – Falta de revestimento superficial, gerando falhas de pequena dimensão com formação de caminhos de percolação mas sem acúmulo de água (RPN=60)
 - B.2.4 – Coroamento – Falha no revestimento de pequena dimensão com formação de caminhos de percolação mas sem acúmulo de água (RPN=60)
 - C.1.1b – Canal de Aproximação – Árvores e arbustos de pequeno porte no canal de aproximação do vertedouro, em quantidade insignificante, mas sem sinais de inclinação (RPN=45)

Para as falhas intermediárias deve-se atribuir prazos menores de atuação em relação as falhas brandas e, nesse caso, tem-se:

- Prazo imediato
 - Recuperar os registros na entrada da torre da tomada d'água
 - Realizar treinamento de inspeções e segurança de barragens
 - Providenciar relatório "*As Built*"
 - Providenciar Manuais de Operação e Carta de Risco, além de iniciar o tratamento de dados das inspeções e leituras da instrumentação
 - Realizar simulados de emergência

- Implantar cercas de proteção, principalmente na região do vertedouro
 - Adquirir material de manutenção básica
 - Remover vegetação na bacia do vertedouro e no talude de jusante
 - Avaliar a condição de projeto para a borda livre, junto com análises de estabilidade
 - Revitalizar a proteção em rip-rap no talude de montante
 - Avaliar as erosões nos taludes do canal de aproximação
- Prazo postergado em 1 semana, 10 dias, ou mais
 - Providenciar proteção superficial no coroamento
 - Remover vegetação no canal de aproximação do vertedouro

A análise de falha também retorna números potenciais de risco para as estruturas que apresentam as anomalias com riscos inaceitáveis e, nesse caso, indicam quais os locais que possuem maior probabilidade de falhas. Nesse caso da Barragem C, tem-se:

- Falhas Severas
 - Aa – Infraestrutura operacional, de uma forma geral (RPN=210)
 - Ba – Barragem, de uma forma geral (RPN=180)
 - Ea – Estrutura da torre, de uma forma geral (RPN=168)
 - Ca – Vertedouro, de uma forma geral (RPN=144)

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora a compreensão do comportamento de barragens tenha melhorado ao longo dos anos, as barragens continuam apresentando falhas. Aparentemente, os profissionais estão cada vez mais capacitados e as tecnologias mais inovadoras, entretanto, ainda nos deparamos com rupturas de grande magnitude, com um grande número de vítimas e impactos ambientais. Deve-se enfatizar, também, que grande parte das falhas pode ocorrer sem atingir domínio público uma vez que somente os casos mais graves são divulgados, em grande parte, pela mídia.

Considerando o custo dessas falhas para os proprietários, além de todos os agravantes sociais e ambientais, é de se esperar que as barragens sejam tratadas em nível estratégico, principalmente em atenção aos mecanismos que desencadeiam uma provável falha. Ter profissionais acompanhando a performance da estrutura, apoiados por dados consistentes de instrumentação e inspeção é o requisito mínimo que se pode exigir. As seguradoras estão cada vez mais exigindo tal controle, com o incentivo de prêmios mais baixos para os proprietários de barragens que estabelecem uma abordagem de segurança satisfatória.

De fato, pode-se concluir que a maioria das falhas é devido ao gerenciamento inadequado. A Geotecnia é uma ciência da Engenharia, de natureza exata, mas que lida com materiais construtivos que na maioria das vezes são extremamente diversificados. Solos e rochas possuem formações naturais, sendo assim, como garantir que uma faixa desse material pode apresentar as mesmas características para todas as unidades? Os estudos de investigação geológico-geotécnica fornecem informações suficientes para um determinado projeto, mas ainda possuem variáveis ocultas, ou estimadas. É por isso que, durante a construção, os parâmetros adotados devem ser checados e, durante a operação, ainda mais verificados em relação à alteração diante dos ciclos de carregamento e descarregamento das solicitações impostas. Nesse sentido, a instrumentação é mais que um aliado, sendo um mecanismo muito útil para acompanhamento da performance dessas grandes estruturas, principalmente os piezômetros que conseguem auxiliar no entendimento da superfície freática e das poropressões.

Há vários relatos de rupturas em função de falhas estruturais, principalmente de capacidade de suporte de fundações e ombreiras, o que corrobora a importância dos estudos de investigação, prévios ao projeto, e durante a vida útil das estruturas.

As questões relacionadas à drenagem interna requerem que esses dispositivos tenham sua operacionalidade garantida durante toda a operação. Colmatação ou seccionamento de drenos podem ser contornados com a instalação de drenos verticais ou horizontais profundos, mas, para a efetividade dessas soluções, é necessário conhecer a fundo a estrutura e seu comportamento, para que tais intervenções não comprometam ainda mais a estabilidade. A formação de processos erosivos regressivos (*piping*) é um modo de falha que, geralmente, apresenta sinais claros de surgimento e que, se tratados devidamente, podem impedir uma falha.

A falta de controle dos regimes hidrológicos por meio do balanço hídrico é vista como um dos gatilhos mais comuns para as rupturas, à medida que se verificam reservatórios incapazes de absorver cheias extremas, instabilidade de taludes, infiltrações e erosões. Além disso, descargas alternativas devem ser projetadas para que a remoção de água excedente seja sempre um processo contínuo e ininterrupto, independente da vazão e de condições adversas. Tais dispositivos devem ser frequentemente testados para garantir sua funcionalidade, mesmo quando em *stand-by*. A manutenção da borda livre é uma condição indiscutível para operação segura de barragens.

De uma forma geral, dos estudos de caso analisados, conclui-se que as rupturas de barragens possuem, basicamente, processos instabilizantes relacionados a:

- Fundação;
 - Camadas não detectadas de solo mole ou de baixa resistência,
 - Baixa resistência, e
 - Erros na interpretação da resistência.
- Maciço;
 - Material construtivo inadequado,
 - Taxas construtivas elevadas e problemas de compactação, e
 - Ausência de bermas.
- Rejeitos;
 - Excessivamente saturados e submersos,
 - Sem drenagem durante etapas de adensamento, e
 - Excessivamente fluidos.

- Reservatório;
 - Ausência de comprimento de praia,
 - Borda livre reduzida, e
 - Reservatórios muito grandes que dificultam a gestão.
- Balanço Hídrico;
 - Análises limitadas,
 - Cheias de projeto não contabilizadas adequadamente, e
 - Falhas por excesso de descarga.
- Fator de Segurança;
 - Muito baixos, geralmente, abaixo de 1,3,
 - Elevada probabilidade de falha – Análise de Risco,
 - Incompatibilidade com projeto, ou seja, parâmetros não são atualizados.

O papel da gestão de riscos e falhas nas avaliações de segurança de barragens é ampliar a estabilidade de filtros, bermas, taludes, fundações, dentre outras. Com essa ferramenta, a confiabilidade nos estudos técnicos e ambientais, bem como das obras civis, será potencialmente ampliada. Os sistemas de monitoramento mais robustos permitem que sejam dadas respostas rápidas e precisas a situações de emergência, auxiliando no programa de monitoramento e manutenção. Ainda, é necessário que sejam previstos constantes treinamentos da equipe selecionada para atuação nas estruturas, além de sempre garantir que os profissionais sejam qualificados e aptos para as suas funções.

As lições aprendidas, principalmente com as rupturas, consistem em uma base de dados essencial no entendimento do funcionamento em longo prazo das barragens de rejeito. De acordo com os levantamentos e estudos realizados, as principais conclusões em relação as causas mais prováveis de rupturas são pontos que devem ser observados para garantia da integridade e estabilidade de uma estrutura, tais como:

- Causas associadas à negligência dos detalhamentos, tal como taxas de alteamento muito elevadas (inclusive compactação das camadas), mudanças em equipes de construção e operação, ultrapassagem das alturas de projeto, mudança nas propriedades dos rejeitos durante a operação, e a ausência de um balanço hídrico criterioso na prevenção dos galgamentos;

- O conhecimento técnico existe para permitir que as barragens sejam construídas e mantidas a estabilidade, mas rupturas ocorrem com frequência em função de falhas de implantação e, principalmente, operação e manutenção das estruturas;
- A proporção de rupturas tem se mantido a cada ano mesmo com os avanços tecnológicos, ou seja, não tem sido dada a devida importância a gestão de segurança das barragens no que diz respeito à manutenção e fiscalização das estruturas;
- A indústria da mineração opera com o objetivo constante de redução de custos, uma vez que é perceptível os anseios de retorno sobre o capital investido, em face da redução dos preços de venda dos minérios. Adiciona-se a isso a utilização de profissionais cada vez menos experientes, com habilidades técnicas e operacionais não tão apuradas; e
- Os relatórios sobre as rupturas em barragens de rejeito são, geralmente, incompletos e fortemente tendenciosos, não levando em consideração a base de dados mundial dos tipos de falhas históricas. A maioria dos incidentes em barragens permanece não declarada, especialmente nos países em desenvolvimento, uma vez que, apesar do entendimento técnico sobre os mecanismos básicos de ruptura, a taxa de rupturas por ano mantém-se.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um método de análise de risco e falha aplicado para barragens, baseado na avaliação das inspeções de campo e das leituras de instrumentação. A metodologia amplia a avaliação de estabilidade das estruturas e permite elaborar um plano de ação mais diretivo e robusto para gestão de segurança de barragens, como o apresentado no estudo de caso das três barragens e sumarizado a seguir.

8.1 Conclusões sobre o Método Baldi

A aplicação do Método Baldi para o estudo de caso das três barragens permite concluir que:

- A definição de um Plano de Ação baseado somente nas observações da Ficha de Inspeção tem um caráter subjetivo, uma vez que irá depender da expertise do profissional no levantamento do comprometimento da estrutura perante determinada anomalia;
- À medida em que são definidos níveis de Magnitude (M) e Nível de Perigo (NP) associados a cada anomalia, cria-se um padrão que reduz a subjetividade na classificação da anomalia e permite identificar anomalias críticas ($NP \geq 2$) que requerem uma intervenção mais imediata. Ressalta-se que até esta fase do Método ainda não é definida qual anomalia representa o maior risco, tratando-se de uma análise parcial;
- Ao criar a matriz probabilística da combinação da Magnitude (M) com o Nível de Perigo (NP), tem-se a Probabilidade da Anomalia (PA), um índice para entrada nas árvores de evento do Método Baldi. Quanto maior a PA mais próximo a anomalia encontra-se do cenário do Risco Inaceitável;
- A identificação do Modo de Falha (MF) permite relacionar a anomalia ao processo final de instabilidade na progressão da anomalia, tanto do ponto de vista local, quanto global. Dessa forma, ao sequenciar a árvore de eventos para cada anomalia, o objetivo sempre será prever todos os cenários até o modo de falha definido;
- O desdobramento dos eventos na árvore de evento são realizados com base nas observações das fichas de inspeção e do relatório fotográfico e, nesse sentido, é importante que haja um detalhamento de cada anomalia marcada na ficha. Quanto maior o nível de detalhes, mais preciso é o estabelecimento dos percentuais de cada evento e, conseqüentemente, mais assertivo o cálculo do Risco Probabilístico (RP);
- A definição dos Riscos Probabilísticos em intervalos inaceitáveis, toleráveis e aceitáveis, permite direcionar o plano de ação para uma intervenção mais específica, no sentido de serem mitigadas anomalias que possuem um desdobramento mais direcionado para o modo de falha especificado;
- A Análise de Falha dos riscos inaceitáveis, prioriza dentro do Plano de Ação as anomalias que conduzem a falhas severas, seguidas as falhas intermediárias e brandas. Desta forma, tem-se um plano robusto, diretivo e que norteia toda a gestão de segurança de barragens;

- O Plano de Ação de Falhas Severas deve contemplar ações mitigadoras mais imediatas em relação as anomalias que correspondem a Falhas Intermediárias e, no sequenciamento, para Falhas Brandas;
- O Método Baldi é uma ferramenta de Análise de Falha e risco que deve ser utilizada em conjunto com as demais técnicas para garantia da estabilidade local e global de barragens.

Para o caso da barragem A, tem-se:

- Inspeção: 50 anomalias, sendo 35 críticas mas sem o entendimento de qual a probabilidade da sua progressão gerar um modo de falha;
- Análise de Risco: desdobramento das 50 anomalias em 749 cenários de falha por instabilidade local ou global, para determinado modo de falha. Deste total, 45 são priorizados como Riscos Inaceitáveis, ou seja, que devem ser imediatamente mitigados;
- Análise de Falha: dos 45 Riscos Inaceitáveis, nenhum condiciona a Falhas Severas, sendo que as 33 Intermediárias devem ser priorizadas frente as 12 brandas. Avaliando a falha geral das estruturas, tem-se que duas seções da barragem possuem maior probabilidade de gerar falhas severas e devem ter inspeção mais detalhada (barragem e vertedouro), sendo que o mesmo ocorre para a infraestrutura operacional.

Para o caso da barragem B, tem-se:

- Inspeção: 14 anomalias, sendo nenhuma crítica mas sem o entendimento de qual a probabilidade da sua progressão gerar um modo de falha;
- Análise de Risco: desdobramento das 14 anomalias em 150 cenários de falha por instabilidade local ou global, para determinado modo de falha. Deste total, 6 são priorizados como Riscos Inaceitáveis, ou seja, que devem ser imediatamente mitigados;
- Análise de Falha: dos 6 Riscos Inaceitáveis, nenhum condiciona a Falhas Severas, sendo que as 4 Intermediárias devem ser priorizadas frente as 2 brandas. Avaliando a falha geral das estruturas, tem-se que duas seções da barragem possuem maior probabilidade de gerar falhas severas e devem ter

inspeção mais detalhada (barragem e reservatório), sendo que o mesmo ocorre para a infraestrutura operacional.

Para o caso da barragem C, tem-se:

- Inspeção: 46 anomalias, sendo 4 críticas mas sem o entendimento de qual a probabilidade da sua progressão gerar um modo de falha;
- Análise de Risco: desdobramento das 46 anomalias em 634 cenários de falha por instabilidade local ou global, para determinado modo de falha. Deste total, 17 são priorizados como Riscos Inaceitáveis, ou seja, que devem ser imediatamente mitigados;
- Análise de Falha: dos 17 Riscos Inaceitáveis, nenhum condiciona a Falhas Severas, sendo que as 14 Intermediárias devem ser priorizadas frente as 3 brandas. Avaliando a falha geral das estruturas, tem-se que três seções da barragem possuem maior probabilidade de gerar falhas severas e devem ter inspeção mais detalhada (barragem, vertedouro e estrutura da torre), sendo que o mesmo ocorre para a infraestrutura operacional.

Todas as estruturas apresentam algum grau de risco, mesmo após o controle e, por isso, é necessário elaborar planos de ação, ou planos de contingência, para minimizar tais riscos. Nesses planos, devem-se abordar as ações necessárias para minimizar o risco e mitigar as consequências caso o evento corra, bem como tratar questões de responsabilidade, e respostas às emergências.

O Método Baldi reduz a subjetividade do preenchimento das fichas de inspeção de barragens, ampliando o entendimento de quais anomalias são mais significativas do ponto de vista de desencadear um modo de falha. Desta forma, permite priorizar um plano de ação de forma mais assertiva, reduzindo tempo de atuação e custos de manutenção, à medida em que amplia a efetividade no controle das anomalias na gestão de segurança de barragens.

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

Os processos de avaliação de riscos têm muitas variáveis e abordagens diferenciadas, que podem ser utilizadas combinadas ou isoladamente. De uma forma

geral, as questões destas análises que podem ser tratadas em trabalhos futuros são, principalmente, em relação a avaliar questões:

Método de Risco e Falha

- Avaliar, matematicamente, uma distribuição percentual mais equilibrada para os valores da Probabilidade de Anomalia (PA);
- Inserir matrizes ambientais nas avaliações de danos potenciais associados; e
- Inserir percentuais de Ocorrência (O), relacionados com valores de instrumentação.

Maciços e Fundação

- Se a barragem foi projetada por engenheiros experientes, levando em consideração as condições da fundação, drenagem interna, estabilidade de taludes, carregamentos sísmicos e contenção de contaminantes;
- Se foram utilizados rejeitos ou areia ciclada para a construção da estrutura, e se a estrutura foi avaliada com o mesmo rigor das barragens de aterro ou concreto; e
- Se a barragem é instrumentada e monitorada, para que os comportamentos sejam avaliados entre níveis de normalidade e anormalidade.

Reservatório, extravasor e demais dispositivos

- Se os sistemas no reservatório estão seguros e as tubulações por meio da barragem ou fundação foram adequadamente vedados ou protegidos contra falhas;
- Se existe capacidade suficiente para armazenamento de chuva de eventos extremos;
- Se os vertedouros e/ou desvios estão adequados, inclusive para cheias de projeto;
- Se existem riscos associados ao sistema de disposição de rejeitos e sistema de captação de água;
- Se a estrutura foi projetada para acomodar possíveis alterações nas condições operacionais durante o período de descomissionamento e

fechamento como, por exemplo, erosões, inundações, armazenamento de sedimentos, deslizamentos naturais de encostas, entre outros; e

- Se os projetos incluem potenciais transportes de contaminantes, no caso de resíduos perigosos.

O programa APPEL - *Awareness and Preparedness for Emergencies at the Local Level*, ou Programa de Conscientização e Preparação para Emergências em Nível Local (Apell, 2020) foi desenvolvido pelas ONU para auxiliar empresas, governo e a população local a elaborar planos coordenados de contingência¹.

¹ Um roteiro encontra-se disponível no link a seguir, sendo disponibilizado em mais de 20 idiomas: <https://www.unenvironment.org/explore-topics/disasters-conflicts/what-we-do/preparedness-and-response/awareness-and-preparedness>.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 13.028 (2017) – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água Rio de Janeiro, 2017. 16 páginas.

ABNT NBR ISO 31.000 (2018) - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 31000: Gestão de Risco – Princípios e Diretrizes. Rio de Janeiro, 2018. 19 páginas

AGUIRREGABIRIA, V. and A. Luengo (2016). A Microeconomic Dynamic Structural Model of Copper Mining Decisions - Department of Economics, University of Toronto. 30 de março de 2016.

ALBERTON, A (1996). Uma metodologia para auxiliar no gerenciamento de riscos e na seleção de alternativas de investimentos em segurança. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em engenharia de produção. Florianópolis: UFSC, 1996.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (2018). Relatório de Segurança de Barragens. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/cadastro-de-barragens>>. Acessado em: 08 de fev. 2020.

ANCOLD - AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS. Disponível em: <<https://www.ancold.org.au>>. Acessado em: 12 de jun. 2019

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2018). Disponível em: <<https://www.ANEEL.gov.br/seguranca-de-barragens>>. Acessado em: 08 de fev. 2020.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (2019). <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-classificacao-de-barragens-de>

mineracao/plano-de-seguranca-de-barragens>. Data base fevereiro de 2019. Acessado em: 27 de fev. 2020.

APELL (2020). AWARENESS AND PREPAREDNESS FOR EMERGENCIES AT LOCAL LEVEL (APELL). Disponível em: <<https://www.unenvironment.org/explore-topics/disasters-conflicts/what-we-do/preparedness-and-response/awareness-and-preparedness>> . Acessado em: 12 de jan. 2020.

AS/NZS 4360 (2004) – Norma citada em COOPER, D. F. The Australian and New Zealand standard on risk management. 2004. Tutorial Notes: Broadleaf Capital International Pty Ltd, 2004.

ASDSO (2018). ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS. Lessons Learned. from Dam Incidents and Failures. Disponível em: <<https://damfailures.org>>. Acessado em: 12 de jun. 2019.

AZAM, Li (2010). Tailings Dam Failures: A review of the last 100 years. Geotechnical News n° 28, 50-54. Canadá. Dezembro de 2010.

BLIGHT, G.E (2019). Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. Taylor Francis Group, p. 641. Londres, 2010.

BRAZENDALE, J. and Bell, R (1994). Safety-related control and protection systems: standards update. IEE Computing and Control Engineering J., 5 (1), 6–12.

BUREAU OF RECLAMATION (1988). DSO-Dam Safety Office – Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: A literature Review and Need Assessment. DSO-98-004.

CARDELLA, B. Segurança no trabalho e prevenção de acidentes. 2008.

CBDB (2020). Comitê Brasileiro de Barragens: Cadastro Nacional de Barragens. Disponível em: <http://cbdb.org.br/sistema-informatizado-do-cadastro-nacional-de-barragens-brasil>. Acessado em 15 de maio de 2020.

CENDERELLI, D.A (2000). Floods from natural and artificial dam failures. In: Wohl, Inland Flood Hazards: human, riparian, and aquatic communities (pp 73-103). New York: Cambridge University Press. Nova Iorque.

CHAMBERS, D.M, Bowker, L.N (2017a). In the Dark Shadow of the Supercycle Tailings Failure Risk & Public Liability Reach All Time Higs. 21 páginas.

CHAMBERS, D.M.; Bowker, L.N (2017b). Tailings Dam Failures 1915–2017. Disponível em: <<http://www.csp2.org/tsf-failures-1915-2017>>. Acessado em 17 de dezembro de 2019.

CHAMBERS, D. M., HIGMAN, B. (2011). Long term risks of tailings dam failure. Acessado em: 16 de ago. 2017.

CICARELLI, M. (2008). Material disponível nos Anais do V Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto – Aspectos críticos para fechamento de barragens de rejeito. IBRAM, setembro de 2008.

CONSÓRCIO TRÊS GARGANTAS (2018) – CTG Brasil. Disponível em: <<https://www.ctgbr.com.br/a-empresa/>>. Acessado em 15 de setembro de 2018.

COOPER, D. F (2004). The Australian and New Zealand standard on risk management, AS/NZS 4360: 2004. Tutorial Notes: Broadleaf Capital International Pty Ltd.

COSTA, John E. (1985). Floods from Dam Failures, U.S. Geological Survey Open. File Report 85-560. 54 p. Denver, Colorado.

FEAM (2018). FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (FEAM). Disponível em: <<http://www.FEAM.br/monitoramento/gestao-de-barragens>>. Acessado em: 08 de fev. 2020.

CSP2 (2016). CENTER FOR SCIENCE IN PUBLIC PARTICIPATION. Tailings Dam Failures 1915-2016. Disponível em: <<http://www.csp2.org/technical-reports>>. Acessado em: 7 de fev. 2020.

FEMA (2015). UNITED STATE FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management. FEMA. P-2015. Disponível em: <<https://www.fema.gov/media-library-data/142366105896558dfcecc8d8d18b7e9b2a79ce1e83c96/FEMAP-1025.pdf>>. 2015. Acessado em: 1 de jan. 2015.

FERNANDES, R.B (2017). Manual para elaboração de planos de ação emergencial para barragens de mineração (PAE). 2017.

FOSTER, M. A., Fell, R., and Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. Can. Geotech. J., 1000 – 1024.

FREAD, D.L. (1977) The Development and Testing of a Dam-Break Flood Forecasting Model. In: Proceedings of the Dam-Break Flood Routing Model Workshop, Bethesda, p. 164-197. Maryland.

FREAD, D.L. (1988). BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures, National Weather Service. National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring. Maryland, 1988 (revised 1991).

FREAD, D.L. (1993). 'Selection of Ox and At Computational Steps for Four-Point Implicit Non-linear Dynamic Routing Models,' Proceedings, National Hydraulic Engineering Conference, ASCE, San Francisco.

GONIADIS, M. (2015). Disponível em <<https://br.blastingnews.com/mundo/2015/08/california-encontra-solucao-para-escassez-de-agua-potavel-00519089.html>>. Acessado em 14 e fevereiro de 2020.

HEC-1 (1981). HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-1 Flood Hydrograph Package. User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis. California.

IBRAM (2019). INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - Guia IBRAM de Boas Práticas de Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos, 2019. Disponível em <<http://portaldamineracao.com.br>>. Acessado em 10 de janeiro de 2020.

ICOLD (2001). COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (ICOLD). Bulletin 121: Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences. Lessons learnt from practical experiences. 2001. 146 páginas.

ICOLD (2020). Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/number-of-dams-by-country-members>. Acessado em: 08 de fev. 2020.

JEFFERIES, M. and K. Been (2016). Soil Liquefaction: A Critical State Approach. 2nd ed.: Taylor & Francis. Londres.

LACASSE, S. H. (2019). Proceedings of the ICOLD 2019. Symposium.

LANE, E.W (1934). Security from under-seepage masonry dams on earth foundations. Trans ASCE 60(4):929–966.

LEPS, T.M. (1970) Review of the shearing strength of rockfill. J. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.96, No. SM4, Proc. Paper 7394, July 1970, 1159-1170.

LONDE, Pierre (1993). ICOLD Bull. 88 - Rock Foundations for Dams.

LUTHI, M. (2011). A modified hole erosion test to study erosion characteristics of soil. Master Thesis. The Faculty of Graduate Studies of British Columbia. Agosto, 2011.

LUTZ, J.F. (1934). The physico-chemical properties of soils affecting soil erosion. Research Bulletin No. 212. Agricultural Experiment Station, University of Missouri, Columbia, Missouri.

MACGRATH, S. (2000). To Study International Practice and Use of Risk Assessment in Dam Management. Canberra: Winston Churchill Memorial Trust of Australia. 2000.

MARTIN, T.E. and E.C. McRoberts (1999). Some Considerations in the Stability Analysis of Upstream Tailings Dams. In: Tailings and Mine Waste '99: Proceedings of

the 6th International Conference on Tailings and Mine Waste, January 24 to 27, 1999. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.

MAO, Y & Kam, S (2011). Closure of tailings dams', in AB Fourie, M Tibbett & A Beersing (eds), Proceedings of the Sixth International Conference on Mine Closure, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 361-372

MITTAL H.K.; MORGENSTERN, N.R (1977). Design and performance of tailings dams. Proceedings ASCE Geotechnical Specialty Conference. pp 475-492.

MORGENSTERN, N.R, VICK, S.G, VIOTTI, C.B, WATTS, B.D. (2016). Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundação – Relatório sobre as causas imediatas da ruptura Brasil. Report em 25 de agosto de 2016.

NPS (2020) - NATIONAL PROTECTION PARK. Disponível em: <<https://www.nps.gov/olym/learn/nature/elwha-ecosystem-restoration.htm>>. Acessado em 12 de fevereiro de 2020.

OLIVEIRA, U. R. (2009). Tomada de Decisão em Flexibilidade de Manufatura para Gerenciamento de Riscos Operacionais no Processo Produtivo Industrial. 2009. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

PINHEIRO, M. C. (2011). Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração. Mário Cicareli Pinheiro. 1a Edição. ABRH. 2011

PREFEITURA DE TUCURUÍ (2018). Disponível em: <<https://tucurui.pa.gov.br>>. Acessado em 07 de maio de 2019.

RESAG (2017). Rede de Saneamento e Abastecimento de Água – 3º Congresso Internacional. Artigo: Elaboração de árvores de eventos sob o cenário de galgamento para uma barragem da região de Diamantina. Autores: Luan Domingues

da Silva, Mariana Alvarenga Ruas e Silva, Rodrigo Medeiros de Almeida, Josias Eduardo Rossi Ladeira. 2017

ROBERTSON, A. and S.S Shaw (2004). Use of the multiple accounts analysis process for sustainability optimization. Pre-print paper 04-163. SME Annual Meeting, February 23-25. Denver, Colorado.

ROBERTSON, P.K. (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 136(6): 842-853. 2010.

ROBERTSON, P.K. (2011) – Tailings and Mine Waste Conference. Keynote Address

SADREKARIMI, A. (2014). “Effect of the Mode of Shear on Static Liquefaction Analysis.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 140(12): 04014069-1-04014069-12.

SANTAMARINA, JC., Torres-Cruz, L.A. and Bachus, R.C. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science Magazine*, 364 [6440], 526-528. DOI: 10.1126/science.aax1927.

SASITHARAN, S., P.K. Robertson, D.D. Seago and N.R. Morgenstern. (1993). Collapse Behaviour of Sand. *Canadian Geotechnical Journal*. 30(4): 569-577.

SCHENINI, P. C.; NEUENFELD, D. R. & ROSA, A. L. M. (2006). O gerenciamento de riscos no transporte de produtos perigosos. In: *Anais do XIII Simpósio de Engenharia de Produção – a XIII SIMPEP*, Bauru.

SHERARD JL, WOODWARD RJ, GIZIENSKI SF, CLEVINGER WA. (1963). *Earth and earth-rock dams, engineering problems of design and construction*. Wiley. pp 114–130. New York.

SHUTTLE, D.A. and J. Cunning. (2007). Liquefaction Potential of Silts from CPTu. *Canadian Geotechnical Journal*. 44(1): 1-19. Canadá, 2007.

SKOPEK, P., N.R. Morgenstern, P.K. Robertson, and D.C. Segro. (1994). Collapse of Dry Sand. *Canadian Geotechnical Journal*. 31(6): 1008-1014.

SZYMANSKI & DAVIES. (2004). *Tailings Dams: Design Criteria and Safety Evaluations at Closure*. AMEC Earth & Environmental, a division of AMEC Americas Limited. 12 pág.

TERZAGHI, K., & Peck, R. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. 2nd ed. New York: John Wiley.

TERZAGHI, K. (1939). Soil mechanics: a new chapter in engineering science. *J Inst Civ Eng* 12:106–141.

USACE (2014). UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Safety of Dams-Policy and Procedures*. Appendix T. Periodic Assessment Procedures. ER 1110-2-1156. March, 2014.

VALE (2020). Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/descaracterizacao-de-barragens.aspx>
Acessado em: 15 fev. 2020.

VAUGHAN PR (1999). Sedimentation of tailings. Panel discussion. Proc. 14th Int. Conf. SMFE, Hamburg, vol 4, pp 2561-2. Published Balkema, Rotterdam.

WESTPHAL, Jerome A., and David B. Thompson (1987). NWS Dam break or NWS Simplified Dam Breach. *Computational Hydrology '87*, Proceedings of the First International Conference, Anaheim, California, July 1987, p. H17-H23.

WETMORE, J.N., and D.L. Fread. (1983). *The NWS Simplified Dam-Break Model Executive Brief*. National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, Maryland. 1983.

WHITMAN, R.V. (1984). Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. J. Geot. Engineering, 110, 2.

WHO (2020). World Health Organization. Disponível em: < <https://www.who.int>>. Acessado em: 12 de out. 2020.

WMTF (2018). WORLD MINE TAILINGS FAILURE. Disponível em: <<https://worldminetailingsfailures.org>>. Acessado em :08 de fev. de 2020.

WURBS, Ralph A. (1987). Dam-Breach Flood Wave Models, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 113, no. 1, p. 29-46.

ZHANG, L.M. (2007). Analysis of earth dam failures. A database approach in SGSR2007. First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk. Oct. 18~19, 2007. Shanghai Tongji University, Pg 293. China, 2007.