

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**CADASTRO E ANÁLISE DO POTENCIAL DE RISCO DAS
BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DO ESTADO
DE GOIÁS**

MARCELO BERNARDI VALERIUS

ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 245/14

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO DE 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**CADASTRO E ANÁLISE DO POTENCIAL DE RISCO DAS
BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DO ESTADO
DE GOIÁS**

MARCELO BERNARDI VALERIUS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)

ROMERO CÉSAR GOMES, DSc. (UFOP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

BRASÍLIA/DF, 24 DE SETEMBRO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

VALERIUS, MARCELO BERNARDI

Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás. Distrito Federal, 2014.

xvi, 105 p., 210x297mm, (ENC, FT, UnB, Mestre, Geotecnia, 2014).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia,
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------------------|------------------------|
| 1. Barragens de rejeitos | 2. Análise de riscos |
| 3. Avaliação de impacto ambiental | 4. Análise qualitativa |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VALERIUS, M. B. (2014). Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 245/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marcelo Bernardi Valerius

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás.

TÍTULO: Mestre

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar e vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marcelo Bernardi Valerius

Rua Joaquim Delfino, 231 - Vila Meneses

75902-060, Rio Verde - GO - Brasil

mbvalerius@gmail.com

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Clarister e Irineu, que sempre acreditaram em mim mesmo quando nem eu acreditava.

“(…) que eu nunca disponha de facilidades na
terra, a fim de que a luz da gratidão e do
entendimento permaneça viva em meu espírito!”

André Luiz.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Luís Fernando pelo interesse e paciência durante a orientação desta dissertação, mesmo eu tendo que morar distante de Brasília. Muito obrigado pelo apoio, incentivo e companheirismo nas aulas ministradas, nas instruções passadas no período em que trabalhei no laboratório e durante a elaboração desta dissertação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pelos ensinamentos transmitidos. Em especial aos professores André Brasil, Gregório, Luís Fernando, Márcio e Newton, pelo apoio e pela oportunidade de trabalhar no laboratório quando eu ainda era aluno especial.

Aos colegas de mestrado pela amizade e ajuda durante as várias horas de estudo na sala de créditos. Gostaria de agradecer em especial aos amigos Igor e Jorge por me acolherem em suas casas quando precisei. Muito obrigado!

À minha namorada Deborah pelo apoio, carinho e compreensão.

Aos meus familiares e amigos por estarem sempre comigo independente da distância, me apoiando, incentivando e renovando minhas forças para eu seguir em frente.

RESUMO

A crescente demanda do setor mineral justifica o ritmo acelerado de produção das mineradoras, fazendo com que, em poucos anos, as barragens de rejeitos atinjam grandes dimensões, potencializando o risco sobre núcleos populacionais e demais estruturas situadas a jusante. Neste sentido, acidentes têm ocorrido causando mortes e/ou desastres ambientais, sendo que as causas das rupturas são diversas, muitas delas envolvendo eventos hidrológicos e sísmicos, mas também acontecendo em condições normais de operação. Diante disso, torna-se necessária a adoção de um sistema de gestão do risco, onde procedimentos devem ser impostos pelos órgãos fiscalizadores e adotados pelos empreendedores com a finalidade de reduzir o risco. Dentro desses processos existem as análises de riscos que identificam as estruturas que necessitam de uma atenção especial. Entretanto, estas análises encontram-se amplamente difundidas no contexto da avaliação de barragens convencionais, mas ainda são pouco abordadas no âmbito da segurança de barragens de rejeitos. Neste contexto, propõe-se nesta pesquisa proceder uma adaptação da análise de riscos investigatória desenvolvida para barragens convencionais pela agência americana Bureau of Reclamation para as barragens de rejeitos. Para o cálculo do índice de risco, na análise adaptada são considerados alguns cenários de solicitação e suas probabilidades de ocorrência, a resposta das barragens aos cenários de solicitação e o potencial de perda de vidas humanas. Para classificar o dano econômico e socioambiental, propõe-se uma classificação qualitativa baseada na periculosidade do rejeito e no risco potencial de degradação do meio ambiente. Estas análises foram aplicadas às barragens de rejeitos de Goiás com base nos dados disponibilizados pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. A principal proposta desta dissertação foi contribuir com os mecanismos de gestão das barragens de rejeitos, no sentido de fornecer mais subsídios para a tomada de decisões baseadas nos índices obtidos nas análises e estudos realizados. De um modo geral, a maioria das barragens analisadas apresentou um valor médio para o índice de falha, que é calculado considerando, basicamente, critérios de projeto. O índice de risco apresentou valores variáveis, pois depende da população em risco. Mesmo com algumas dificuldades na obtenção de dados relativos às barragens de rejeitos comparadas com a disponibilidade de dados referentes às barragens convencionais, a análise apresentou resultados importantes sobre as tecnologias construtivas, estabilidade e segurança dos sistemas de disposição de rejeitos do estado de Goiás.

ABSTRACT

The growing demand in the mineral field clarifies the fast pace in the production of the mining companies, causing, in few years, tailings dams achieve large dimensions, potentiating the risk on settlements and other structures located downstream. In this sense, accidents have been happening causing deaths and/or environmental disasters, wherein the causes of failures are varied, many of them involving hydrological and seismic events, but also going in normal conditions of operation. Given this, it is necessary the adoption of a system of risk management, where procedures must be imposed by supervisory organs and adopted by the entrepreneurs in order to reduce the risk. Within these processes there are the risk analyses that identify the structures that need a special attention. However, these analyses are widespread in the context of the evaluation of conventional dams, but they are still not addressed safety under of tailings dams. In this context, propose in this research proceed an adaptation of investigating analyses of risks developed to conventional dams by the american agency Bureau of Reclamation to the tailings dams. To calculate the risk index, in the adapted analysis are taken into consideration some request scenarios and its occurrence probability, the reply of the dams to the request scenarios and the potential of loss of human lives. To classify the economical and socio environmental damage, propose a qualitative classification based on the dangerousness of the tailings and in the potential risk of degradation of the environment. These analyses were applied to tailings dams of Goiás based on the data available from the State Secretary of Environment and Water Resources. The main proposal in this essay was to contribute with the mechanisms of management of the tailings dams, in the sense of providing more sources for decision making based on index obtained in the analysis and studies carried out. Generally, most dams analyzed showed an average value for the failure rate, that is calculated taking into consideration, basically, criteria of project. The risk rate showed varied values, since it depends on the population in risk. Despite some difficulties obtaining the data related to tailings dams compared to the availability of data referring to conventional dams, the analysis showed important results about the building technologies, stability and safety systems of tailings disposal in the state of Goiás.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – CONTEXTO GERAL	1
1.2 – OBJETIVOS	3
1.3 – ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	4
2 - MINERAÇÃO: ASPECTOS GERAIS DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	6
2.1 - INTRODUÇÃO	6
2.2 - TRANSPORTE E FORMAS DE DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS	7
2.2.1 - Barragens de rejeitos	8
2.2.2 - Configurações dos represamentos	11
2.3 – ESTUDO DOS PRINCIPAIS MECANISMOS DE FALHA EM BARRAGENS DE REJEITOS	13
2.3.1 – Instabilidade de taludes.....	15
2.3.2 – Falhas por galgamento	20
2.3.3 – Falhas por erosão interna e externa.....	21
2.3.4 – Falhas por carregamentos dinâmicos	23
2.4 - CASOS HISTÓRICOS DE FALHAS EM BARRAGENS DE REJEITOS	24
2.4.1 – Crescimento da atividade mineira.....	25
2.4.2 – Altura das barragens de rejeitos	27
2.4.3 – Relações entre falha e os métodos construtivos adotados	28
2.4.4 – Principais mecanismos de falha verificados	30
2.4.5 - Comparação com barragens convencionais.....	32
2.5 – IMPACTOS AMBIENTAIS DAS ATIVIDADES MINEIRAS E DA DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS	34
2.5.1 – O potencial de dano ambiental causado por rupturas em barragens de rejeitos ...	35
2.5.2 – Acidentes com barragens de rejeitos no Brasil	36
3 - A IMPORTÂNCIA DA GESTÃO DO RISCO	37
3.1 - INTRODUÇÃO	37
3.2 – AS ANÁLISES DE RISCOS	38
3.3 – A LEGISLAÇÃO DAS BARRAGENS BRASILEIRAS	40
3.3.1 – Classificação realizada no Brasil	40
3.3.2 – Projeto de lei nº 6259 de 2013	46
3.4 – A ANÁLISE DE RISCO - RISK-BASED PROFILING SYSTEM (RBPS)	47

3.4.1 – Caracterização dos fatores de carga	50
3.4.2 – Caracterização dos fatores de resposta	53
3.4.3 – Fator de perda de vidas humanas	54
4 - METODOLOGIA DAS ANÁLISES DE RISCO ADOTADAS	60
4.1 - INTRODUÇÃO	60
4.2 – ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS DE BARRAGENS DE REJEITOS.....	61
4.3 – DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE CARGA	63
4.4 – DETERMINAÇÃO E PONTUAÇÃO DOS FATORES DE RESPOSTA.....	64
4.4.1 – Condição estática (cenário de operação normal)	66
4.4.2 – Cenário hidrológico	67
4.4.3 - Cenário sísmico	69
4.4.4 – Cenário de interferência humana (operação e manutenção).	70
4.5 – DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE PERDA DE VIDAS HUMANAS	71
4.6 – CLASSIFICAÇÃO DO DANO ECONÔMICO E SOCIOAMBIENTAL	75
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
5.1 – INTRODUÇÃO.....	77
5.2 – ÍNDICES DE RISCO E CLASSIFICAÇÃO DO DANO ECONÔMICO E SOCIOAMBIENTAL DAS BARRAGENS DE REJEITOS DO ESTADO DE GOIÁS	84
5.3 – PROPOSTA DE UM PROGRAMA DE MONITORAMENTO UTILIZANDO DADOS DA ANÁLISE DE RISCO REALIZADA.....	92
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Produção bruta e beneficiada dos principais minérios extraídos no estado de Goiás (DNPM, 2010).	1
Tabela 2.1 - Alguns mecanismos de falha em barragens de rejeitos, suas causas e ações que podem ser tomadas (modificado - Zardari, 2011).	14
Tabela 2.2 - Fatores que influenciam na probabilidade de falha por piping (Foster et al., 2000).	22
Tabela 3.1 - Sistema de pontuação considerando características técnicas (CNRH, 2012).	41
Tabela 3.2 - Sistema de pontuação considerando o estado de conservação (CNRH, 2012). ...	41
Tabela 3.3 - Sistema de pontuação considerando o plano de segurança de barragem (CNRH, 2012).	42
Tabela 3.4 - Faixas de classificação de cada categoria de risco (CNRH, 2012).	43
Tabela 3.5 - Sistema de pontuação do dano potencial associado (CNRH, 2012).	44
Tabela 3.6 - Faixas de classificação de cada categoria de dano potencial associado (CNRH, 2012).	45
Tabela 3.7 - Matriz que define a classe em que determinada barragem de rejeito se enquadra (DNPM, 2012).	45
Tabela 3.8 - Distribuição da pontuação do índice de falha	48
Tabela 3.9 - Componentes da metodologia RBPS (Escuder et al., 2007).	50
Tabela 3.10 - Tempo de ruptura em relação a alguns tipos de barragens (MMA, 1996).	58
Tabela 4.1 - Informações básicas a serem adquiridas para a elaboração de um inventário.	62
Tabela 4.2 - Descrição verbal x probabilidade (USBR, 2011).	64
Tabela 4.3 – Condição estática: pontuação proposta para o fator de resposta.	66
Tabela 4.4 - Cenário hidrológico: pontuação proposta para o fator de resposta.	68
Tabela 4.5 - Cenário sísmico: pontuação proposta para o fator de resposta.	69
Tabela 4.6 - Cenário de interferência humana: pontuação proposta para o fator de resposta..	71
Tabela 4.7 - Comparação da distância real atingida por fluxos de rejeitos liquefeitos com a distância calculada pelo programa Tailings Flow Slide Calculator disponibilizado por Diehl (2009).	74
Tabela 4.8 - Sistema de pontuação para a classificação do dano econômico e socioambiental.	76
Tabela 5.1 - Dados das barragens de rejeitos consideradas na análise de risco	78

Tabela 5.2 - Sistemas de disposição de rejeitos na forma de diques ou lagoas de decantação.	80
Tabela 5.3 - Fatores de carga considerados para todas as barragens.	85
Tabela 5.4 - Valores utilizados como entrada de dados para o cálculo da distância percorrida pelos rejeitos.....	87
Tabela 5.5 - Comparação da classificação feita pelo DNPM com a classificação RBPS adaptada.....	90
Tabela 5.6 - Programa de monitoramento vinculado à análise de risco proposta.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Métodos construtivos de barragens de rejeitos (modificado - Gomes, 2009).	9
Figura 2.2 - Represamento em vale: a) simples; b) múltiplo (Vick, 1983).....	11
Figura 2.3 - a) Represamento em meia encosta; b) Represamento em fundo de vale (Vick, 1983).....	12
Figura 2.4 - Depósito em dique fechado (Vick, 1983).....	13
Figura 2.5 - Condições de poropressões: a) poropressão inicial; b) acréscimo de poropressão; c) poropressão induzida pelo cisalhamento; d) combinação das poropressões (Vick, 1987). .	16
Figura 2.6 - Alguns fatores que influenciam a posição da superfície freática dentro de um depósito de rejeitos.....	17
Figura 2.7 - Comparação entre o número de falhas por década x capacidade dos caminhões em toneladas (Oldecop & Rodríguez, 2006).	26
Figura 2.8 - Comparação entre falhas e altura das barragens de rejeito (ICOLD, 2001).....	27
Figura 2.9 - Comparação entre o número de falhas e os métodos construtivos (ICOLD, 2001).	29
Figura 2.10 - Número de falhas x método construtivo e tipo de falha (ICOLD, 2001).	29
Figura 2.11 - Principais mecanismos de falha em relação à situação da barragem (ICOLD, 2001).....	31
Figura 2.12 - Principais mecanismos de falha em relação ao tipo de barragem (ICOLD, 2001).	31
Figura 2.13 - Comparação entre o número de rupturas de barragens de rejeitos e barragens para a retenção de água (UNEP, 1998).	33
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia RBPS até o cálculo do índice de risco.....	49
Figura 4.1 - Perfil de elevação do terreno no Google Earth.....	74
Figura 4.2 - Programa utilizado para calcular a distância alcançada por um fluxo de rejeitos liquefeitos (Diehl, 2009).	75
Figura 5.1 - Mapa do estado de Goiás com as barragens de rejeitos e outros sistemas de disposição de rejeitos.	83
Figura 5.2 - Resultados dos índices de falha, índices de risco, população em risco e potencial de perda de vidas humanas.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Área de preservação permanente
ART	Anotação de responsabilidade técnica
B	Força de empuxo
c'	Coesão efetiva
CMP	Cheia máxima provável
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
D	Profundidade em relação à superfície freática
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
e	Índice de vazios
EPA	Environmental Protection Agency
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
F	Força de percolação
FS	Fator de segurança
g	Grama
GPS	Global positioning system
h	Altura
H	Espessura da camada de solo
hm^3	Hectômetro cúbico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD	International Commission on Large Dams
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
kPa.s	Quilopascal segundo
m	Metro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro

MPa	Megapascal
N	Força normal
N_t	Número total de dias incluídos na simulação
n_z	Número de dias em que o nível d'água ficou na cota z
NBR	Norma Brasileira
P	Peso do elemento de solo
PAE	Plano de ação emergencial
PNSB	Política nacional de segurança de barragens
PR	População em risco
P(z)	Probabilidade de se encontrar o nível na cota z
RBPS	Risk-based profiling system
SIEG	Sistema estadual de geoinformação
SIG	Sistema de informações geográficas
SEMARH	Secretaria Estadual do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
t	Tonelada
T	Força tangencial
T_e	Tempo
TR	Tempo de retorno
u	Poropressão
u_e	Acréscimo de poropressão
u_f	Poropressão induzida pelo cisalhamento
UNEP	United Nations Environment Programme
u_s	Poropressão inicial
USBR	United States Bureau of Reclamation
USCOLD	United States Committee on Large Dams
V	Volume
α	Ângulo de inclinação do talude
γ	Peso específico da camada de solo
γ_w	Peso específico da água
ϵ_c	Deformação cisalhante
σ	Tensão total
σ'	Tensão normal efetiva

σ_e	Tensão de escoamento
Σ	Somatório
ρ_s	Densidade das partículas sólidas
τ	Tensão de cisalhamento
ϕ	Ângulo de atrito
μ_p	Viscosidade plástica

INTRODUÇÃO

1.1 – CONTEXTO GERAL

A mineração é uma das principais fontes econômicas brasileiras e contribui diretamente para a melhoria da qualidade de vida da população. Atualmente, o Brasil ocupa um lugar privilegiado no cenário mundial da indústria de mineração pelo fato de possuir um ambiente geológico privilegiado, apresentando grande variedade de minérios.

O estado de Goiás é o terceiro pólo extrativista mineral do país superado apenas por Minas Gerais e Pará. No ano de 2011, trinta e duas substâncias compuseram o produto mineral de Goiás e do Distrito Federal, sendo que sete dessas substâncias (níquel, nióbio, amianto, cobre, ouro, fosfato e cobalto) responderam por aproximadamente 92,36% de toda produção estadual, e as três primeiras citadas são responsáveis pela liderança nacional. É importante, ainda, mencionar que os empreendimentos mineiros empregaram cerca de 13600 pessoas em todo o estado e no Distrito Federal (Andrade & Silva, 2012).

Não há dúvidas que a mineração é um importante componente da economia goiana, entretanto, é uma atividade considerada de grande impacto ambiental, principalmente pela alta geração de resíduos durante a lavra e o beneficiamento. A Tabela 1.1 apresenta a produção mineral goiana no ano de 2009.

Tabela 1.1 - Produção bruta e beneficiada dos principais minérios extraídos no estado de Goiás (DNPM, 2010).

Mineral	Produção Bruta (t)	Produção Beneficiada (t)
Fosfato	10.327.938	1.338.534
Amianto (Crisotila)	4.708.299	288.448
Cobre	19.828.002	259.470
Nióbio (Pirocloro)	10.790.934	221.222
Níquel	3.362.433	114.979
Cobalto	2.829.115	39.001
Ouro (Primário)	19.941.946	9,47

Com os valores das duas produções, pode-se estimar a quantidade de resíduos gerados subtraindo-se a produção bruta da produção beneficiada. No beneficiamento do fosfato, 87% da matéria bruta são considerados resíduos, 93,9% para o amianto, 98,7% para o cobre, 97,9% para o nióbio, 96,6% para o níquel, 98,6% para o cobalto e quase 100% para o ouro. Como pode ser observada, a geração de resíduos nas atividades mineiras é bastante alta, fazendo com que a sua destinação ou reaproveitamento seja uma tarefa complexa e que demanda grandes investimentos. Dos diversos resíduos gerados nos processos de lavra e beneficiamento do minério, os rejeitos merecem uma atenção especial por diversos fatores, dentre os quais estão, principalmente, os grandes volumes que são gerados e a heterogeneidade vinculada aos diferentes tipos de minério explotado. Os rejeitos são gerados no beneficiamento do minério que, dependendo do processo adotado, pode receber insumos diversos que os tornam potencialmente perigosos.

As barragens de rejeitos são as estruturas utilizadas na disposição dos materiais não aproveitados no processo de beneficiamento e tendem a gerar diversos impactos ambientais e, portanto, representam uma importante fonte de poluição. O processo de construção dessas barragens, desde a escolha do local, o gerenciamento das estruturas até o seu fechamento, deve seguir normas ambientais, parâmetros geotécnicos e estruturais, questões sociais, de segurança e risco, que assegurem a qualidade dessas estruturas (Lozano, 2006).

Como é um sistema de disposição de resíduos e os investimentos feitos para sua melhoria aparentemente não tendem a trazer nenhum retorno financeiro direto, os empreendedores costumam, em alguns casos, construir estruturas mais simples com um menor controle construtivo e, assim, alguns acidentes envolvendo essas estruturas têm ocorrido.

No estado de Minas Gerais, a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), realizou em 2004 um cadastro de todas as barragens, visando mapear de maneira sistemática as condições destas estruturas de contenção de rejeitos (Farias, 2004). Este documento também objetivou a classificação destas barragens com base em uma metodologia baseada no potencial de dano ambiental. Essa metodologia tem sido utilizada como uma ferramenta complementar para auxiliar a tomada de decisões, fazendo com que as barragens que possuem a situação mais crítica quanto ao potencial de risco e dano ambiental, sejam observadas com maior atenção (Espósito & Duarte, 2010).

Considerando a grande quantidade de rejeitos gerados nas atividades mineiras e a crescente demanda do setor, é de fundamental importância que se desenvolva um sistema de controle e fiscalização eficientes desses sistemas de disposição, pois esse é o primeiro passo para se buscar uma padronização dessas estruturas, tornando-as mais confiáveis e seguras para a população e para o meio ambiente.

1.2 – OBJETIVOS

A principal intenção do trabalho é contribuir para a melhoria da gestão de segurança de barragens de rejeitos. Assim, um dos objetivos básicos é analisar e expor a situação atual do risco que essas estruturas representam, aplicando como estudo as barragens de rejeitos do estado de Goiás.

Com o apoio da Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Goiás (SEMARH), buscou-se desenvolver um estudo no estado de Goiás similar ao realizado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) em Minas Gerais, usando dados já obtidos e complementando-os com os estudos que serão realizados nesta pesquisa. Esses dados já obtidos consistem nas informações prestadas pelas mineradoras durante o processo de licenciamento ambiental de suas barragens de rejeitos, sendo que essas licenças, em Goiás, são emitidas pela SEMARH.

Portanto, a proposta deste trabalho é elaborar um inventário das barragens de rejeitos do estado de Goiás e adaptar uma análise de riscos de barragens convencionais para as barragens de rejeitos cadastradas, visando a melhoria da gestão da segurança dessas estruturas. A escolha pela adaptação de uma análise desenvolvida para barragens convencionais se deve, primeiramente, pelo fato de que essas estruturas, do ponto de vista construtivo, são bastante semelhantes às barragens de rejeitos. Em segundo lugar, a escolha pela adaptação também se deve pelo motivo de que os estudos desenvolvidos no âmbito da segurança de barragens convencionais estão mais adiantados em relação aos estudos relacionados às barragens de rejeitos, pois as preocupações com barragens de rejeitos são relativamente recentes. É importante mencionar que este estudo constitui uma análise investigatória, ou seja, uma análise inicial, basicamente desenvolvida por meio de estudos qualitativos, pois ainda são desconhecidas as dificuldades que serão encontradas na obtenção dos dados.

1.3– ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. No Capítulo 1 é apresentado um resumido cenário da mineração no estado de Goiás, com a apresentação de alguns dados que dão uma idéia da quantidade de resíduos gerados no beneficiamento dos principais minerais explorados no estado e, uma parte que aborda as barragens de rejeitos como método de disposição de parte estes resíduos. São apresentados ainda os objetivos e o escopo desta dissertação.

No Capítulo 2 desenvolve-se a revisão bibliográfica que aborda a geração de rejeitos até a sua disposição nas barragens, descrevendo as formas de disposição, as configurações dos represamentos e os métodos de alteamento das barragens. São apresentadas as fragilidades que estas estruturas costumam possuir, e é feito um levantamento de eventos adversos históricos de barragens de rejeitos que facilita a análise dos principais modos de ruptura. No final do capítulo são apresentados os principais impactos ambientais ocasionados pelas atividades mineiras e pelo rompimento de barragens de rejeitos, bem como exemplos de casos de rupturas no Brasil.

Na sequência, o Capítulo 3 mostra a importância do gerenciamento do risco no contexto de barragens e apresenta a análise de risco como uma das ferramentas deste tipo de gestão. São abordadas as legislações brasileiras que regulamentam estas estruturas e é apresentada a análise RBPS, desenvolvida pela agência americana *Bureau of Reclamation* para barragens convencionais.

A preocupação com os acidentes em barragens de rejeitos é relativamente recente; por isso, os estudos relacionados ao desenvolvimento de análises de risco para estas estruturas não estão tão avançados quanto às pesquisas relacionadas com barragens convencionais. Neste sentido, no Capítulo 4 é proposta uma adaptação da metodologia RBPS para a aplicação em barragens de rejeitos. Para a validação da análise de risco, são utilizados dados das barragens de rejeitos do estado de Goiás, obtidos com a elaboração de um inventário. Para a classificação do dano econômico e socioambiental, é desenvolvida uma análise qualitativa baseada principalmente na periculosidade do rejeito armazenado e nas estruturas situadas a jusante da barragem.

No Capítulo 5 são apresentados os valores obtidos para os índices de falha e os índices de risco e a classificação do dano econômico e socioambiental das barragens de rejeitos de

Goiás, em função da metodologia proposta e apresentada neste trabalho. Fez-se ainda uma análise comparativa dos índices da análise de risco feita pelo DNPM e da análise de risco adaptada e utilizada neste trabalho.

As conclusões referentes às análises, elaboração do inventário e à revisão da literatura são apresentadas no Capítulo 6, bem como algumas sugestões de pesquisas futuras e de melhorias na gestão de barragens de rejeitos.

MINERAÇÃO: ASPECTOS GERAIS DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

2.1 - INTRODUÇÃO

A mineração abrange um conjunto de atividades necessárias para a extração com fins econômicos de minerais da crosta terrestre. A geração de resíduos é uma das características inevitáveis da produção mineral, onde os estéreis e os rejeitos são os mais comuns em quase todos os tipos de minerações. Os estéreis são extraídos nas operações de lavra para o aproveitamento do minério e são caracterizados por rochas e/ou solos sem valor econômico ocorrendo interna ou externamente ao corpo do minério (Abrão & Oliveira, 1998).

No processo de concentração mineral, onde é adicionada água e, em alguns casos, produtos químicos para a extração do minério, são gerados os rejeitos, que são partículas sólidas com granulometria de areia até argila sem valor ou pouco valorizada economicamente (ICME, 1998).

O processo de concentração tem como objetivo a regularização do tamanho dos fragmentos, a remoção de minerais associados sem valor econômico e o aumento da pureza, qualidade ou teor do produto final. Os processos utilizados são muito variados, pois dependem basicamente do tipo e da qualidade do minério explorado. Os mais comuns são: britagem, moagem, concentração, peneiramento, lavagem, secagem e calcinação. Dependendo do tipo de minério a ser beneficiado e dos processos utilizados, podem-se encontrar rejeitos com variadas características físico-químicas, mineralógicas e geotécnicas. Quando são de granulometria fina, são denominados lama, e quando apresentam granulometria grossa (acima de 0,074 mm) são denominados rejeitos granulares (Espósito, 2000).

Com o aperfeiçoamento das técnicas de lavra e beneficiamento e o constante esforço demandado para a redução dos custos de produção, a mineração vem aproveitando minérios com teores cada vez menores e, com isso, gerando mais rejeitos (Abrão & Oliveira, 1998). No Brasil, a técnica mais utilizada para a disposição dos rejeitos é a de aterro hidráulico, considerada pelas mineradoras a mais vantajosa do ponto de vista econômico e técnico. Por existir poucas especificações técnicas relacionadas a essas estruturas, as barragens de rejeitos apresentam grandes problemas relacionados a aspectos construtivos e de segurança.

Geralmente, o resíduo é lançado de forma quase aleatória e com um baixo controle das variáveis que influenciam o processo de disposição (Ribeiro, 2000).

2.2 - TRANSPORTE E FORMAS DE DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS

Entre 1906 e 1945, a hidromecanização foi um método bastante utilizado para a construção de barragens. Entretanto, essas barragens apresentavam um baixo controle geotécnico, havendo relatos de algumas rupturas condicionadas aos altos valores de índices de vazios e às baixas densidades dos maciços em aterro hidráulico. Então, devido às dúvidas e incertezas quanto ao controle dessa técnica, no Brasil a sua aplicabilidade a projetos de barragens convencionais de acumulação de água foi deixada de lado (Ribeiro, 2000).

Mesmo abandonada na construção de barragens convencionais, a técnica de aterro hidráulico continuou sendo utilizada no processo de disposição de rejeitos de mineração. Isto ocorreu devido à simplicidade dos mecanismos utilizados, à necessidade de pouca mão-de-obra especializada e ao custo unitário baixo. Esses e outros fatores relacionados à grande quantidade de rejeitos a serem estocados e à aplicabilidade no contexto das atividades da mina, principalmente pela forma úmida como o rejeito é produzido e transportado a partir das etapas de beneficiamento, mantiveram o uso da técnica de aterros hidráulicos aplicada à disposição de rejeitos (Ribeiro et al., 2009).

Rejeitos com 40 a 50 % de sólidos apresentam características de fluidos e, desta forma, por meio de tubulações, podem ser bombeados ou levados pela ação da gravidade até às barragens de rejeitos. Os rejeitos podem ser distribuídos a partir de diferentes métodos de descarga, sendo que a escolha desses métodos pode afetar decisivamente a forma como o depósito de rejeitos se estabelece dentro do represamento (ICME, 2008).

São quatro os métodos de disposição mais comuns utilizados em barragens de rejeitos:

- descarga de único ponto: geralmente a descarga é feita na extremidade oposta da tubulação que vem da usina de concentração. É bastante empregado quando a descarga de rejeitos é feita de montante para a jusante, ou seja, não é feita a partir da crista. Esse método não é recomendado quando a intenção é manter a linha freática e/ou a fração fina do rejeito longe do barramento (EPA, 1994).

- descarga em vários pontos por espigotes: técnica que consiste na utilização de várias tubulações de menor diâmetro ligadas à tubulação principal de rejeitos e espaçadas de forma regular, com a finalidade de se obter uma vazão constante ao longo da crista da barragem e criar uma praia mais uniforme. Na maioria dos casos, a utilização desta técnica faz com que a fração mais grossa do rejeito se instale perto do ponto de descarga e a fração mais fina seja progressivamente depositada ao longo do depósito, fazendo com que a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento e a densidade dos sólidos depositados diminuam com o aumento da distância em relação ao ponto de descarga. Essa medida ajuda a manter a superfície freática afastada da barragem (Vick, 1983).
- descarga com barras aspersoras tipo “*spray bars*”: nesta técnica, tubulações com pequenos furos distribuídos em toda a sua extensão são dispostas longitudinalmente ao longo da praia, com o objetivo de reduzir a pressão de lançamento do rejeito na barragem e, desta forma, diminuir o arraste de partículas e melhorar a segregação hidráulica dos rejeitos;
- descarga com ciclonagem: a ciclonagem é um método utilizado para a separação da fração grossa do rejeito. Os hidrociclones são dispositivos mecânicos simples que utilizam a força centrífuga para extrair a fração grossa do rejeito. Essa técnica é bastante atrativa para as mineradoras, pois o rejeito grosso pode ser usado como material de construção nos sucessivos alteamentos da barragem e com isso o custo referente à exploração de áreas de empréstimo é bastante reduzido. Outra vantagem que esta prática proporciona é a redução do volume dos rejeitos a serem depositados, uma vez que a fração grossa será utilizada no próprio corpo da barragem (EPA, 1994).

2.2.1 - Barragens de rejeitos

Os rejeitos são retidos com a ajuda de barragens, que podem ser construídas em apenas uma etapa ou também por meio de alteamentos sucessivos, que são executados de acordo com a necessidade da mineradora.

As barragens de rejeitos construídas em uma única etapa são chamadas de barragens tipo retenção de água (*water retention type*), sendo que os rejeitos só são depositados após a construção total da barragem. As técnicas construtivas utilizadas para esse método são bastante semelhantes às que são utilizadas em barragens convencionais. Entretanto, esse

método não é muito utilizado por questões econômicas e é indicado apenas para locais onde há grande incidência de água pluvial (Vick, 1983).

A forma mais comum para a disposição de rejeitos é construindo um dique de partida capaz de armazenar cerca de 2 a 3 anos de produção de rejeitos, e quando há a necessidade de armazenamento de mais rejeitos, são realizados os alteamentos. Os alteamentos, na maioria das vezes, são realizados a partir de três métodos construtivos distintos (Figura 2.1): método de montante, método de jusante e método de linha de centro, utilizando solos de áreas de empréstimo, materiais estéreis ou até mesmo o próprio rejeito (Zardari, 2011).

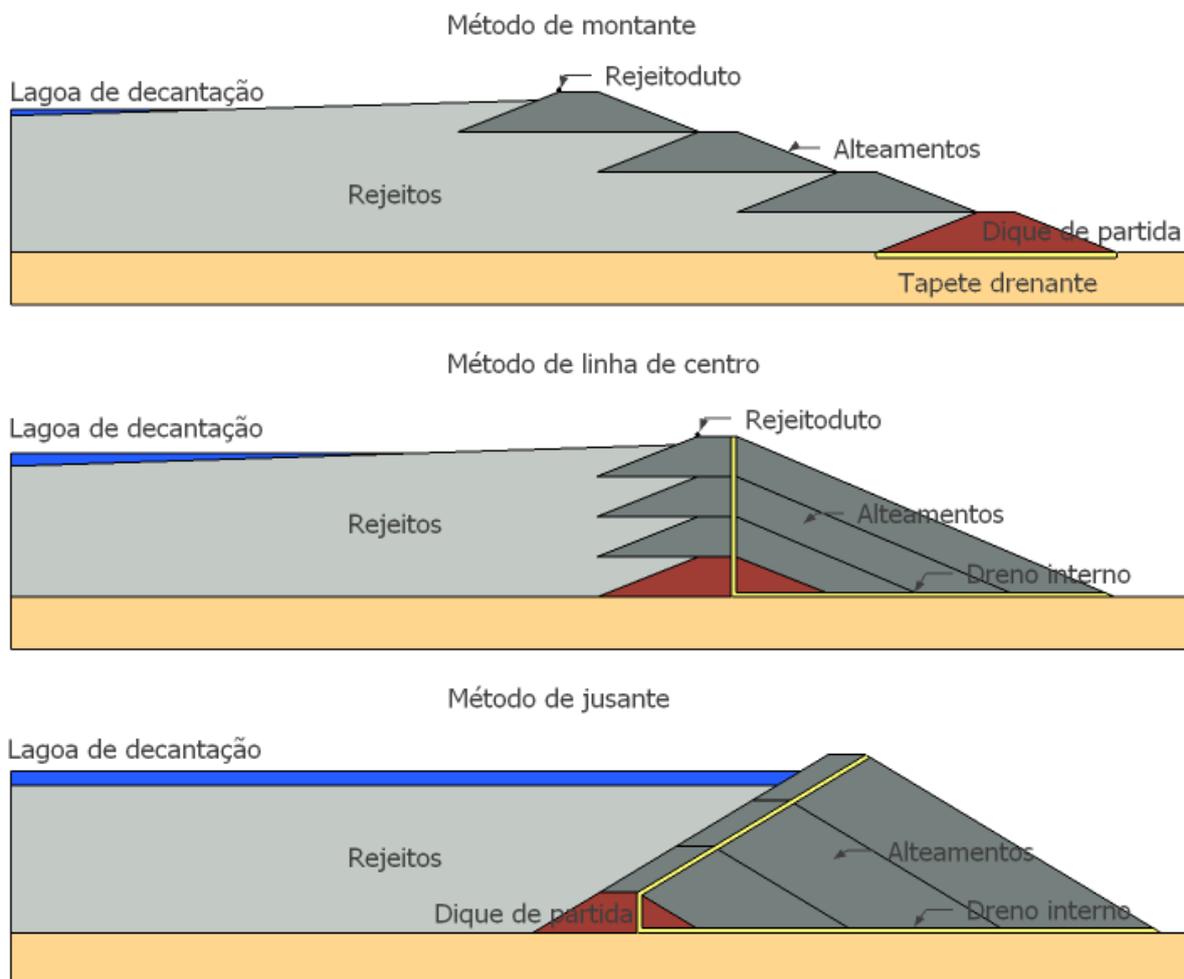


Figura 2.1 - Métodos construtivos de barragens de rejeitos (modificado - Gomes, 2009).

No método de montante os rejeitos dispostos são aproveitados como fundação do próximo alteamento, reduzindo o custo da obra. O dique de partida possui um controle

construtivo melhor, com materiais permeáveis que permitem a drenagem de água e controlam a erosão. Quando o reservatório está quase cheio, um novo alteamento é executado sobre o rejeito a montante do dique construído anteriormente. De acordo com a necessidade, o processo se repete até a elevação final prevista, com o eixo da crista sempre se deslocando para montante (Vick, 1983). Esse método construtivo é simples e econômico, mas é comum que se encontre dificuldades para controlar a superfície freática nos taludes e a capacidade de armazenamento de água, bem como é bastante vulnerável à liquefação (Zardari, 2011).

O método de jusante, como o próprio nome diz, consiste no alteamento da barragem para jusante. Comparado com o método de montante, a barragem não é alteada sobre o rejeito depositado, promovendo um controle melhor da compactação e da percolação, pois permite a instalação de sistemas de drenagem durante a elevação do aterro, o que proporciona uma maior resistência à liquefação. É o método mais oneroso, pois necessita de grandes áreas e volumes controlados de aterro (Vick, 1983).

O método de linha de centro é uma solução intermediária entre os métodos de montante e de jusante e, desta forma, possui vantagens e desvantagens em relação aos mesmos. Sendo assim, este método também permite um bom controle da drenagem interna e da compactação do aterro, o que proporciona uma boa resistência sísmica. Entretanto, pode ocorrer uma ruptura devido à liquefação na pequena porção que é construída sobre o rejeito a montante, mas a parte central e o talude de jusante, teoricamente, permanecem seguros (Vick, 1983).

Também é bastante comum a mineradora optar por uma variação de métodos de alteamento, combinando dois ou mais métodos (Duarte, 2008). Geralmente esse procedimento é adotado quando não há mais espaço disponível a jusante, quando se tem disponível pouco material de construção de aterro, ou ainda quando há a necessidade de melhorar a estabilidade do barramento. Nesses casos, quando não há área disponível a jusante ou quando há pouco material de aterro disponível, é utilizado o alteamento pelo método de montante. Quando a intenção é aumentar o fator de segurança da barragem, é utilizado o alteamento pelo método de jusante ou linha de centro.

Independente do tipo de alteamento escolhido para a construção do sistema de disposição de rejeitos, a configuração do represamento pode variar de diversas formas, sendo as mais comuns: represamento em vale, em dique fechado, em meia encosta e em fundo de

vale. A seguir será apresentada uma breve caracterização das configurações que podem ser escolhidas para os represamentos.

2.2.2 - Configurações dos represamentos

As configurações são escolhidas considerando, basicamente, as condições e a topografia das áreas disponíveis e os fatores econômicos. A maioria das barragens de rejeitos é disposta em vales, em parte por ser um método que pode ser utilizado em praticamente qualquer depressão no terreno, e também pela economia de material de aterro nesses tipos de barragens, uma vez que as ombreiras do vale fazem parte da contenção dos rejeitos e então não é necessário realizar alteamentos laterais. O processo construtivo é bastante semelhante ao de uma barragem convencional, ou seja, a barragem conecta um lado do vale ao outro. O represamento em vale pode ser simples ou múltiplo, conforme mostrado na Figura 2.2 (EPA, 1994).

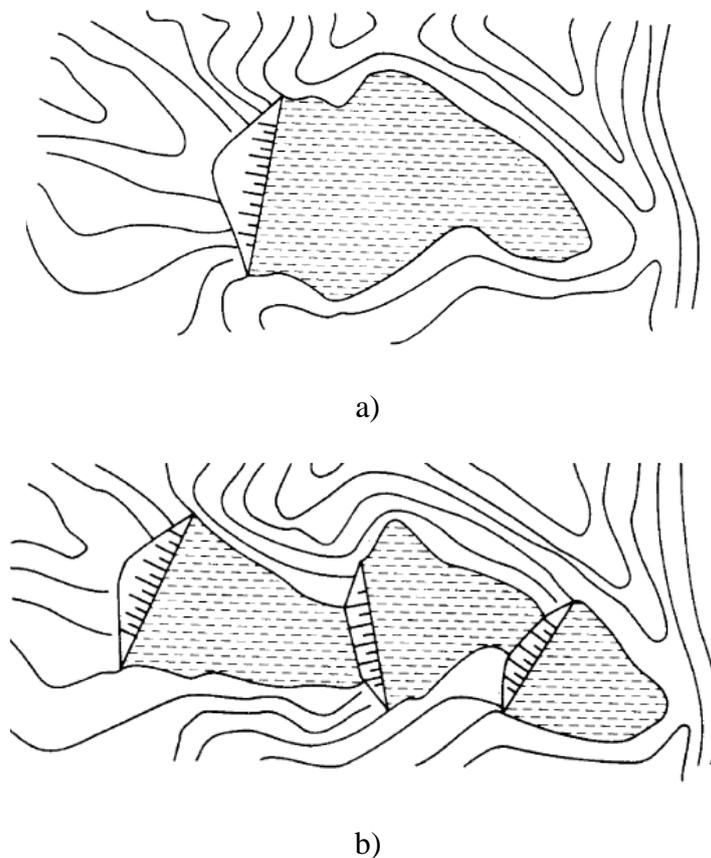


Figura 2.2 - Represamento em vale: a) simples; b) múltiplo (Vick, 1983).

Há também o represamento em meia encosta e em fundo de vale. O represamento em meia encosta consiste na construção de uma barragem de três lados contra um talude levemente inclinado, sendo que o recomendável é que o talude tenha até 10% de inclinação (Figura 2.3 a). Entretanto, se a área de drenagem do vale for muito grande para a construção de um barramento convencional e for muito inclinado para a construção de um depósito em meia encosta, também são utilizados os represamentos de fundo de vale, acompanhando a linha de drenagem ou desviando a mesma, conforme indicado na Figura 2.3 b (EPA, 1994).

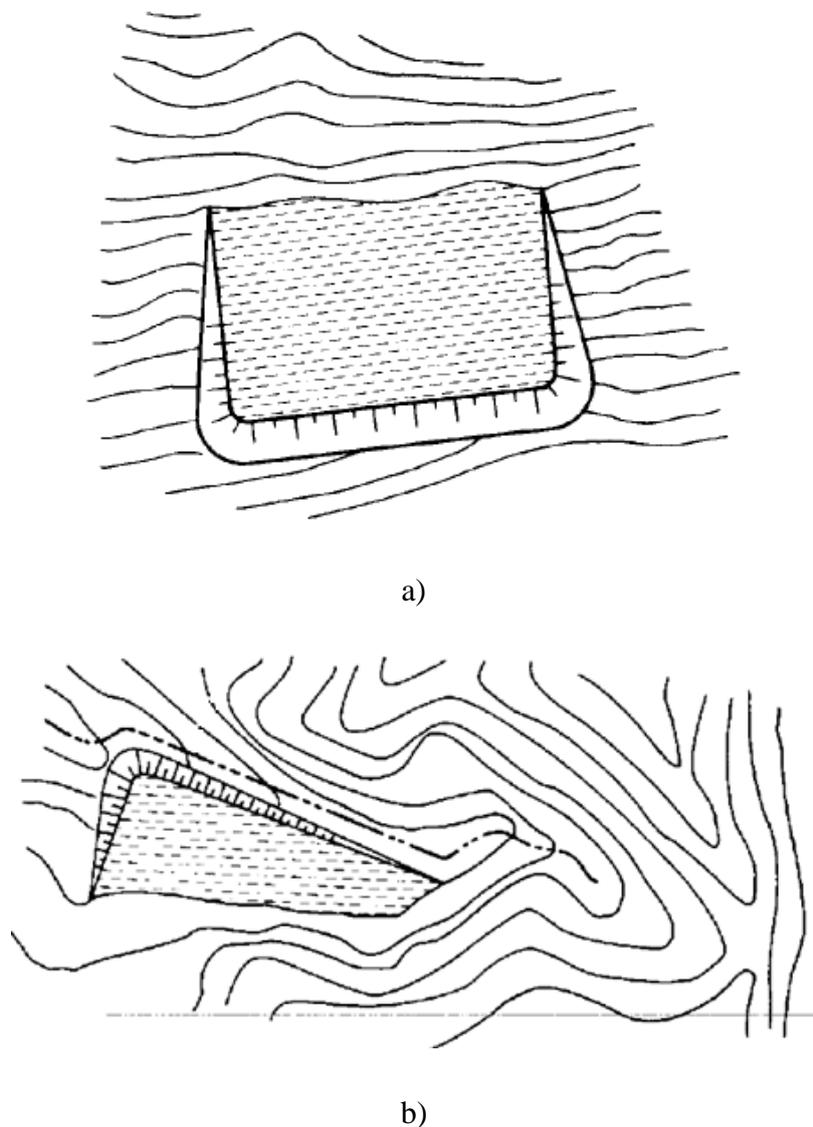


Figura 2.3 - a) Represamento em meia encosta; b) Represamento em fundo de vale (Vick, 1983).

Quando a topografia do terreno não possui depressões, pode-se utilizar o represamento em diques fechados, onde é construído aterros em todos os lados para fazer a contenção dos rejeitos (Figura 2.4). Como é necessária uma grande quantidade de material para a construção da barragem, é comum que a área de empréstimo seja dentro do próprio represamento (EPA, 1994).

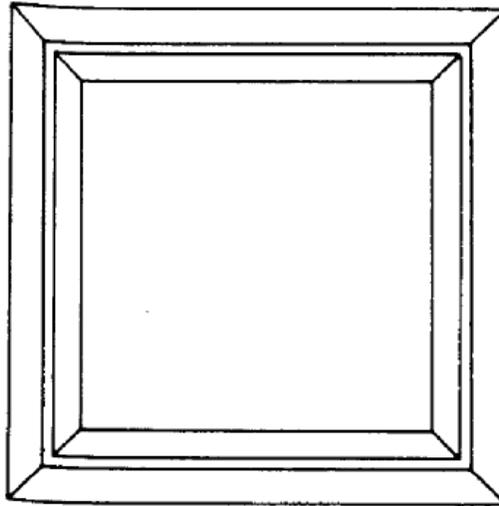


Figura 2.4 - Depósito em dique fechado (Vick, 1983).

2.3 – ESTUDO DOS PRINCIPAIS MECANISMOS DE FALHA EM BARRAGENS DE REJEITOS

Para o estudo do comportamento das barragens de rejeitos, seja frente às condições normais de operação ou a eventos extremos, faz-se necessário o conhecimento dos principais modos de ruptura que essas estruturas estão sujeitas para que os julgamentos e avaliações sejam precisos e, na prática, as correções e melhorias possam ser executadas de forma correta a fim de tornar a barragem mais segura. A seguir serão apresentados os principais fatores que podem influenciar na estabilidade do barramento, bem como as práticas usualmente adotadas para o controle de cada situação.

De todos os fatores que influenciam na ruptura de barragens de rejeitos, a drenagem, tanto interna como externa, está presente em praticamente todos os mecanismos de falha. Segundo o ICOLD (2001), a falta de um acompanhamento hidrológico efetivo é uma das

causas mais comuns para a ocorrência de falhas em barragens de rejeitos. Analisando casos históricos, constata-se que a maioria dos acidentes ocorreu devido a galgamentos, instabilidade de taludes, erosões internas (*piping*) e ações externas, todos sob a influência da falta de um monitoramento e controle adequado dos níveis dos reservatórios e da superfície freática dentro dos depósitos.

Alguns mecanismos de falha, suas causas e potenciais medidas de estabilização e de restrição à ruptura foram reunidas por Zardari (2011) e são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Alguns mecanismos de falha em barragens de rejeitos, suas causas e ações que podem ser tomadas (modificado - Zardari, 2011).

Mecanismo de falha	Causa	Ações que podem ser tomadas
Instabilidade de taludes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobrecarga da fundação e/ou do depósito de rejeitos; ▪ Controle inadequado de poropressões. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medidas de reforço do solo; ▪ Instalação de trincheira drenante no pé do talude de jusante e/ou execução de drenos horizontais. ▪ Suavização dos taludes
Erosão interna (<i>piping</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Controle inadequado da superfície freática e da percolação; ▪ Projeto de drenagem ineficiente e/ou filtro de má qualidade; ▪ Projeto ou controle construtivo mal feito, resultando no aparecimento de rachaduras e vazamentos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Realizar um alteamento para a jusante e implantar um tapete drenante; ▪ Executar sondagens horizontais para aliviar a pressão; ▪ Instalação de trincheiras drenantes.
Galgamento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Projeto hidrológico ou hidráulico inadequado; ▪ Nível de água do reservatório muito próximo da crista da barragem. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Construção de vertedouros de emergência; ▪ Abrir decantadores e ligar bombas de emergência;
Erosão externa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inclinação do talude e pé da barragem inadequados. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plantar vegetação no talude de jusante; ▪ Depositar uma camada de estéril na face do talude de jusante; ▪ Construção de bermas no talude de jusante; ▪ Implantar enrocamento de pé no talude de jusante

2.3.1 – Instabilidade de taludes

Uma ruptura ocorre quando a tensão de cisalhamento atuante em uma superfície que delimita uma massa de solo supera a resistência ao cisalhamento do material. O que determina o início de uma ruptura são alguns eventos de naturezas diversas, mas em barragens de rejeitos, existem duas situações mais comuns que provocam a instabilização de um talude (Oldecop & Rodríguez, 2006):

- elevação e aproximação da superfície freática do talude de jusante;
- elevação das poropressões durante as etapas de alteamento pela passagem de maquinário pesado e durante o trabalho de disposição dos rejeitos (taxas de disposição excessivamente altas não permitem a dissipação das poropressões).

2.3.1.1 – Instabilidade de taludes provocada por acréscimos de poropressão

A ruptura do talude de uma barragem de rejeitos em si, pode não ter consequências associadas à perda de vidas. O problema é que a ruptura possibilita que o material retido seja liberado, o que pode causar um grande dano ambiental.

O acréscimo de poropressões em barragens de rejeitos pode ser induzido pelos seguintes fatores (Oldecop & Rodríguez, 2006):

- alteamento da barragem;
- processo de disposição de rejeitos sem o devido controle da taxa de disposição;
- trânsito de maquinário pesado;
- vibrações causadas por detonações;
- terremotos.

Os dois primeiros casos referem-se a carregamentos estáticos e os três últimos são carregamentos dinâmicos. No caso estático, o acréscimo de poropressão desenvolvido ocorre pelo alteamento da barragem ou disposição de rejeitos de forma rápida, sem permitir a dissipação das poropressões no interior do depósito ou da barragem. Nesses casos, existem as

poropressões iniciais, os acréscimos de poropressão e a poropressão induzida pelo cisalhamento (Vick, 1983).

Na Figura 2.5 são ilustradas essas condições de poropressão, sendo que os parâmetros utilizados são definidos como: γ_w é o peso específico da água, γ é o peso específico da camada de solo, H é a espessura da camada de solo e D é a profundidade do ponto analisado em relação à superfície freática.

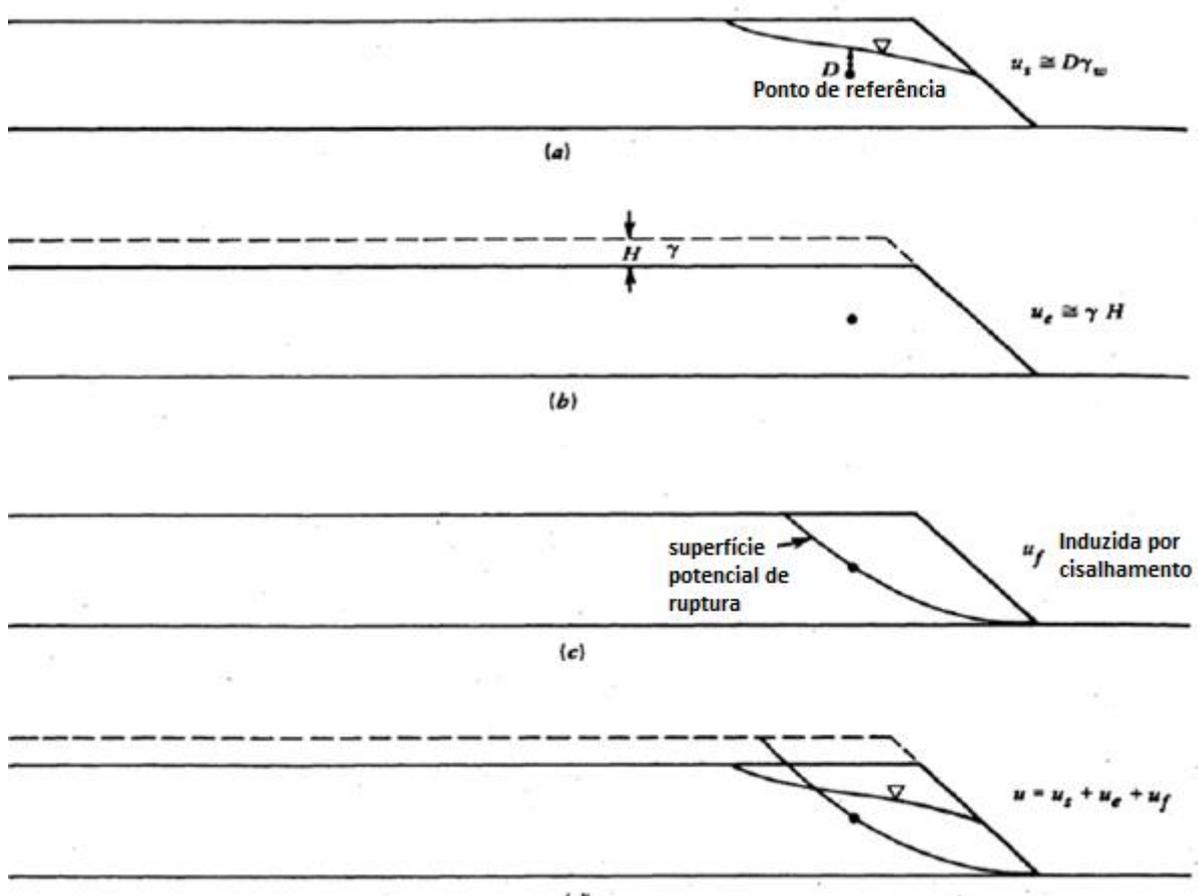


Figura 2.5 - Condições de poropressões: a) poropressão inicial; b) acréscimo de poropressão; c) poropressão induzida pelo cisalhamento; d) combinação das poropressões (Vick, 1987).

As poropressões iniciais (u_s - Figura 2.5 a) são aquelas que resultam simplesmente do fluxo de infiltração na barragem, ou seja, sem a interferência de cargas externas. A poropressão inicial em determinado ponto é assumida como a profundidade desse ponto em relação à superfície freática multiplicada pelo peso específico da água.

Os acréscimos de poropressões (u_e - Figura 2.5 b) poderão ser desenvolvidos nos rejeitos, na fundação ou na barragem, cujo coeficiente de permeabilidade é baixo ao ponto de não permitir a dissipação da poropressão, podendo ocorrer durante um carregamento causado por um alteamento ou até mesmo pela disposição rápida dos rejeitos. De uma forma semelhante, as poropressões induzidas pelo cisalhamento (u_f - Figura 2.5 c) são causadas pela movimentação rápida da massa de solo durante a ruptura (Vick, 1983).

2.3.1.2 – Instabilidade de taludes provocada pela elevação da superfície freática

Um dos parâmetros de segurança fundamentais das barragens de rejeitos é o controle da superfície freática dentro do depósito. Como foi analisado anteriormente, o método mais correto e comum de se realizar a descarga dos rejeitos é da crista da barragem para montante, fazendo com que as partículas mais grossas fiquem próximas à crista e as mais finas mais próximas do nível de água do reservatório. Entretanto, as variações de posição e tamanho das partículas fazem com que o reservatório seja extremamente anisotrópico com relação à permeabilidade (ICOLD, 2001). Deve-se ter em conta também que a permeabilidade não depende somente da granulometria, mas também da forma de disposição e das propriedades hidromecânicas do material e do nível de confinamento do depósito (Rodríguez, 2002).

Na Figura 2.6 é possível observar diferentes fatores que afetam o comportamento da superfície freática dentro de um depósito de rejeitos.

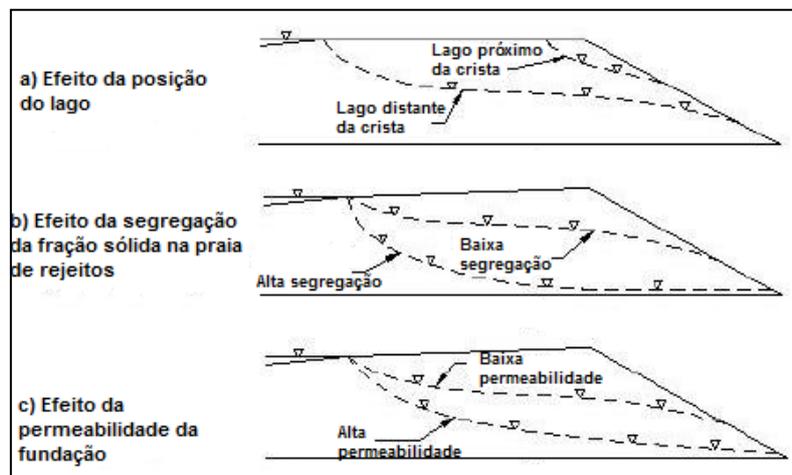


Figura 2.6 - Alguns fatores que influenciam a posição da superfície freática dentro de um depósito de rejeitos.

2.3.1.3 – Instabilidade provocada por problemas em fundações

As características geotécnicas das fundações, mais precisamente parâmetros como resistência ao cisalhamento, compressibilidade, permeabilidade e resistência à erodibilidade, devem ser considerados com muito critério em um projeto de barragem, pois as alternativas adotadas para a execução deverão ser subsidiadas pela interação da barragem com a fundação (Assis et al., 2003).

O problema envolvendo a construção de barragens sobre solos com características geotécnicas desfavoráveis é bastante comum, pois os locais de construção, geralmente fundo de vales e baixadas, são locais onde se encontram formações geológicas constituídas de solos moles, compressíveis e permeáveis.

Geralmente, quando a resistência ao cisalhamento dos solos de fundação é menor do que a resistência dos materiais do aterro da barragem, a integridade dos taludes da barragem dependerá da fundação, pois as superfícies potenciais de ruptura tenderão a passar pela fundação. Entretanto, quando a resistência da barragem é menor ou igual à resistência da fundação, a integridade da barragem dependerá somente da resistência de seus taludes. Esses fatores influenciarão em algumas decisões de projeto, como a condição rigorosa que deve ocorrer o controle construtivo do maciço e também se deverá ou não serem tomadas alguma das seguintes medidas (Assis et al., 2003):

- remoção parcial ou total da camada de baixa resistência;
- execução de taludes mais abatidos e/ou bermas de equilíbrio;
- utilização de métodos de melhoria do solo de fundação, como a construção de drenos, no caso de argilas moles saturadas.

Segundo Assis et al. (2003), basicamente há três situações que podem demonstrar toda problemática envolvida em projeto de barragens sobre fundações em solos:

- barragens sobre solos moles: procura-se assegurar a estabilidade da barragem e controlar o aparecimento de trincas devido à compressibilidade da fundação. A instrumentação da fundação com piezômetros e medidores de recalque é de fundamental importância para a avaliação da barragem durante sua etapa de construção, sendo que o ritmo de elevação (alteamentos) pode ser controlado conforme ocorra a dissipação das poropressões. Em barragens de rejeitos, a constante elevação do aterro por alteamentos

sucessivos e o alto peso específico dos rejeitos fazem com que o controle das poropressões no depósito e na fundação seja ainda mais importante;

- barragens sobre solos permeáveis: procura-se verificar a quantidade de água que será perdida pela fundação e a magnitude das forças de percolação. Duas premissas resumem as medidas de prevenção a serem adotadas nesses tipos de fundações, que é a de evitar a percolação de água aonde não se deseja e, se acontecer, promover meios que facilite, o máximo possível, a saída de água dessa região. Essas medidas são necessárias para evitar elevadas forças de percolação, sub-pressões e presença de água nas fundações do talude de jusante. Em barragens de rejeito, em alguns casos, evitar que a água percole dos rejeitos para a fundação é fundamental, pois muitas vezes o rejeito contém produtos químicos e elementos que podem contaminar o lençol freático e as águas da região;
- barragens sobre solos porosos e colapsíveis: possuem alto grau de porosidade e baixa umidade e, em geral, baixo grau de saturação. Possuem uma estrutura instável, de forma que quando são saturados, essa estrutura colapsa causando recalques acentuados. São extremamente compressíveis e muito pouco resistentes em relação à erodibilidade.

No caso de barragens construídas diretamente sobre fundações rochosas, subentende-se que o material possui uma resistência muito superior do que uma fundação em solo, mas é preciso ter um pouco de cautela quanto a isso, pois a construção da barragem normalmente é feita de forma mais econômica, com taludes mais íngremes, por exemplo. Portanto, é fundamental que seja feita uma investigação criteriosa da rocha para verificar a sua qualidade, grau de fraturamento, presença de falhas, dissoluções (calcários), etc. Nestes casos é importante se considerar não só apenas a resistência da rocha, mas a qualidade do maciço rochoso, que seria a rocha com suas descontinuidades.

Em relação aos problemas verificados em fundações de barragens de rejeitos por meio de casos históricos, pode-se constatar que, em sua maioria, são os mesmos problemas observados em barragens convencionais usadas na retenção de água. Porém, certos aspectos peculiares fazem com que esses problemas sejam mais complicados na realidade da disposição de rejeitos, como a construção em etapas e o elevado peso específico das partículas sólidas e dos rejeitos armazenados (Oldecop & Rodríguez, 2006).

Segundo o ICOLD (2001), na maioria dos acidentes em barragens de rejeitos envolvendo problemas de fundação, a construção das barragens ocorreu sobre camadas superficiais de argila e aluviões ou rochas de pouca resistência que, combinada com as altas

tensões impostas pelo depósito e seus alteamentos e o fluxo de água pela fundação, provocaram acréscimos na poropressão que diminuíram a resistência ao cisalhamento e levaram a camada à ruptura.

Diante do exposto, pode-se concluir que os problemas em barragens de rejeitos originados pelas características das fundações estão, de certa forma, relacionados com as investigações realizadas no local antes da construção da barragem, ou seja, se a fundação apresentava uma fraqueza, essa deveria ser identificada durante os trabalhos de reconhecimento do subsolo. Entretanto, independentemente de uma investigação adequada, o projetista da barragem pode não considerar todas as hipóteses informadas no relatório de investigação (ICOLD, 2001).

2.3.2 – Falhas por galgamento

Basicamente, a ruptura por galgamento está associada à erosão do talude de jusante de uma barragem construída com material granular, causada pela água vertendo por cima de sua crista, provocando uma brecha retrogressiva.

Os motivos das falhas por galgamento em barragens de rejeitos geralmente são similares aos causados nas barragens convencionais, mas as circunstâncias que desencadeiam esse tipo de falha são diferentes. Muitas barragens de rejeitos, pelo fato de seus materiais armazenados apresentarem características que prejudicam o meio ambiente, são projetadas de forma que a água armazenada não possa ser vertida. Se o depósito é na forma de diques fechados, as águas que devem entrar em contato com o depósito são somente as de origem pluvial. Nesse caso, a operação da barragem é um fator fundamental para evitar falhas por galgamento, pois uma operação inadequada pode diminuir os níveis de segurança do reservatório e torná-los perigosos. Entretanto, se o depósito for construído em vale, juntamente com um armazenamento de água, as previsões hidrológicas devem considerar o nível do reservatório no momento do evento, a área de influência da bacia hidrográfica e a intensidade das precipitações. Nessas barragens é comum a construção de estruturas de desvio, como canais ou túneis, para evitar que a água pluvial afete o depósito. Geralmente os problemas ocorridos nesses tipos de barragens estão relacionados com a obstrução ou mau funcionamento das estruturas de deságue (Oldecop & Rodríguez, 2006).

2.3.3 – Falhas por erosão interna e externa

O processo de erosão interna pode ocorrer devido às cargas aplicadas na barragem e/ou na fundação. Esse carregamento pode ser de origem (USBR, 2012):

- estática: causado durante a operação normal da barragem;
- hidrológica: relacionado ao nível do reservatório acima de sua operação normal em níveis emergenciais;
- sísmica (carregamento dinâmico): terremotos, vibrações e sismos induzidos provocam deformações e/ou fissuras que dão início ao processo de erosão interna.

O USBR (2012) apresenta alguns modos de falhas potenciais classificados quanto à localização física da erosão interna:

- erosão interna na barragem;
- erosão interna na fundação;
- erosão interna na barragem passando pela fundação.

Apesar desses modos de falhas referirem-se às barragens convencionais, algumas conclusões gerais podem ser aproveitadas para barragens de rejeitos. Segundo o USBR (2012), de uma forma geral, os principais componentes que tornam uma barragem suscetível à erosão interna é a resistência à erosão (plasticidade), a dispersibilidade do solo em questão e a carga hidráulica crítica, que é a energia hidráulica necessária para iniciar um mecanismo de erosão interna. Esse último fator relaciona os gradientes de infiltração e as velocidades presentes no aterro e/ou fundação, e determina se essas características são suficientes para induzir ou não o movimento de partículas.

Segundo Foster et al. (2000), a avaliação da segurança de barragens convencionais contra erosão interna tem sido baseada na falta de zoneamento das barragens, na natureza dos filtros (se existentes), no controle construtivo, nas condições das fundações e no desempenho que a barragem apresenta na sua operação, ou seja, considerando a variação da superfície freática na barragem, evidências de início de erosão interna, etc. Os mesmos autores propuseram uma metodologia para avaliar a probabilidade de ocorrência de piping, e parte dela consiste na atribuição de pesos para fatores que comprometem mais a estabilidade da barragem quanto à erosão interna. Mesmo que esse estudo tenha sido feito considerando casos

históricos de ruptura de barragens convencionais, algumas podem ocorrer em barragens de rejeitos e são mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Fatores que influenciam na probabilidade de falha por piping (Foster et al., 2000).

Fator	Fatores que influenciam na probabilidade de falha por piping				
	Muito mais provável	Mais provável	Neutro	Menos provável	Muito menos provável
Tipo de fundação	Fundação de solo	-	Rocha com fraturas preenchidas de argila ou rocha erodível	Rocha de melhor qualidade	Rocha não erodível e com fraturas fechadas
Geologia do solo de fundação	Solos dispersivos; cinzas vulcânicas	Solos residuais	Solos aluvionares: eólicos, coluvionares, lacustres ou marinhos.	Solos aluviais	Solos glaciais
Geologia da rocha de fundação	Calcário; dolomito; gipsita; basalto.	Tufo; riolito; mármore; quartzito.	-	Arenito; folhelho; siltito; argilito; lamito	Conglomerado; andesito; gabro; granito; gnaiss; xisto; ardósia; filito
Aspecto da água infiltrada	Vazamento lamacento e com aumentos súbitos	Vazamento aumentando gradualmente, limpo, sink-holes, areia movediça	Vazamento estável, limpo, ou não observado	Pequeno vazamento	Nenhum vazamento ou muito pequeno.
Poropressão	Aumento repentino nas pressões	Aumento gradual das pressões na fundação	Altas pressões na fundação	-	Baixa poropressão na fundação

De forma similar, as erosões externas dependem do tipo do solo, da profundidade e velocidade do fluxo, da geometria e proteção do terreno, e da presença ou não de vegetação. Geralmente ocorrem nas seguintes fases (USBR, 2012):

- erosão superficial, com remoção da vegetação ou da proteção implantada no terreno;
- erosão em fluxo concentrado (formação de ravinas);
- progressão da erosão (avanço das ravinas);
- formação de uma brecha no talude.

As erosões na face dos taludes de jusante causadas por fortes chuvas podem comprometer seriamente uma barragem de rejeitos. A formação de ravinas nos taludes e a variação do nível de água para jusante devido à elevação no nível do reservatório pela contribuição pluvial podem fazer com que a superfície freática aflore no fundo da ravina gerada. Então, o material do talude começa a ser levado pela água até que a inclinação do talude seja tal que permita o desenvolvimento de pequenas rupturas no local, que aumentam gradativamente à medida que o talude retroceda e o fluxo se eleve no maciço da barragem. Caso não sejam controlados, essas instabilizações aumentando até colocar em risco toda a barragem (ICOLD, 2001).

Portanto, o controle do regime hidrológico é fundamental para evitar a maioria das falhas ocorridas em barragens de rejeitos, bem como para controlar as erosões internas e externas. Algumas medidas corretivas podem ser observadas na Tabela 2.1, mostrada anteriormente.

2.3.4 – Falhas por carregamentos dinâmicos

As possíveis cargas dinâmicas no contexto das barragens de rejeitos podem ser causadas devido a explosões por plano de fogo, pelo movimento de máquinas pesadas na crista da barragem, pelo trânsito rodoviário ou ferroviário nas proximidades e por movimentos sísmicos causados por terremotos (Zardari, 2011).

Nos casos de acidentes históricos apresentados pelo ICOLD (2001), há rupturas causadas pela vibração ocasionada pelo tráfego de veículos (Maggie Pie, Reino Unido em 1970) e pela detonação de explosivos em locais próximos à barragem (Lower Silesia, Polônia em 1967). O primeiro caso envolveu o acréscimo de poropressões e o segundo o aparecimento de uma brecha devido à instabilidade do solo de fundação.

Os danos provocados por terremotos envolvem os efeitos diretos das forças de inércia sobre o talude e a diminuição da resistência e/ou rigidez do material pelo incremento de poropressão no caso de materiais saturados. No contexto de barragens de rejeitos, as forças de inércia geradas pelos movimentos sísmicos raramente provocam danos desastrosos, pois a resistência de atrito do material depositado é considerável, e o tempo de exposição a essas forças é bem curto e, portanto, os danos resumem-se em deslocamentos e rachaduras. As piores implicações causadas por terremotos consistem nos casos em que o material está

saturado e as tensões causadas pelo movimento sísmico fazem com que o material sofra alterações volumétricas. Se a tendência do material que foi submetido a esse carregamento for a de se contrair (material fofo), e se a permeabilidade do material for muito baixa, esse processo de carga ocorrerá em condições praticamente não drenadas. Esse aumento repentino na poropressão pode causar o fenômeno chamado de liquefação, onde o material liquefeito flui na forma de um líquido viscoso, resultando eventos catastróficos (Oldecop & Rodríguez, 2006).

Por isso, na construção dos aterros hidráulicos, além dos diversos pontos a serem considerados, um dos mais críticos é o estabelecimento da densidade do material que irá compor o aterro. Para a estabilidade da estrutura sob condições estáticas e dinâmicas, é fundamental a obtenção de uma densidade relativamente alta para evitar a formação de depósitos arenosos fofos e saturados (Ribeiro, 2000).

2.4 - CASOS HISTÓRICOS DE FALHAS EM BARRAGENS DE REJEITOS

É interessante obter um panorama do comportamento das barragens tomando por base as estatísticas de casos de rupturas históricas. Isso permite identificar os principais modos de falha e realizar o processo de aprendizado com os erros cometidos. Porém as estatísticas devem ser interpretadas criticamente, já que nem sempre refletem bem a realidade (Oldecop & Rodríguez, 2006).

Existe uma série de dificuldades para desenvolver estatísticas sobre o comportamento de barragens. Primeiramente não se sabe ao certo a quantidade dessas estruturas no mundo, seja ela para a disposição de rejeito ou para a retenção de água. Em segundo lugar, existe certa dificuldade em definir o que se entende por “falha” em barragens de rejeitos (Oldecop & Rodríguez, 2006). O ICOLD (2001) define cinco tipos de falhas:

- ruptura em barragens ativas;
- ruptura em barragens desativadas;
- acidentes em barragens ativas;
- acidentes em barragens desativadas;
- percolação excessiva de contaminantes.

Como pode ser observado, dentro de falhas se incluem todos os tipos de problema que podem ocorrer em barragens de rejeito. A ruptura seria o deslizamento ou colapso da estrutura e a consequente liberação incontrolada dos resíduos armazenados. Os acidentes seriam danos pontuais que poderiam ser controlados não resultando em um prejuízo significativo.

Nesse mesmo trabalho, o ICOLD (2001) publicou 221 eventos em barragens de rejeitos reportados até o ano 2000. As informações apresentadas variam dependendo do que foi reportado na época, sendo que muitos dados são desconhecidos, mas alguns incluem o nome da mineradora responsável, o tipo de minério extraído, o método de alteamento da barragem, o material utilizado nos filtros, a altura da barragem, o volume armazenado de rejeitos, o tipo de falha, a data da falha, o volume de rejeitos liberados e a distância percorrida pelos rejeitos. Todos esses dados foram obtidos com a ajuda do UNEP (United Nations Environment Programme) e do USCOLD (United States Committee on Large Dams), e a seguir, será apresentada uma avaliação que servirá como subsídio no estudo do comportamento das barragens de rejeitos.

Com o levantamento feito pelo ICOLD (2001), foi possível identificar e quantificar os possíveis mecanismos de falha de uma barragem de rejeito e, com isso, pode-se ter uma idéia da frequência de cada mecanismo e de suas particularidades, e assim, poder relacionar os aspectos que se deve levar em consideração nas avaliações de segurança (Oldecop & Rodríguez, 2006).

2.4.1 – Crescimento da atividade mineira

Analisando os dados da Figura 2.7, pode-se observar que a partir da década de 60 houve um aumento significativo no número de falhas que, aparentemente, podem ser atribuídos ao crescimento da atividade de mineração e o consequente aumento do número de barragens de rejeitos. Isso porque, da mesma forma que há um aumento brusco no número de falhas, também ocorre um aumento significativo da capacidade dos caminhões utilizados nas mineradoras, que neste caso, representaria o aumento da produção mineira (Oldecop & Rodríguez, 2006).

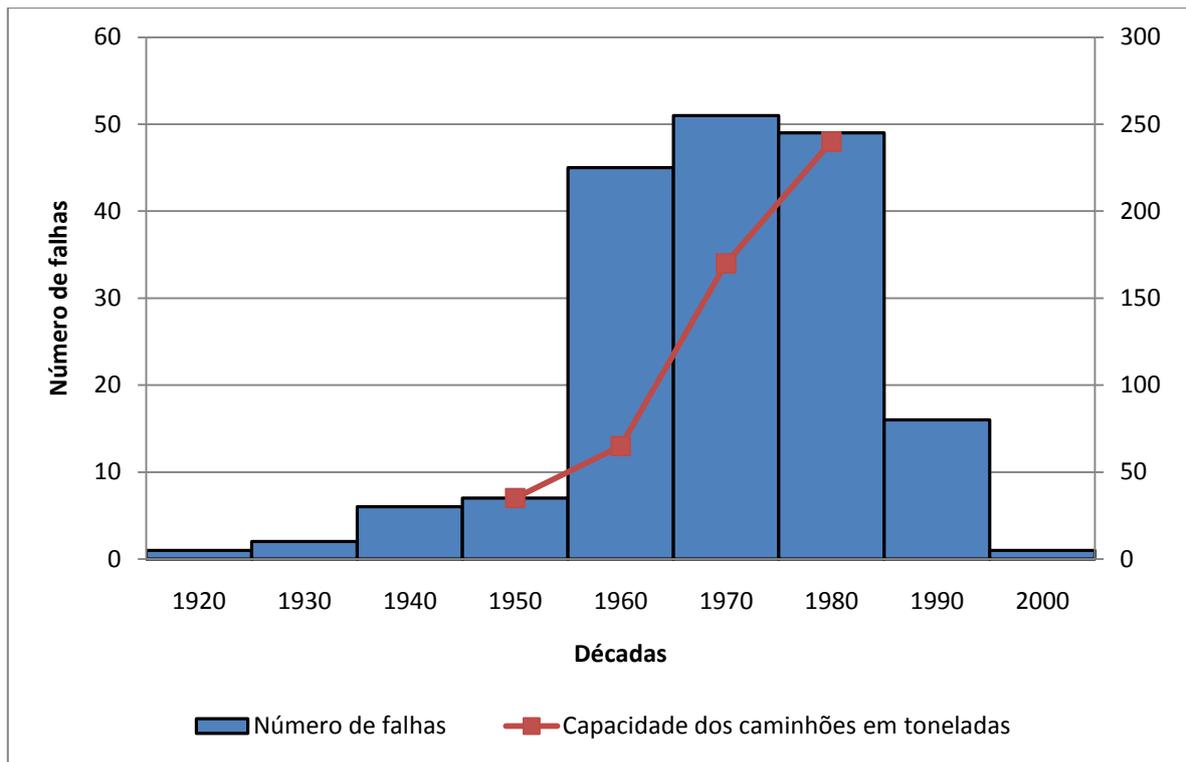


Figura 2.7 - Comparação entre o número de falhas por década x capacidade dos caminhões em toneladas (Oldecop & Rodríguez, 2006).

Entretanto, deve-se considerar que, anteriormente à década de 60, as informações a respeito de falhas eram bastante escassas; então, pode ser que tenham ocorrido mais casos, mas como o processo de informatização não era tão eficiente como é hoje em dia, essas falhas acabaram não sendo computadas. Em referência ao que foi citado, segundo o ICOLD (2001), a partir da mesma década, foi verificada uma melhoria na documentação dos processos de operação das atividades mineiras e, portanto, a evolução do processo de gestão das mineradoras contribuiu indiretamente para que a contagem do número de falhas fosse mais eficiente, e assim, aumentasse.

É possível observar ainda que, a partir da década de 90, as falhas diminuíram consideravelmente, mesmo com o constante crescimento das atividades mineiras. Isto pode ser explicado pelos esforços demandados pela ICOLD (1989) em destacar os riscos associados às barragens construídas no passado e em estabelecer diretrizes para a melhoria da construção e do controle destas estruturas. Portanto, a diminuição do número de acidentes pode ser atribuída ao aperfeiçoamento das técnicas de construção e operação das barragens de rejeitos.

2.4.2 – Altura das barragens de rejeitos

Analisando a Figura 2.8, referente à altura das barragens de rejeitos no momento das falhas, cerca de 55% dos casos registrados ocorreram em barragens com alturas inferiores a 20 m (ICOLD, 2001). Entretanto, 47% dos eventos reportados não informaram a altura da barragem de rejeitos, evidenciando que essa relação pode variar muito e não se pode tirar conclusões deste tipo de estatística.

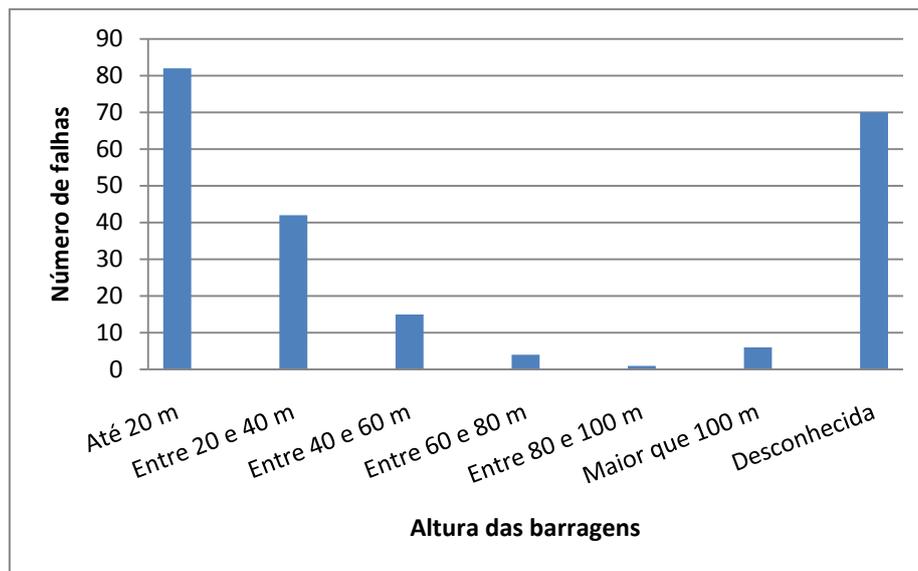


Figura 2.8 - Comparação entre falhas e altura das barragens de rejeito (ICOLD, 2001).

O problema em obter um parâmetro de vulnerabilidade diante desses dados é poder considerá-lo diante de tantas incertezas, entre elas a elevada quantidade de falhas em que não se possui dados sobre a altura da barragem (cerca de 47% dos casos). Outra incerteza fica por conta de não se saber ao certo a quantidade de barragens de rejeitos no mundo e seus respectivos dados de altura.

Deste modo, apesar da maioria das falhas ter ocorrido em barragens de rejeito inferiores a 20 m de altura, não se pode dizer que, necessariamente, essas barragens são mais vulneráveis. Como já foi visto, os principais fatores que afetam a estabilidade de uma barragem de rejeito são (ICOLD, 2001):

- a altura final e o ângulo do talude de jusante;
- a taxa de disposição e as propriedades dos rejeitos.
- a drenagem da barragem;

- influências sísmicas;
- inexistência de um controle hidrológico para evitar galgamento ou aumentos perigosos da superfície freática dentro do corpo da barragem.

Portanto, existe uma série de fatores que levam uma barragem de rejeitos à ruptura, sendo a altura final um parâmetro muito genérico para se obter alguma conclusão. Entretanto, a altura de uma barragem de rejeitos é importante para determinar a periculosidade que ela exerce, sendo que, quanto maior a altura, provavelmente maior será o dano causado caso ocorra algum acidente.

2.4.3 – Relações entre falha e os métodos construtivos adotados

Basicamente, é possível afirmar que o tipo de construção da barragem de rejeito exerce diferentes papéis em seu comportamento. O método de montante é um dos mais antigos e comuns, pois foram documentadas barragens construídas por este método na África do Sul no início de 1900. Pelo método de retenção de água (*water retention type*) são construídas barragens de terra similares às convencionais que são utilizadas tanto para a retenção de água quanto para a disposição de rejeitos. O método de jusante e o método de linha de centro foram desenvolvidos principalmente pela deficiência do método de montante em apresentar problemas estruturais, particularmente quando submetido à aceleração sísmica (ICOLD, 2001).

Conforme mostra a Figura 2.9, a maioria das falhas ocorreram em barragens alteadas pelo método de montante. Embora seja o método mais utilizado, o que de certa forma contribui para o elevado índice de eventos, o fato da elevação do barramento para a montante contribui para a diminuição da estabilidade do mesmo, pois prejudica o controle da compactação durante a construção e, principalmente, impede a instalação de sistemas de drenagem eficientes (Vick, 1983).

Apesar do método de linha de centro apresentar poucas falhas, deve-se considerar que este é um método relativamente novo, e assim, há poucas estruturas no mundo comparado ao número de barragens alteadas pelo método de montante (ICOLD, 2001).

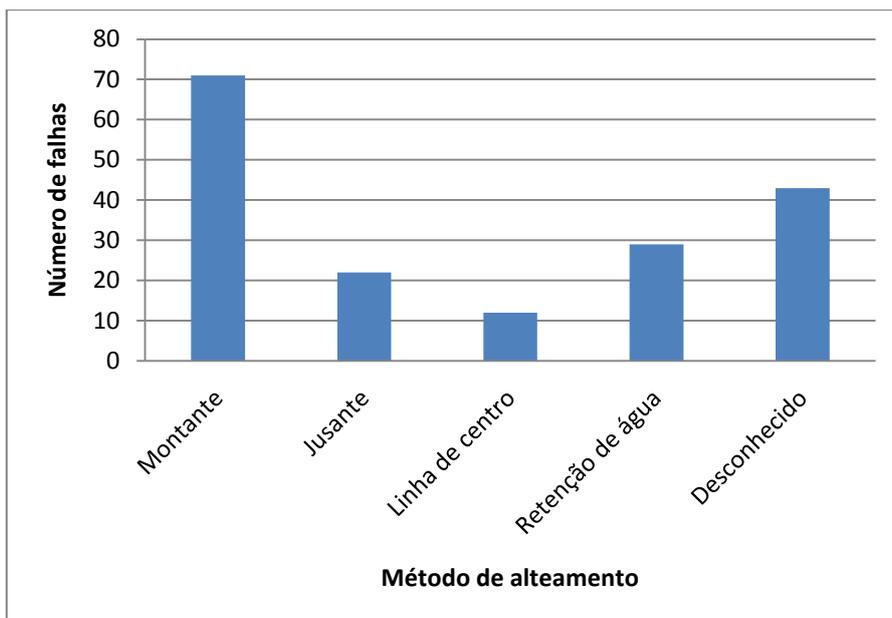


Figura 2.9 - Comparação entre o número de falhas e os métodos construtivos (ICOLD, 2001).

Da Figura 2.10 é possível obter conclusões um pouco mais fundamentadas, pois comprova que o método de montante, considerando o número de rupturas e acidentes, tenderia a ser o mais problemático. O método de jusante, considerado teoricamente o método mais seguro, possui mais rupturas que o método de linha de centro por, provavelmente, ser um método mais antigo e por existir mais barragens construídas com este tipo de alteamento em relação ao método de linha de centro.

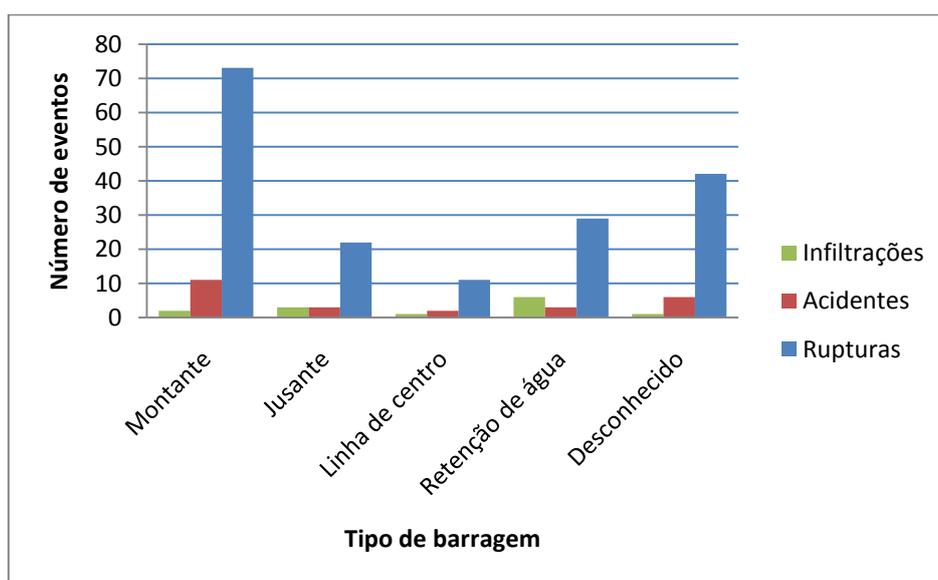


Figura 2.10 - Número de falhas x método construtivo e tipo de falha (ICOLD, 2001).

É importante frisar que estes dados são de frequências absolutas, o que torna o resultado tendencioso quando o mesmo é interpretado estritamente como a probabilidade de falha de determinado método construtivo, por exemplo. Para ser possível realizar uma comparação mais eficiente, seria necessário ter-se em conta o número total e as características de todas as barragens em operação no mundo, e mesmo que isso fosse possível, deve-se considerar que existem ainda muitas particularidades que determinam o acontecimento de uma falha.

2.4.4 – Principais mecanismos de falha verificados

Os eventos (rupturas + acidentes + percolação de contaminantes) foram divididos em oito categorias específicas em termos de suas causas prováveis:

- instabilidade de taludes;
- terremotos;
- galgamento;
- problemas de fundação;
- elevação do nível freático;
- dano estrutural;
- erosão externa;
- colapso causado por influência de minas subterrâneas.

Observa-se que, dentre os mecanismos de falha computados pela ICOLD (2001), também foram considerados os eventos sísmicos, que na verdade atuam como um gatilho e não como um mecanismo de ruptura. Os terremotos seriam como eventos hidrológicos, ou seja, podem atuar potencializando um ou mais mecanismos de falha na barragem, como uma instabilidade de taludes ou um dano estrutural, por exemplo. Portanto, como não foi possível reagrupar esses dados estatísticos, manteve-se nos dados apresentados a seguir os terremotos como um mecanismo de falha.

A Figura 2.11 resume as principais causas de falhas em barragens de rejeitos em relação

relação à sua situação. Em barragens ativas, as maiores causas de acidentes são: a instabilidade dos taludes do maciço, os terremotos e o galgamento. Em barragens desativadas, as causas mais frequentes são os terremotos e o galgamento.

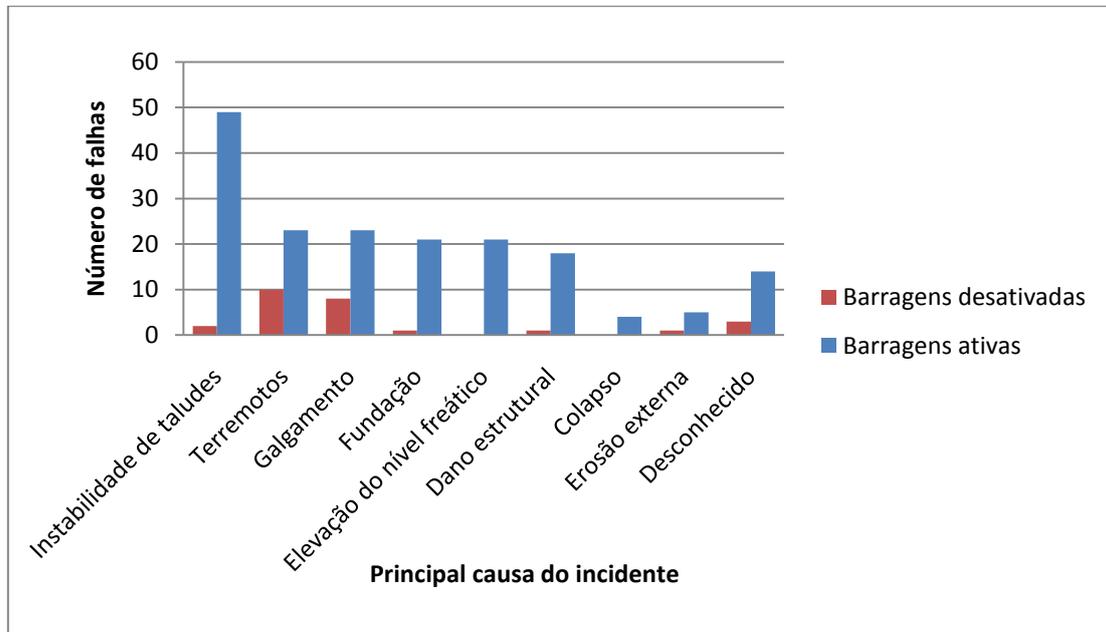


Figura 2.11 - Principais mecanismos de falha em relação à situação da barragem (ICOLD, 2001).

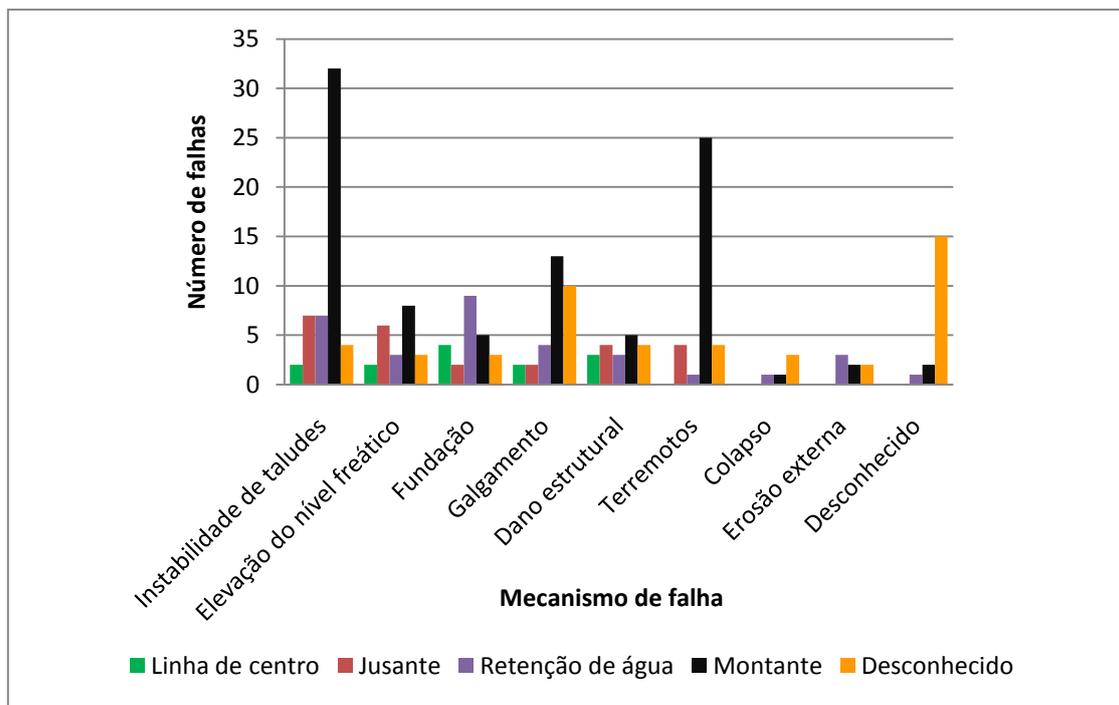


Figura 2.12 - Principais mecanismos de falha em relação ao tipo de barragem (ICOLD, 2001).

De forma semelhante à Figura 2.10, que relaciona a quantidade e causas das falhas com os tipos de barragens, a Figura 2.12 mostra que a instabilidade de taludes, os terremotos e o galgamento, especialmente em barragens alteadas pelo método de montante, são os fatores que mais causam rupturas, comprovando o que foi exposto no capítulo anterior.

2.4.5 - Comparação com barragens convencionais

As barragens de contenção rejeitos, como o próprio nome diz, são construídas com a finalidade de armazenar os resíduos da produção mineira e, quando possível, os próprios rejeitos são reaproveitados e utilizados como material para a sua construção e/ou ampliação. Essas estruturas e as barragens convencionais, utilizadas para a retenção de água, são bastante similares principalmente quando uma das finalidades da barragem de rejeitos é o armazenamento de água para o reaproveitamento no processo. Em alguns casos, dependendo do tipo de rejeito gerado, é utilizada uma lâmina de água com a finalidade de evitar a poluição atmosférica e a geração de drenagem ácida. Embora alguns métodos de construção possam ser aplicados para os dois casos, há também grandes diferenças entre ambos os tipos (ICOLD, 2001).

Chambers & Higman (2011) fazem uma série de comparações entre barragens de rejeitos e barragens construídas para a retenção de água. Os autores citam que as barragens convencionais são vistas como um recurso, diferente das barragens de rejeitos que é uma forma de disposição de um material que não será mais utilizado. Como resultado, as barragens para retenção de água recebem um maior padrão de controle na construção, operação e manutenção, e caso sua integridade estrutural se tornar questionável, é feito a sua drenagem e manutenção/desativação. Nas barragens de rejeitos, o processo construtivo é caracterizado pelos seus alteamentos em etapas, o que pode dificultar seu controle construtivo ao longo dos anos. A contaminação do subsolo e das águas (subterrâneas e superficiais) também é um fator a ser considerado nesta comparação. Muitas vezes esta contaminação é desencadeada pela drenagem ácida, que é uma solução ácida gerada quando minerais sulfetados são oxidados na presença de água, agindo como agente lixiviante dos minerais presentes no rejeito e produzindo um percolado rico em metais dissolvidos e ácido sulfúrico. Enfim, todos estes fatores anteriormente citados evidenciam que, mesmo que haja um controle construtivo

rigoroso nas barragens de rejeitos, estas estruturas são bastante complexas tanto do ponto de vista construtivo como do ponto de vista de gestão e controle.

Chambers & Higman (2011) comentam também que, mesmo com a pequena quantidade de barragens de rejeito em relação às barragens convencionais, as falhas em barragens de rejeitos têm ocorrido com muito mais frequência. Nos últimos 10 anos desde a publicação do artigo da ICOLD em 2001, a taxa de ruptura destas estruturas manteve-se em cerca de uma falha a cada dois anos. Uma possível explicação poderia ser a de que ainda se continua experimentando os efeitos das tecnologias e práticas antigas, embora tenham se passado 15 anos desde que a ICOLD iniciou estudos para investigar causas de falhas e buscar mudar as práticas de construção e operação convencionalmente adotadas.

A Figura 2.13, segundo dados publicados pelo UNEP (1998), apresenta a quantidade de rupturas de barragens de rejeitos e de barragens convencionais. Os valores compreendem aos 10 anos anteriores ao ano apresentado no eixo x. Por exemplo, as rupturas apresentadas no ano de 1919 são referentes ao intervalo de 1909 a 1919.

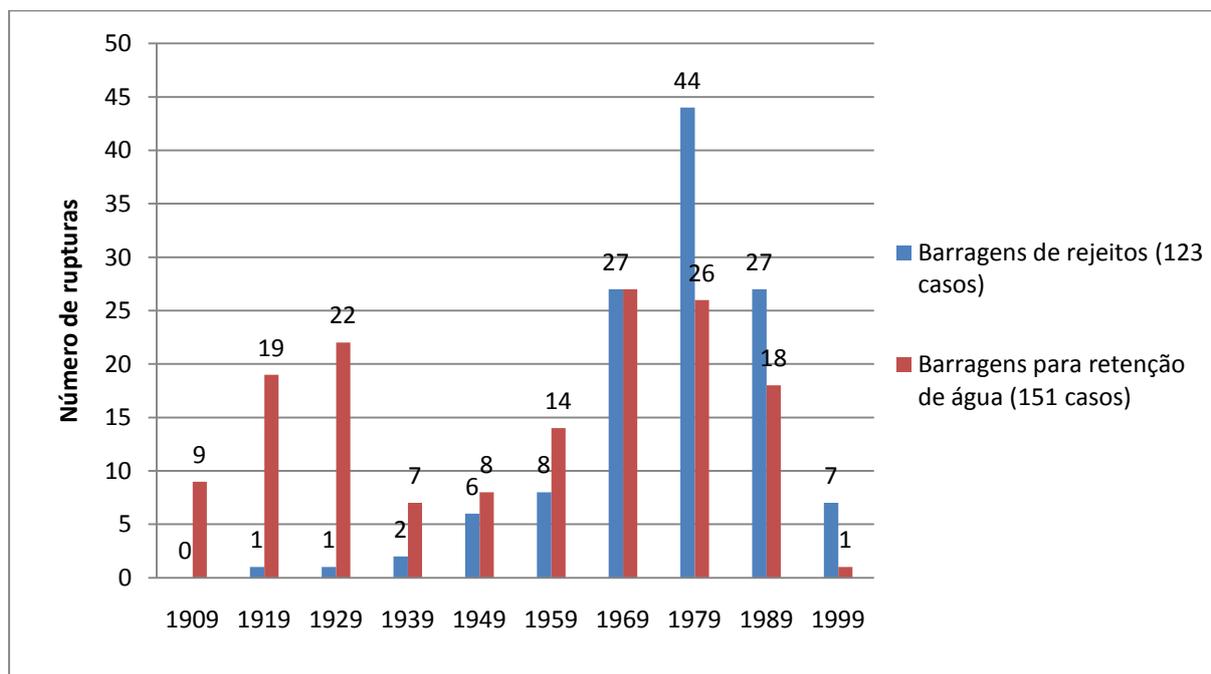


Figura 2.13 - Comparação entre o número de rupturas de barragens de rejeitos e barragens para a retenção de água (UNEP, 1998).

2.5 – IMPACTOS AMBIENTAIS DAS ATIVIDADES MINEIRAS E DA DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS

Os resíduos gerados nas atividades de mineração e beneficiamento mineral representam um grande risco para o meio ambiente e para os ecossistemas. Não é exagero considerar que, dentre todas as atividades antropogênicas, a mineração e seus desdobramentos representam uma das principais causas de contaminação do meio natural. Importantes consequências podem ser observadas em maior ou menor escala nas áreas do planeta onde são explorados minerais sólidos, líquidos ou gasosos. Geralmente ocupam uma extensão considerável afetando zonas agropecuárias, populações e áreas de proteção natural (Rodríguez et al., 2006).

A vulnerabilidade e fragilidade do território, assim como a natureza do recurso mineral extraído, as rochas hospedeiras, a dimensão das explorações mineiras, os métodos de extração e até as condições climáticas, influenciarão nas características e magnitude dos danos ambientais, mas de uma forma geral, a produção mineira pode causar impactos (Rodríguez & Acero, 2006):

- sobre os solos e, conseqüentemente, sobre a fauna e flora associadas;
- visuais;
- variação da topografia e morfologia do terreno criando depressões e elevações artificiais;
- sobre a atmosfera com a emissão de gases contaminantes, material particulado e calor;
- sobre o solo, sobre as diferentes massas de água e sobre o ar, com diferentes formas de energia (ruídos, radiações, calor, etc);
- demográficos, com o crescimento ou diminuição da população em determinado local.

Os recursos mais afetados são as águas (subterrâneas, superficiais e marinhas) e os solos, bem como os seus ecossistemas associados.

A intensa contaminação das águas é, em grande parte, devido à grande dependência do uso desse recurso natural que a atividade de mineração possui. Assim, o descarte dessas águas utilizadas sem o devido tratamento acaba provocando a contaminação das águas superficiais e

subterrâneas. A forma de contaminação mais importante é devido à introdução de substâncias solúveis no meio hídrico que pode acontecer de diversas formas, desde o uso de reativos nos processos de concentração e a descarga de efluentes ricos em metais pesados e outros compostos tóxicos, até a incorporação de substâncias radioativas na água, que é muito comum em minerações de urânio (Rodríguez & Acero, 2006).

A contaminação das águas acaba se tornando um problema para a sua posterior utilização no abastecimento da população, na agricultura e nas indústrias, da mesma forma que a degradação do solo, direta ou indiretamente, pode contaminar as águas e a atmosfera e afetar a saúde de plantas e animais. Em alguns casos os impactos são extremamente graves e de difícil restauração, e estão condicionados, principalmente, pela geração e má gestão de resíduos e efluentes nas plantas de exploração mineral, de beneficiamento, de concentração e de metalurgia (Rodríguez et al., 2006).

2.5.1 – O potencial de dano ambiental causado por rupturas em barragens de rejeitos

O efeito da ruptura de uma barragem de rejeitos pode trazer impactos de diferentes magnitudes, podendo afetar de distintas formas a economia, o meio ambiente, a saúde e a segurança das pessoas.

Quando ocorre uma ruptura em barragens de rejeitos, o material retido muitas vezes se liquefaz e pode percorrer distâncias consideráveis, destruindo florestas e estruturas, contaminando rios e, muitas vezes, causando mortes. Diferente da água, os rejeitos liquefeitos deixam depósitos em estradas que podem prejudicar gravemente os serviços de emergência. O fluxo de rejeitos causa um grande dano devido ao seu grande peso, muito maior do que o da água, e pode demolir edifícios ao invés de apenas fluir através deles (ICOLD, 2001).

A fração sólida do rejeito fino possui uma elevada superfície específica, uma das características que proporciona ao rejeito esse efeito catastrófico em casos de rupturas de barragens. Essa propriedade permite que a mistura sólidos-água (lama) se comporte como um fluido viscoso, fazendo com que o volume liberado se espalhe sobre grandes superfícies, cubra drenagens, obstrua tubulações, etc., devido ao pequeno tamanho das partículas, geralmente menor que 0,5 mm. A elevada superfície específica dos rejeitos, muito maior que na rocha de origem, expõe os rejeitos em contato com o oxigênio da atmosfera e permite uma maior velocidade de reação dos minerais sulfetados, e ainda pode ser catalizada e acelerada

por algumas bactérias comuns em todos os solos. O resultado desta oxidação na presença de água é a formação do ácido sulfúrico (aproximadamente 1,5 g de ácido para cada grama de pirita oxidada). Esta solução, chamada de drenagem ácida, torna-se um agente lixiviante dos minerais presentes no resíduo, dissolve os metais retidos na matriz do solo ou rocha e produz um percolado extremamente poluente para as águas subterrâneas e superficiais (Oldecop & Rodríguez, 2006).

2.5.2 – Acidentes com barragens de rejeitos no Brasil

Segundo a PMRG (2012), os acidentes mais graves ocorridos no estado de Minas Gerais foram no município de Nova Lima (Mineração Rio Verde) em 2001, em Rio Pomba no ano de 2003 e em Miraf em 2006 e 2007. O acidente em Nova Lima foi a causa da morte de cinco trabalhadores, resultou na perda de importantes equipamentos de mineração e em danos ambientais na região. Em Rio Pomba, houve o rompimento de uma barragem que despejou 1,2 bilhões de litros de rejeitos tóxicos nos rios Pomba e Paraíba do sul. Em Miraf em 2006, 400 milhões de litros de rejeitos atingiram um córrego da região e chegaram ao estado do Rio de Janeiro. Novamente no município de Miraf em 2007, uma nova ruptura teve como resultado o deslocamento de cerca de dois bilhões de litros de lama em alguns rios da região, deixando 30% da população da cidade desalojada e atingindo ainda outros quatro municípios.

A ICOLD (2001) publicou, em seu boletim nº 121, um acidente ocorrido no Brasil no ano de 1994 na Mineração Serra Grande na cidade de Crixás, Goiás. O motivo do acidente foi atribuído ao aumento do nível d'água no talude da barragem ocasionado pela ineficácia dos drenos e filtros instalados e pelas fortes chuvas ocorridas naquele ano. Assim, ocorreu um grande deslizamento, mas que não chegou a atingir a crista da barragem, e por isso, não houve a liberação de rejeitos. A mina ficou paralisada por três semanas até ser realizado reparos de segurança, o que resultou em uma perda de receita equivalente ao valor de 241 kg de ouro.

Em setembro de 2014 ocorreu a ruptura de uma das barragens de contenção de rejeitos da Mineração Herculano em Minas Gerais, causando a morte de três trabalhadores e a contaminação dos Córregos Silva e do Eixo e do Rio Itabirito. Por se tratar de um evento muito recente, suas causas ainda estão sendo investigadas.

A IMPORTÂNCIA DA GESTÃO DO RISCO

3.1 - INTRODUÇÃO

Conforme foi destacado anteriormente, uma ruptura em uma barragem de rejeitos muitas vezes pode resultar na liberação descontrolada do que estava armazenado, trazendo uma série de prejuízos para a população, para o meio ambiente e para o próprio empreendimento. A ICOLD (2001) enumera alguns tipos de consequências nas seguintes categorias:

- segurança Pública: a atenção da população está cada vez mais voltada para esses tipos de evento, de modo que uma catástrofe que pode afetar um grande número de pessoas é menos aceitável do que acontecimentos diários, de menor proporção que, no conjunto, acabam afetando mais pessoas que o evento de grande porte;
- consequências econômicas: nesta categoria incluem-se os custos de reparo do barramento e das instalações mineiras afetadas, e também o tempo em que a mineradora deve ficar parada por não possuir um local de disposição de rejeitos;
- desastre ambiental: a liberação descontrolada de grandes quantidades de rejeitos pode causar enormes danos ambientais, principalmente se o mesmo se apresentar tóxico. Existem também riscos incrementais associados a eventos de longo prazo, como a dispersão de poeiras, contaminação da água subterrânea e deslizamento ou instabilidade do terreno.

Ainda segundo a mesma referência, o processo da Gestão do Risco consiste, em primeiro momento, na execução de uma avaliação de risco para identificar os potenciais modos de falhas e suas consequências, um plano de gestão de riscos para reduzir os riscos por meio de projetos de melhoria ou mudanças nas atividades de operação, e um plano de contingência para que seja desenvolvida uma resposta ótima às possíveis falhas.

Num contexto geral, a gestão da segurança de barragens engloba tanto atividades sistemáticas simples e regulares, como inspeções de rotina e cumprimento de regras de funcionamento, como envolve também o desenvolvimento de investigações mais específicas

ou ensaios e obras de diferentes níveis de complexidade. A análise de risco, ferramenta utilizada na gestão da segurança de barragens, tem como objetivo final fornecer informações objetivas para auxiliar no planejamento de ações de segurança, identificando, assim, as estruturas que representam um maior risco (Escuder et al., 2007).

O processo de gestão da segurança envolve a tomada de decisões relacionadas à avaliação, verificação da tolerância e redução dos riscos. Os responsáveis pela barragem, proprietários e operadores, possuem a tarefa de programar e cumprir procedimentos de gestão que tenham a finalidade principal de melhorar a segurança e reduzir o risco (ICOLD, 2001).

Apesar do investimento em segurança que muitas vezes gera custos, é fundamental que haja um balanço entre o lucro e a segurança. O custo considerado eficaz na redução do risco envolve a definição de um nível de risco aceitável e a implementação dos planos de emergência que busquem assegurar que não haverá nenhuma perda de vida caso ocorra alguma ruptura. As abordagens para a redução do risco envolvem as melhorias estruturais para a barragem e obras auxiliares, melhoria da operação, do monitoramento e da manutenção. Há também as abordagens para a redução do risco aplicadas aos vales a jusante do barramento, que incluem a elaboração de mapas de inundação, a estimativa do tempo de chegada da onda de inundação em diferentes locais e a manutenção dos procedimentos e sistemas de emergência.

3.2 – AS ANÁLISES DE RISCOS

Qualquer comportamento fora do esperado em relação ao projeto de uma estrutura geotécnica que resulta em consequências indesejáveis para os proprietários é considerado uma falha. O risco de falha é determinado pelo potencial (probabilidade) de falha juntamente com a gravidade das consequências. As falhas podem ocorrer de diversas formas, variando de uma falha física resultando em ruptura, desmoronamento, deslocamento ou erosão; falhas químicas, resultando na geração e migração de contaminantes; falhas biológicas, resultando em prejuízos na vegetação ou impactos sobre peixes e fauna terrestre; ou falhas sociais, ocasionando a insatisfação de órgãos públicos e/ou regulamentadores (Robertson & Shaw, 2003).

O risco deveria ser considerado como um fator sempre presente em qualquer atividade humana. No gerenciamento de risco estão agrupados: a avaliação do risco; a tomada de

decisões baseadas em risco; a avaliação de viabilidade de projetos baseada em risco; os estudos do erro humano; e o desenvolvimento de planos mitigadores de risco e planos de administração de crise, para riscos que podem ou não ser mitigados (Menescal et al., 2005a).

Para Menescal et al. (2005a), de uma forma geral, mas não necessária, os principais passos para a avaliação de risco de segurança de barragens são:

- a identificação de ameaças por meio da listagem de todos os modos e sequências de falha;
- realização do cadastro desses modos e a seleção dos que podem acontecer;
- construção de uma árvore de eventos exibindo esses modos de uma forma que melhor represente a realidade física dos possíveis modos de ruptura;
- avaliação das probabilidades de ruptura em cada ramo da árvore, onde alguns ramos levam à falha e outros não;
- cálculo da(s) probabilidade(s) de vários tipos de ruptura;
- revisão dos ramos críticos para a verificação de qual das probabilidades impostas necessitam de aprimoramentos;
- elaboração de todo o processo de forma clara, principalmente a parte em que são atribuídas as probabilidades, para que a revisão das etapas seja facilitada;
- determinação das consequências de todos os modos de ruptura;
- determinação do risco associando os modos de ruptura e as consequências.

Muitas vezes o resultado final da análise de risco desperta receios e dúvidas quanto à sua correspondência com a realidade, mas é importante mencionar que apesar de alguns métodos serem calculados por meio de probabilidade, as falhas não devem ser interpretadas estritamente como um evento por uma unidade de tempo, mas como uma medida do grau de confiança que se tem, ou não, na concretização de determinado evento. Portanto, o objetivo das análises de riscos não é a obtenção de um número exato que represente a probabilidade de uma falha ou o risco propriamente dito, mas é obter, partindo das informações disponíveis, um panorama geral da situação para se realizar uma gestão segura (Escuder et al., 2007).

3.3 – A LEGISLAÇÃO DAS BARRAGENS BRASILEIRAS

No Brasil a regulamentação de barragens é feita pela Lei nº 12334 de 2010 (Brasil, 2010), que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água, de rejeitos e resíduos industriais. A PNSB tem como principais objetivos garantir que os empreendimentos cumpram padrões de segurança reduzindo a ocorrência de acidentes, regulamentar as ações de segurança nas diversas fases de cada barragem e promover o monitoramento e acompanhamento dessas ações.

Essa lei se aplica às barragens enquadradas nos seguintes parâmetros:

- altura da barragem maior ou igual a 15 m;
- capacidade do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³;
- reservatório que contenha resíduos perigosos;
- ser enquadrado, na categoria de dano potencial associado, como médio ou alto, segundo o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado (BRASIL, 2012). Essa classificação será mostrada a seguir.

Segundo a Lei, os respectivos agentes fiscalizadores são responsáveis por classificar as barragens em relação a categorias de risco, cujos critérios de classificação são definidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

3.3.1 – Classificação realizada no Brasil

As barragens brasileiras são classificadas por categoria de risco, pelo dano potencial associado e pelo volume do reservatório, conforme a resolução nº 143 de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, competência atribuída ao conselho pela Lei nº 12334 de 2010.

A classificação quanto à categoria de risco é feita considerando as características técnicas, o estado de conservação da barragem e o plano de segurança da barragem. Para a quantificação e posterior classificação, são utilizadas tabelas com valores pré estabelecidos para cada categoria, conforme pode ser verificado nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

Tabela 3.1 - Sistema de pontuação considerando características técnicas (CNRH, 2012).

Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de projeto (c)
Altura \leq 15 m (0)	Comprimento \leq 50 m (0)	CMP (cheia máxima provável) ou Decamilenar (0)
15 m \leq altura < 30 m (1)	50 m < Comprimento < 200 m (1)	Milenar (2)
30 m \leq Altura \leq 60 m (4)	200 \leq Comprimento \leq 600 m (2)	TR = 500 anos (2)
Altura > 60 m (7)	Comprimento > 600 m (3)	TR inferior a 500 anos ou desconhecida/ Estudo não confiável (10)

Tabela 3.2 - Sistema de pontuação considerando o estado de conservação (CNRH, 2012).

Confiabilidade das estruturas extravasoras (d)	Percolação (e)	Deformações e recalques (f)	Deformação dos taludes / paramentos (g)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação as medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)

Tabela 3.3 - Sistema de pontuação considerando o plano de segurança de barragem (CNRH, 2012).

Documentação de projeto (h)	Estrutura organizacional e qualificação dos profissionais na equipe de segurança da barragem (i)	Manuais de procedimentos para inspeções de segurança e monitoramento (j)	Plano de ação emergencial – PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (k)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de análise de segurança (l)
Projeto executivo e “como construído” (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de análise de segurança (0)
Projeto executivo ou “como construído” (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2)
Projeto básico (5)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4)
Projeto conceitual (8)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6)

Para obter a pontuação referente às características técnicas, a barragem deve ser enquadrada em três células, sendo uma em cada coluna (coluna a, b e c) da Tabela 3.1, e ao final, é feito o somatório dos valores que aparecem embaixo das células. Da mesma forma é feito com a Tabela 3.2, referente ao estado de conservação da barragem, e com a Tabela 3.3, que considera o plano de segurança da barragem.

A classificação da barragem em relação à categoria de risco é feita efetuando a soma da pontuação obtida nas três tabelas anteriores, referente às características técnicas, ao estado de conservação e ao plano de segurança da barragem. Realizado o somatório, a categoria de risco é estabelecida realizando o enquadramento da pontuação obtida nos intervalos definidos pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Faixas de classificação de cada categoria de risco (CNRH, 2012).

Categoria de risco	Pontuação
Alto	≥ 60 ou a obtenção de pontuação 10 em qualquer coluna da tabela referente ao estado de conservação
Médio	entre 35 e 60
Baixo	≤ 35

A classificação quanto ao dano potencial associado é feita com base na Tabela 3.5. A barragem deve ser enquadrada nas células referente às colunas a, b, c e d, e ao final, é feito o somatório de toda a pontuação. O valor obtido deve ser comparado com a Tabela 3.6, e assim, é obtida a classificação do dano potencial associado.

Tabela 3.5 - Sistema de pontuação do dano potencial associado (CNRH, 2012).

Volume total do reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
Muito Pequeno ≤ 500 mil m ³ (1)	Inexistente (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	Insignificante (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada e a estrutura armazena apenas resíduos inertes (0)	Inexistente (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
Pequeno 500 mil a 5 milhões m ³ (2)	Pouco frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	Pouco Significativo (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos inertes (2)	Baixo (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio 5 milhões a 25 milhões m ³ (3)	Frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	Significativo (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos inertes (6)	Médio (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande 25 milhões a 50 milhões m ³ (4)	Existente (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	Muito significativo (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados como não inertes, (8)	Alto (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito grande ≥ 50 milhões m ³ (5)	-	Muito significativo agravado (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos perigosos (10)	-

Tabela 3.6 - Faixas de classificação de cada categoria de dano potencial associado (CNRH, 2012).

Dano potencial associado	Pontuação
Alto	≥ 13
Médio	$7 < \text{Pontuação} < 13$
Baixo	≤ 7

O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), agente fiscalizador das barragens de rejeitos no Brasil, é responsável, segundo a Lei nº 12334 de 2010 (BRASIL, 2010), por criar e manter atualizado um inventário com as barragens sob sua jurisdição. Para isso publicou a Portaria nº 416 de 2012 (DNPM, 2012), que dispõe sobre o plano de segurança das barragens e revisão periódica de segurança, e também sobre as inspeções regulares e especiais de segurança. Mais especificamente, essa portaria define o conteúdo das informações prestadas e a periodicidade das atualizações, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do plano de segurança da barragem e das inspeções de segurança regulares e especiais.

Para determinar a periodicidade das revisões de segurança, há uma correlação entre o Dano Potencial Associado e a classificação Categoria de Risco, conforme pode ser observado na Tabela 3.7. Se a barragem de rejeitos for classe A ou B, a periodicidade máxima da Revisão Periódica de Segurança será de 5 anos; se classe C será a cada 7 anos e; se for classe D ou E, será a cada 10 anos.

Tabela 3.7 - Matriz que define a classe em que determinada barragem de rejeito se enquadra (DNPM, 2012).

Categoria de Risco	Dano potencial associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	B	C	D
Baixo	C	D	E

Essa revisão periódica de segurança consiste em um estudo apresentado pelo administrador da barragem, dentro de um período definido pela sua classe conforme definido na Tabela 3.7, onde será apresentado como conteúdo mínimo:

- resultado de inspeção detalhada e adequada do local da barragem e de suas estruturas associadas;
- reavaliação do projeto existente, de acordo com os critérios de projeto aplicáveis à época da revisão;
- reavaliação da categoria de risco e dano potencial associado;
- atualização das séries e estudos hidrológicos e confrontação desses estudos com a capacidade dos dispositivos de vertimento existentes;
- reavaliação dos procedimentos de operação, manutenção, testes, instrumentação e monitoramento;
- reavaliação do Plano de Ação de Emergência - PAE;
- revisão de laudos anteriores emitidos após as revisões periódicas de segurança de barragem .

3.3.2 – Projeto de lei nº 6259 de 2013

Esse projeto de lei tem por objetivo tornar obrigatória a contratação de seguro contra o rompimento de barragens destinadas à retenção de água, acumulação de rejeitos, resíduos industriais e efluentes sanitários, para a cobertura de danos físicos, inclusive morte, prejuízos ao patrimônio público ou privado e ao meio ambiente, considerando as áreas afetadas a jusante da barragem (BRASIL, 20013).

O projeto de lei não se aplica às barragens de usinas hidrelétricas em operação cujos projetos desenvolveram-se de acordo com normas técnicas e de segurança, com as boas práticas do setor e com os regulamentos estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 2013).

Segundo o texto complementar do projeto, o prêmio do seguro deverá ser calculado considerando o risco de ruptura da barragem, sendo que quanto mais segura a barragem for, menor será o custo para os empreendimentos (BRASIL, 2013).

3.4 – A ANÁLISE DE RISCO - RISK-BASED PROFILING SYSTEM (RBPS)

O United States Bureau of Reclamation (USBR) é uma agência federal americana com mais de 100 anos de história. É responsável pelo abastecimento de água em 17 estados da região oeste dos Estados Unidos e, para isso, regulamenta e administra 350 grandes barragens no país. Há dezoito anos organizou um comitê com a finalidade de desenvolver uma metodologia baseada no potencial de risco que permitisse a tomada de decisão em questões que envolvessem investimentos em segurança. O primeiro trabalho relacionado a análises de riscos resultante desse grupo foi a Risk-Based Profiling System (RBPS), uma análise considerada como investigação, utilizada como uma ferramenta qualitativa inicial para a identificação e classificação de riscos (Ortuño, 2007).

Na análise RBPS, o risco é estimado combinando a probabilidade de ocorrência de algum cenário de solicitação (como a probabilidade de ocorrência de um terremoto) e, com a ocorrência da solicitação, a probabilidade de ocorrência de alguma falha. Após determinar a possibilidade de ocorrer algum desses eventos, é possível mensurar a magnitude das consequências.

O método RBPS utiliza a equação mostrada a seguir, onde R representa o risco, $P(x)$ é a probabilidade estimada para o sucesso de x , e as expressões $P(x|y)$ expressam a probabilidade condicional de acontecer x dado o sucesso de y .

$$R = \sum [P(\text{solicitações}) \cdot P(\text{Resposta}|\text{solicitações}) \cdot P(\text{consequencias}|\text{Resposta}, \text{solicitações})] \quad (3.1)$$

As solicitações mencionadas anteriormente são os carregamentos impostos por regimes hidrológicos, sísmicos ou em condições estáticas, que são os “cenários” de acontecimento da maioria das respostas adversas em barragens, juntamente com as questões de operação, manutenção e medidas de segurança adotadas. O objetivo inicial do método RBPS é obter o índice de falha, multiplicando-se a probabilidade para o acontecimento de um cenário de solicitação com a probabilidade que mede a resposta da barragem devido a esse carregamento. O índice de falha de cada cenário é calculado pelo primeiro termo da Equação 3.1. Os índices de falha possuem um valor máximo para cada cenário, como pode ser visto na

Tabela 3.8, e quando somados podem atingir o valor de 1000 pontos, o que representa o índice de falha total da barragem.

Tabela 3.8 - Distribuição da pontuação do índice de falha

Cenários	Pontuação
Condição estática	300
Hidrológico	300
Sísmico	300
Operação e manutenção	100
Total	1000

Quanto mais alto o total de pontos, maior será a probabilidade de ocorrer alguma falha na barragem. Como a maioria dos métodos de avaliação de risco, esta metodologia necessita de um modo de suporte onde o avaliador deve ter ao seu alcance diversas informações sobre a estrutura, resultando no preenchimento de várias e diferentes planilhas que abordam uma gama de condições de carga (quando aplicáveis) e de condições físicas da barragem (Harrald et al. 2004).

O próximo passo consiste em adicionar as consequências para a avaliação do risco. Desta forma, o índice de falha é multiplicado por um fator de perda de vidas (termo consequência da Equação 3.1) que representa as consequências associadas a uma ruptura. O resultado desta multiplicação resulta no índice de risco e, após ser calculado para cada cenário, é somado para se obter o valor total que representa o risco que determinada barragem exerce sobre a população. Na Figura 3.1 é apresentado um fluxograma que resume a metodologia.

O fator de perda de vidas reflete as consequências de uma eventual ruptura para a população situada a jusante da barragem, e é influenciado pelas características da ruptura e da área de inundação e também por medidas de segurança não-estruturais adotadas e implantadas, como os planos de evacuação, por exemplo. Após o cálculo do índice de risco é calculado também o índice sócio-econômico, que resulta em um índice de risco bruto, pois é calculado pela multiplicação direta do índice de falha com a população em risco e posterior divisão por 1000. Este fator não representa diretamente o número de mortes, mas considera toda a área afetada por uma possível falha (Escuder et al. 2007).

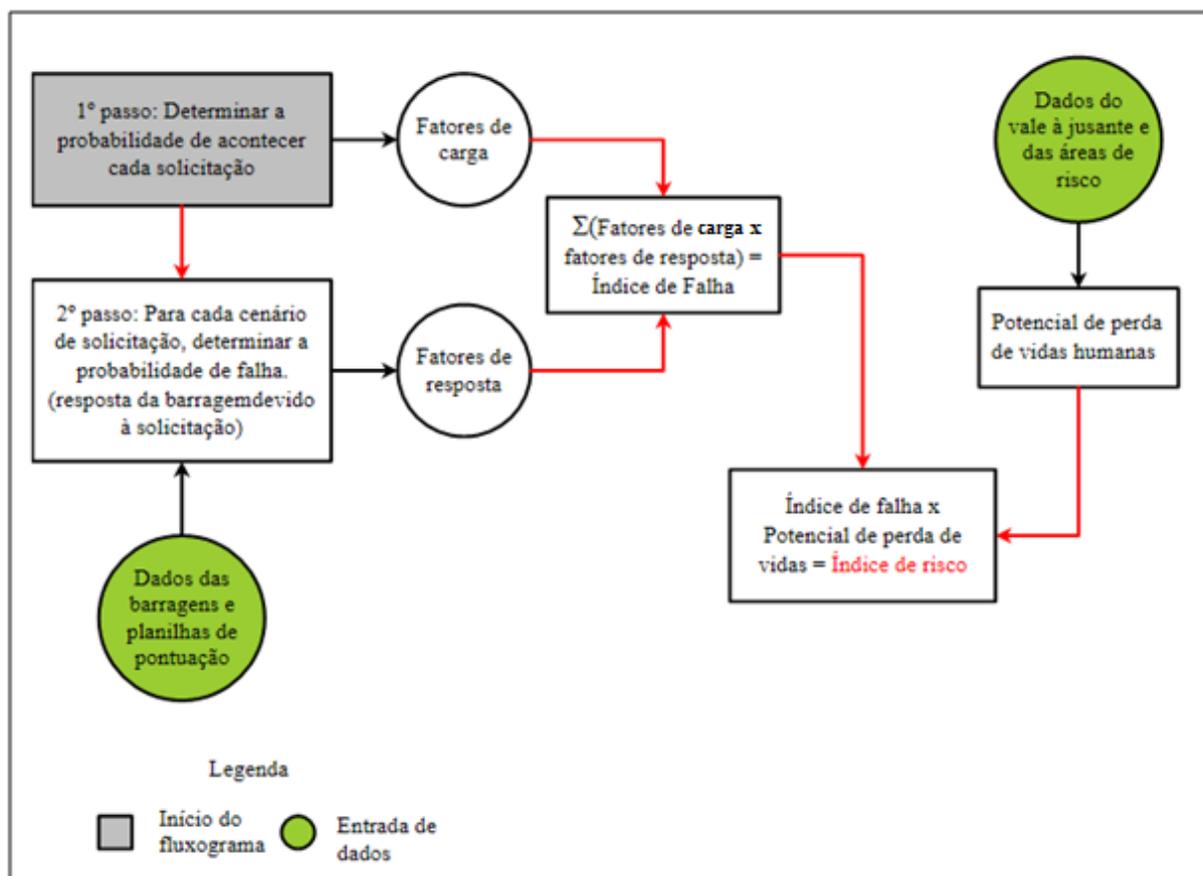


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia RBPS até o cálculo do índice de risco.

Originalmente desenvolvida para barragens convencionais, a metodologia RBPS apresenta em sua estrutura componentes genéricos que aparentemente podem servir para qualquer obra de grande porte. Prova disto é que os cenários de solicitação utilizados também servem como fator determinante para vários desastres que têm ocorrido, sejam eles em barragens convencionais ou de rejeitos ou em casos corriqueiros como em deslizamentos de encostas e taludes.

A Tabela 3.9, apresentada por Escuder et al. (2007), mostra um exemplo da aplicação dessa metodologia em barragens convencionais. Os autores optaram por não quantificar o fator de carga para o cenário hidrológico e nem para o cenário de operação e manutenção, e por isso, a pontuação do índice de falha foi atribuída diretamente nestes casos.

Tabela 3.9 - Componentes da metodologia RBPS (Escuder et al., 2007).

Cenários de solicitação	Fator carga	Fator de resposta	Índice de falha	Fator perda de vidas	Índice de risco	População em risco	Índice sócio econômico
Condição estática	1	260	260	1,92	500	14831	3856
Hidrológico	xxx	xxx	35,5	2,56	90,8	224512	7970
Sísmico	0,15	300	45	1,92	86,4	14831	667
Interferência humana - operação/manutenção	xxx	xxx	25	0,1	2,5	xxx	xxx
Total	xxx	xxx	365,5	xxx	679,7	xxx	12494

Índice de falha = fator de carga x fator de resposta; **Índice de risco** = Índice de falha x Fator de perda de vidas; **Índice sócio-econômico** = (Índice de falha x população em risco)/1000.

3.4.1 – Caracterização dos fatores de carga

Para que a aplicação de uma análise de risco em barragens e reservatórios seja completamente satisfatória e precisa, é necessário a caracterização de todas as cargas que podem interferir na estrutura, descrevendo a magnitude de cada solicitação e a probabilidade dela ocorrer (Ortuño, 2007).

Entende-se por carga todas as forças que podem atuar, devido às solicitações externas, sobre a barragem, sobre sua fundação, e sobre os componentes hidromecânicos. Como cenários de solicitação são considerados as condições normais de operação, os eventos hidrológicos, os sismos e quaisquer ações naturais ou antrópicas que podem influenciar sobre a barragem e seu reservatório (gelo, sedimentos, avalanches, deslizamentos de encostas dentro do reservatório, etc.). Deve-se ter em conta também outras solicitações que não estão ligadas diretamente com esforços, mas que podem resultar, dependendo da resposta da barragem e das ações tomadas, em uma falha. Nestes casos poderiam ser enquadrados os erros humanos, resposta de equipamentos, deterioração das estruturas, vandalismos, atentados, etc. (Ortuño, 2007).

Diante de qualquer um desses casos, as cargas ou solicitações que podem representar um risco em todo o sistema da barragem devem ser identificadas e selecionadas mediante um processo repetitivo de investigação.

Portanto, os fatores de carga que foram apresentados no exemplo da Tabela 3.9 representam a probabilidade de ocorrência de cada cenário de solicitação, como, por exemplo, o acontecimento de algum fenômeno hidrológico não suportado pela barragem. Para avaliar esse caso de forma precisa seria necessário, no mínimo, realizar um estudo mais aprofundado nas bacias hidrográficas de influência no barramento em questão, com o objetivo principal de mensurar a vazão da enchente gerada a montante, que encontrará o reservatório da barragem em determinado nível, que também é estimado por meio de probabilidade. Esse somatório de vazões é que deve ser considerado nos projetos de inundação e nos planos de evacuação.

O exemplo anterior ficará mais claro nos próximos itens nos quais serão explicitadas as caracterizações de cada cenário de solicitação. Para isso foi utilizado algumas definições apresentadas por Ortuño (2007). O autor realizou em sua pesquisa um estudo voltado para barragens convencionais, mas alguns conceitos puderam ser extrapolados para as barragens de rejeitos.

3.4.1.1 – Condição estática (cenário de operação normal)

Neste cenário considera-se a barragem trabalhando normalmente, sem a influência de nenhum fator externo. Com isso, durante este cenário, a variável essencial para se caracterizar as solicitações sobre o sistema barragem-reservatório é expressa pela probabilidade do estado dos níveis do reservatório, obtida por meio de registros históricos que mostram o comportamento real da cota do reservatório durante a sua vida útil (Ortuño, 2007).

Para barragens de rejeitos a determinação dessa condição não é aplicável, uma vez que o nível de água e de rejeitos sempre tende a aumentar em função da necessidade de realização de alteamentos sucessivos. Portanto, o nível a ser considerado em barragens de rejeitos deve ser o nível máximo dimensionado para o último alteamento, pois é difícil manter o controle preciso da produção diária da mineradora e, conseqüentemente, da geração de rejeitos.

Para barragens de rejeitos também seria interessante que esse monitoramento fosse feito paralelamente com a avaliação do nível d'água nos taludes, pois as barragens de rejeitos possuem certa fragilidade diante dessa variável. Isto porque o processo construtivo dessas estruturas nem sempre tem o mesmo controle que possuem as barragens convencionais, e alguns métodos de alteamento prejudicam e, muitas vezes, impossibilitam a implantação de filtros nos taludes para a drenagem de água.

Diante desse fato, atualmente é comum observar que as mineradoras não medem esforços para monitorar o nível d'água nos taludes de suas barragens de rejeitos, com a instalação de piezômetros e a adoção de níveis de segurança.

Possuindo os registros históricos dos níveis d'água nos taludes, determinando-se níveis de alerta ou emergência e aplicando estes valores na expressão a seguir, pode-se obter a probabilidade de ocorrer, em condição estática, uma situação que possa prejudicar a estabilidade do barramento.

$$P(z) = \frac{n_z}{N_t} \quad (3.2)$$

Onde:

$P(z)$: Probabilidade de encontrar o nível na cota z ;

n_z : Número de dias em que o nível d' água ficou na cota z ;

N_t : Número total de dias incluídos na simulação.

Esta equação foi utilizada por Ortuño (2007) para determinar a probabilidade de se estabelecer o nível d'água em determinada cota do reservatório de uma barragem convencional, considerando-se o histórico de níveis.

3.4.1.2 – Cenário hidrológico

Neste caso, as cargas referem-se às inundações produzidas na bacia hidrográfica e que podem chegar a alcançar o reservatório, onde as magnitudes podem ser observadas nos hidrogramas produzidos. Portanto, caso ocorra um evento hidrológico, essa vazão adicional será incluída ao nível prévio do reservatório, e é determinada, em geral, por meio de estudos hidrológicos realizados na bacia até períodos de retorno que dependem da categoria do barramento (Ortuño, 2007).

Caso ocorra uma ruptura em um cenário de solicitação sísmico ou no regime estático, o nível do reservatório é a única variável determinante sobre a vazão de saída para a zona

inundável. Em um evento hidrológico, a vazão de saída corresponderia à soma do nível do reservatório com a inundação produzida na bacia hidrográfica (Ortuño, 2007).

3.4.1.3 – Cenário sísmico

Além da necessidade de se levar em consideração o nível do reservatório, no cenário sísmico é necessário incorporar nas análises ações dinâmicas. Como se sabe, o Brasil encontra-se em uma região continental estável por estar situado praticamente no centro da placa tectônica da América do Sul; assim, apresenta uma sismicidade bem inferior e menos frequente do que de países que estão em zonas de contato entre placas. Nesse caso, a sismicidade induzida é mais importante, considerando que a maioria das mineradoras utiliza explosivos para o desmonte de rochas e veículos pesados para transporte de minérios e estéreis.

3.4.1.4 – Cenário de interferência humana (operação e manutenção)

Pode-se dizer que este cenário depende fundamentalmente dos responsáveis pelo empreendimento e, conseqüentemente, reflete a importância e relevância dada ao método de disposição de rejeitos adotado. Como pôde ser visto no exemplo da Tabela 3.9, o índice de falha para este cenário é determinado diretamente, sem o cálculo do fator de carga, pois é difícil vincular o cenário de interferência humana com o cálculo de algum tipo de probabilidade.

A eficácia da operação e manutenção das barragens de rejeitos geralmente é relatada após inspeções de agentes externos (consultores contratados, órgãos regulamentadores, monitoramentos, etc.) e, por meio dos relatórios emitidos, é possível obter alguns dados que caracterizam ou que delimitam estes cenários.

3.4.2 – Caracterização dos fatores de resposta

O fator de resposta, como já foi explicado, consiste na probabilidade de acontecer uma

falha considerando a probabilidade da ocorrência de um cenário de solicitação. Segundo Ortuño (2007), existem diversos métodos para estimar as probabilidades condicionais de falha em uma barragem. Dentre eles existem:

- as análises quantitativas, que são feitas realizando uma avaliação detalhada dos processos de ruptura que tendem a incluir análises de confiabilidade, digramas lógicos (como árvores de evento ou falhas) e, no melhor dos casos, proporciona uma função de probabilidade;
- os julgamentos de especialistas, que são as opiniões dadas por profissionais com experiência e conhecimento nas áreas afins, sobre a possibilidade de ocorrer um evento adverso;
- as referências históricas procedentes de outras barragens similares, apesar de cada barragem possuir suas próprias peculiaridades, também são bastante úteis em estudos preliminares e que pretendam apresentar uma ordem de magnitude, e;
- as análises tradicionais ou clássicas, que por meio de uma abordagem empírica considera de forma isolada cada uma das cargas e, por último, avalia os coeficientes de segurança como uma medida de eficácia do projeto.

A valoração do fator de reposta na análise RBPS tem como principal objetivo representar, dentro de uma faixa de pontuação, qual pode ser a resposta de uma barragem frente às solicitações e problemas que habitualmente surgem durante os diversos cenários de solicitação. A pontuação depende de fatores qualitativos, que por sua vez, dependem de cada cenário de solicitação.

3.4.3 – Fator de perda de vidas humanas

Uma das partes mais importantes na avaliação da segurança de barragens e nas análises de riscos é avaliar as consequências resultantes de uma falha que, em alguns casos, pode causar impactos mínimos ao proprietário, e em outros, são capazes de causar perdas catastróficas dependendo do que está sendo armazenado, do porte da estrutura e de sua localização (Graham, 1999).

Considerando que o rompimento de uma barragem pode causar perda de vidas, danos a propriedades, perdas culturais e históricas, perdas ambientais e impactos sociais, este item tratará apenas das diretrizes utilizadas na avaliação da perda de vidas humanas.

Para a elaboração deste tipo de metodologia é fundamental recorrer-se aos acontecimentos históricos. Na década de 80 nos Estados Unidos, havia cerca de 5459 barragens com mais de 15 m de altura, e cerca de 71000 com mais de 7,6 m. Entre o período de 1960 a 1998, ocorreram mais de 300 mortes decorrentes de falhas em barragens nos Estados Unidos. As falhas em barragens com menos de 15 m de altura, consideradas pequenas para serem incluídas no cadastro de barragens da International Commission on Large Dams (ICOLD), causou cerca de 88% das mortes dentro do mesmo período (Graham, 1999). Resumindo os dados cadastrados, podem ser compiladas algumas informações importantes e interessantes entre os anos de 1960 e 1998:

- as falhas em barragens menores que 6,1 m de altura foram responsáveis por 2% das mortes;
- as falhas em barragens entre 6,1 e 15 m de altura foram responsáveis por 86% das mortes;
- nas falhas que causaram vítimas, 65 % dos eventos tiveram 5 ou menos mortes;

Assim, observa-se que as falhas em barragens menores que 15 m de altura foram responsáveis por 88% das mortes. Mas como comentado anteriormente, essas barragens não foram consideradas suficientemente altas para serem incluídas no inventário do ICOLD (Graham, 1999).

Baseado no conhecimento da localização das vítimas em 16 das 23 barragens rompidas nesse mesmo período, entre 1960 e 1998 (Graham, 1999), constata-se que:

- de todas as mortes, 53 % ocorreram a menos de 4,8 km do local da falha, e;
- mais de 99 % das fatalidades ocorreram em até 24 km do local da falha.

Com base nestas considerações, pode-se considerar que os fatores que tendem a determinar o número de mortes devido à ruptura de uma barragem são (Graham, 1999):

- número de pessoas em risco;

- causa e tipo da falha na barragem;
- efetividade e pontualidade dos avisos de falha da barragem;
- inundações e velocidades na planície de inundação a jusante da barragem, antes da ruptura;
- inundações e velocidades resultantes da ruptura da barragem;
- hora do dia, dia da semana e época do ano em que ocorreu a ruptura;
- possibilidade das pessoas em risco visualizarem a enchente ou escutarem o seu barulho;
- temperatura do ar e da água;
- atividades em que as pessoas estão envolvidas no momento;
- saúde geral das pessoas ameaçadas pela enchente;
- tipo de estrutura em que as pessoas se encontram;
- facilidade de evacuação.

Apesar dos fatores que influenciam no número de mortes serem diversos, pode-se elencar como três principais: o número de pessoas a jusante, a quantidade de avisos fornecidos às pessoas afetadas e a gravidade da inundação. Os casos em que se obtiveram as mais altas taxas de mortalidade pertencem àqueles em que residências foram destruídas e os avisos de falha não foram emitidos em tempo hábil (Graham, 1999).

É difícil ter uma precisão no cálculo da perda de vidas devido a uma falha de uma barragem, pois alguns fatores são desconhecidos e só podem ser estimados, como o tempo de ruptura da barragem, as condições no momento da ruptura, como dia, noite, chuva, neve, e o número de pessoas em risco no momento da ruptura. É importante mencionar também que não há como saber exatamente quando a mensagem de aviso de ruptura da barragem será dada, pois a experiência indica que existe certa relutância em emitir esse tipo de aviso. Apesar de alguns planos de emergência informarem quando uma advertência deve ser emitida, no entanto, não há garantia que esse aviso será executado. Ainda assim, é importante mencionar que o procedimento para estimar a perda de vidas não será exato mesmo se todas as variáveis conhecidas estiverem corretas (Graham, 1999).

O procedimento para o cálculo do fator de perda de vidas elaborado por Graham

(1999) por necessitar da determinação de muitas variáveis foi simplificado por Escuder et al. (2007) para ser aplicado em análises de investigação, necessitando da execução das seguintes tarefas:

1. Determinação da população em risco: esta determinação, a princípio, deveria ser feita durante os estudos de inundação que acompanham os planos de emergência. Apesar de nem todos os planos apresentarem estes dados, a ferramenta necessita desta informação que pode ser obtida recorrendo aos dados do cadastro e observando o tipo de urbanização ou assentamento que existe na zona estudada;

2. Consideração do tempo de ruptura da barragem: este fator é muito importante porque, se a ruptura não for instantânea, a inundação gerada não alcança seu pico de forma tão violenta, e assim, aumentam as chances de sobrevivência das pessoas situadas a jusante. Essa informação sobre tempo de ruptura é adquirida facilmente na literatura e depende da tipologia da barragem, do tipo e modo de ruptura e do próprio projeto da barragem. Geralmente nas análises de investigação, a classificação é feita entre rupturas instantâneas, rápidas, moderadas e lentas. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente da Espanha (MMA, 1996), o modo de ruptura e a forma e evolução da brecha no maciço dependem do tipo da barragem, como pode ser visto na Tabela 3.10 e Equação 3.6;

3. Cálculo da porcentagem de população em risco nas áreas críticas: além da população exposta, é preciso considerar a porcentagem da população situada em locais que propiciam vazões e velocidades de fluxo capazes de danificar seriamente residências e arrastar pessoas e veículos. É importante mencionar que, devido à limitação de informação e à simplicidade da ferramenta de investigação, esta porcentagem é de difícil obtenção, sendo necessário recorrer a métodos de engenharia. De qualquer forma, deve-se ter em conta a geometria do vale a jusante em relação às construções e fluxo de pessoas e veículos nas proximidades.

4. Cálculo do fator de perda de vidas: por último, calcula-se o fator de perda de vidas nos cenários de operação normal (condição estática), hidrológico e sísmico. O procedimento proposto por Brown e Graham (1988) utiliza equações baseadas em 24 casos de ruptura de barragens e também de grandes inundações. Nessas equações, o tempo de advertência utilizado foi o tempo decorrido entre o início de uma evacuação oficial e a chegada da onda de inundação no local onde vive a população em risco (PR).

Quando o tempo de advertência é menor que 15 minutos:

$$\text{Fator de Perda de vidas} = 0,5 . PR \quad (3.3)$$

Quando o tempo de advertência é entre 15 e 90 minutos:

$$\text{Fator de Perda de vidas} = PR^{0,6} \quad (3.4)$$

Quando o tempo de advertência é maior que 90 minutos:

$$\text{Fator de Perda de vidas} = 0,0002 . PR \quad (3.5)$$

As equações acima demonstram que a perda de vidas pode variar amplamente dependendo do tempo em que as pessoas são avisadas para evacuarem o local.

O tempo de advertência depende, principalmente, do tipo de ruptura e do tempo em que ela ocorre, do cenário de solicitação, do tipo de barragem, da efetividade do plano de evacuação e das advertências, do horário em que ocorreu a ruptura e da distância do núcleo populacional a jusante. Na Tabela 3.10 são apresentados valores para a estimativa do tempo de ruptura em diversos tipos de barragens, que é uma das variáveis necessárias para o cálculo do tempo de advertência.

Tabela 3.10 - Tempo de ruptura em relação a alguns tipos de barragens (MMA, 1996).

Tipo de barragem	Tempo de ruptura
Barragens de abóboda	5 a 10 min (instantânea)
Barragens de gravidade e contrafortes	10 a 15 min (instantânea)
Barragens de materiais soltos	Conforme Equação 3.6

Determinação do tempo de ruptura de barragens de materiais soltos (MMA, 1996):

$$Te = \frac{4,8 . V^{0,5}}{h} \quad (3.6)$$

Te = Tempo em horas;

V = volume em hm^3 ;

h = altura em m.

Caso resulte em um tempo maior que 5 horas, o mesmo deverá ser reavaliado de uma forma mais criteriosa.

METODOLOGIA DAS ANÁLISES DE RISCO ADOTADAS

4.1 - INTRODUÇÃO

A metodologia RBPS consiste em uma ferramenta de avaliação simples e essencialmente qualitativa, em que a caracterização dos cenários de solicitação e dos fatores de resposta é feita utilizando uma série de tabelas de cálculo vinculadas entre si. Contudo, para se conseguir uma ferramenta confiável, que proporcione resultados coerentes sempre que são utilizados os mesmos dados de entrada, é importante que sempre seja apresentado, com explicações e comentários, todos os dados incluídos ao longo da análise de riscos (Escuder et al., 2007).

Neste capítulo serão apresentados os dados de entrada utilizados para realizar a análise de risco e as considerações feitas sobre os fatores de carga, as tabelas elaboradas para a pontuação do fator de resposta, a estimação da população em risco e a determinação do tempo de ruptura para o cálculo da perda de vidas humanas.

Portanto, a estrutura principal da análise de risco RBPS será mantida sem alterações, ou seja, os cenários de solicitação, os índices de carga e os fatores de resposta, não terão seus conceitos alterados. Entretanto, será necessário criar um sistema de atribuição de pontuações que contemple todas as peculiaridades que as barragens de rejeitos possuem.

Como foi visto anteriormente, e será visto de forma mais detalhada a seguir, a análise de risco considera fundamentalmente a população, por meio do fator de perda de vidas humanas, sendo este a componente principal para o cálculo do índice de risco. Com isso, não são considerados os possíveis danos que seriam causados às áreas de preservação ambiental, corpos de águas superficiais, abastecimento de água de cidades, e demais infra-estruturas. Contudo, a proposta final deste estudo será a definição de uma metodologia de classificação aplicada às barragens de rejeitos com base no dano econômico potencial e nos impactos socioambientais.

4.2 – ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS DE BARRAGENS DE REJEITOS

Para a obtenção dos dados a serem utilizados na análise de risco é necessário a elaboração de inventários com as mais variadas informações. Segundo Rodríguez et al. (2006), as etapas para a realização de um inventário de depósitos de resíduos mineiros são as seguintes: (i) compilação e análise da informação existente da zona a ser estudada; (ii) preparação do trabalho de campo e definição dos níveis de informação a cobrir; (iii) realização do trabalho de campo; (iv) análise das amostras; (v) processamento das informações de campo e laboratório; (vi) elaboração, interpretação e síntese das informações obtidas.

Os mesmos autores citam alguns materiais básicos necessários para o desenvolvimento de um inventário: (i) as fotos aéreas que, juntamente com mapas topográficos, permitem uma visão em três dimensões da zona de estudo e a elaboração dos possíveis itinerários de reconhecimento do terreno; (ii) imagens de satélite que abrangem grandes áreas e permitem a visualização dos locais afetados direta e indiretamente; (iii) as fichas de inventário, que devem estar preparadas para receber todos os detalhes e aspectos importantes para que os objetivos do trabalho sejam alcançados, e; (iv) equipamentos de uso em campo como bússola, GPS, câmera fotográfica, entre outros (Rodríguez et al. 2006).

Procurou-se obter informações conforme as instruções para a elaboração de inventários proposto por Rodríguez et al. (2006), onde os dados sugeridos para o levantamento foram organizados na Tabela 4.1.

Esta etapa do trabalho foi tratada como uma das mais importantes, pois foi a base de dados para todas as avaliações, sejam elas qualitativas ou quantitativas. Pretendeu-se, neste estudo, focar nas barragens de rejeito que possuem alteamentos, visto que os diversos tipos de mineradoras geram outros tipos de resíduos sólidos, como os estéreis e os subprodutos oriundos da industrialização dos minérios que, em sua grande maioria, são dispostos em pilhas.

Tabela 4.1 - Informações básicas a serem adquiridas para a elaboração de um inventário.

Elementos da ficha	Informações a serem adquiridas
Identificação e situação geográfica	Coordenadas geográficas, município, bacia hidrográfica, situação (ativa, abandonada, restaurada, fechada)
Informações sobre a mineração	Método de mineração (céu aberto, subterrâneo ou misto) e os tipos de minérios extraídos
Entorno físico	Tipos de solos e permeabilidades, caracterização das águas superficiais, nível freático, outros usos dados ao solo (usos agropecuários, áreas de preservação permanente, cidades e outros)
Mapas e croquis de acesso	-
Descrição do reservatório	Comprimento; largura; altura; volume armazenado; capacidade máxima; localização (em vale, em ladeira, em bacia, em depressão natural); tipo de drenagem (infiltração, drenos, vertedouros, bombeamento, evaporação forçada); recuperação de água (total, parcial, nula); retirada, tratamento, natureza e destino de lodos.
Descrição da barragem	Métodos de alteamento (montante, jusante, linha de centro); materiais utilizados; comprimento, largura, altura, ângulo dos taludes; ano de início das construções; situação do licenciamento ambiental; informações adquiridas em vistorias (presença de trincas, afundamentos, funcionamento incorreto e outras anomalias); instrumentações utilizadas e relatórios de medição
Elementos de risco a jusante	Localização de núcleos urbanos, rurais, edificações e outros; serviços públicos como abastecimento, linhas de transmissão e comunicação; rodovias, estradas, pontes, linhas ferroviárias; elementos ambientais como recursos hídricos, áreas de preservação, patrimônio artístico; existência de plano de evacuação
Fotos, Mapas, plantas e esquemas estruturais.	-

4.3 – DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE CARGA

Como foi detalhado nos capítulos anteriores, a solicitação mais crítica e indicada para o cálculo do fator de carga no regime estático em uma barragem de rejeitos, seria a elevação da superfície freática dos taludes de jusante em um nível que estaria comprometendo a estabilidade do maciço. Neste caso, o cálculo da probabilidade desse cenário específico é simples, uma vez que a maioria das mineradoras realiza o monitoramento dos níveis dos piezômetros. Entretanto, é necessário que sejam realizadas várias análises de estabilidade de taludes em cada barragem, para que seja verificado em quais níveis cada piezômetro poderá atingir para mobilizar fatores de segurança de até 1,3 (operação) ou 1,5 (fechamento), por exemplo. Determinado esse nível crítico, bastaria a mineradora realizar o monitoramento dos piezômetros sendo possível determinar a probabilidade (fator de carga) com base na Equação 3.2, considerando a quantidade de dias em que o nível medido ultrapassou o valor limite.

Mas, apesar do nível freático no talude de jusante ser o principal responsável por rupturas em barragens de rejeitos, esse não é o único mecanismo de ruptura que pode ocorrer durante a operação normal dessas estruturas, isto é, esse método seria eficaz no cálculo de um dos vários modos de ruptura que podem ocorrer neste tipo de estrutura, que seria o caso da “ruptura por elevação da superfície freática”.

No cenário hidrológico, as principais solicitações poderiam estar relacionadas com a capacidade dos vertedores de aliviar as cheias produzidas e, também, pela elevação dos níveis dos piezômetros. Em ambos os casos é necessário realizar um estudo hidrológico para se determinar a probabilidade de ocorrência de um evento que iria condicionar um ou os dois casos citados anteriormente. Outra análise importante seria a avaliação do nível freático do talude de jusante supondo uma elevação e a aproximação do lago.

O fator de carga sísmico é determinado pela probabilidade de ocorrer um terremoto em determinada região, mas, de acordo com dados históricos, sabe-se que o Brasil possui uma baixa sismicidade, podendo, nesse caso, admitir que a sismicidade poderia ocorrer de forma induzida, principalmente por planos de fogo e/ou pelo trânsito de maquinário próximo às barragens. Entretanto, é necessário que se realize um monitoramento da sismicidade induzida nas barragens de rejeitos para que seja determinado se poderá ocorrer algum prejuízo, considerando a distância da barragem às frentes de lavra e os impactos destas vibrações

nessas estruturas, bem como os efeitos da movimentação de veículos e máquinas também na zona de influência destas barragens.

Portanto, como a análise de risco proposta refere-se a uma investigação inicial e os estudos demandados para a determinação dos fatores de carga são extensos e necessitam da coleta de dados por parte das mineradoras, faz-se necessário que, num primeiro momento, algumas análises sejam simplificadas. Na falta de informações e dados estatísticos, impõe-se utilizar os métodos que transformam descrições verbais em probabilidade.

Segundo Perini (2009), as investigações preliminares qualitativas e semiquantitativas muitas vezes são interessantes para identificar e priorizar os riscos que requerem um estudo mais detalhado, e muitas vezes são feitas devido à falta de dados quantitativos de qualidade e pela impossibilidade de realizar análises mais criteriosas.

O USBR (2011) sugere a utilização da Tabela 4.2 para a transformação de descrições verbais em probabilidade. Esse tipo de estimativa é o intervalo de valores considerados possíveis considerando evidências disponíveis. Esse tipo de avaliação não fornece valores exatos, entretanto, se for avaliado por um grupo de especialistas, estimula discussões que ajudam a obter valores mais próximos da realidade.

Tabela 4.2 - Descrição verbal x probabilidade (USBR, 2011).

Descrição verbal	Probabilidade
Evento é certo	0,999
Evento é muito provável	0,99
Evento é provável	0,9
Neutro	0,5
Evento é improvável	0,1
Evento é muito improvável	0,01
Evento é virtualmente impossível	0,001

4.4 – DETERMINAÇÃO E PONTUAÇÃO DOS FATORES DE RESPOSTA

Para elaborar o sistema de pontuação dos fatores de resposta foi necessário avaliar os casos históricos, realizar consulta em artigos e, principalmente, verificar os dados disponíveis obtidos na elaboração do inventário de barragens de rejeitos do estado de Goiás, que foram obtidos nos processos de licenciamento ambiental da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do estado.

Por avaliar o comportamento da barragem frente a situações normais e adversas, é correto afirmar que o fator de resposta está diretamente ligado ao comportamento estrutural da barragem e dependerá diretamente dos seguintes fatores (Escuder et al., 2007):

- capacidade, estado, manutenção e funcionamento dos equipamentos de deságue;
- aspectos de projeto e construção da barragem (métodos de alteamentos empregados, altura e comprimento da barragem);
- volume e área do reservatório;
- características do rejeito armazenado;
- aspectos geológicos e geotécnicos da fundação e região do entorno;
- existência de instrumentação e monitoramento da barragem;
- em casos de sismos, a suscetibilidade à liquefação e as condições de estabilidade dos taludes;
- cumprimento de normas e leis vigentes que estabelecem as diretrizes para a exploração em questão;
- deformações, trincas, afundamentos e demais anomalias verificadas no corpo da barragem.

Dentre as solicitações consideradas na análise de risco apresentada, as ocorridas em regime de operação normal, de natureza hidrológica e sísmica, podem influenciar o fator resposta a atingir até 300 pontos cada. A solicitação relacionada com fatores humanos (operação e manutenção) pode alcançar um total de até 100 pontos.

Quanto maior o valor obtido, maior o risco de ocorrer algum acidente. Para realizar a distribuição da pontuação, buscou-se considerar basicamente os critérios de projeto adotados para a barragem, como os métodos de alteamento, a existência de instrumentação, a posição de lançamento de rejeitos, etc. sendo que todas essas questões foram amplamente abordadas na revisão bibliográfica.

Um exemplo pode ser ilustrado para as barragens alteadas pelo método de montante, que apresentam algumas desvantagens em relação ao método de jusante. Nesse caso, a pontuação que o método de montante receberá será maior do que a pontuação associada ao

método de jusante. Quando a classificação do tamanho dos reservatórios em termos de volume, foi levado em consideração os valores apresentados na Tabela 3.5, considerando que esses dados foram retirados da resolução nº 143 de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2012).

Considerando que a probabilidade de acontecer dois cenários de solicitação ao mesmo tempo é muito baixa, como acontecer simultaneamente um evento hidrológico extremo e um sismo, alguns parâmetros foram considerados em mais de um cenário. Por exemplo, em quase todos os cenários o método de alteamento é considerado parâmetro na pontuação, pois é um fator fundamental para a avaliação da estabilidade tanto no cenário hidrológico como no de operação normal e no sísmico.

4.4.1 – Condição estática (cenário de operação normal)

O fator de resposta em condição estática representa o comportamento da barragem de rejeitos considerando suas peculiaridades e características próprias que podem influenciar na sua segurança durante este cenário de solicitação. Para essas características próprias serão atribuídas pontuações de acordo com a Tabela 4.3, que quando somadas, podem chegar ao total de 300 pontos.

Tabela 4.3 – Condição estática: pontuação proposta para o fator de resposta.

Condição estática			
Categorias	Fatores individuais	Pontuações	
		Pontuação indiv.	Máx. da categ.
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	50	50
	Único ponto, de jusante para montante	40	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	20	
	De jusante para montante com <i>spray bars</i>	10	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	8	
Proteção do talude de jusante	Não existe	10	10
	Vegetação	5	
	Rip rap	3	

	Outra (considerar eficiência)	1 até 9	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	60	60
	Existe monitoramento	15	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	5	
Fator de segurança de operação	$< 1,3$	70	70
	$\geq 1,3 < 1,5$	35	
	$\geq 1,5$	10	
Volume armazenado	≤ 500 mil m ³	2	10
	> 500 mil ≤ 5 milhões m ³	4	
	> 5 milhões m ³ ≤ 25 milhões m ³	6	
	> 25 milhões m ³ ≤ 50 milhões m ³	8	
	> 50 milhões m ³	10	
Verificação da água infiltrada no talude	Vazamento lamacento e com aumentos súbitos	50	50
	Vazamento lamacento	45	
	Vazamento límpido, aumentando gradualmente	30	
	Vazamento límpido e estável	20	
	Pequeno vazamento	15	
	Nenhum vazamento verificado	2	
Sistema de drenagem implantado na barragem	Nenhum	40	40
	Tapete drenante	30	
	Em parte dos alteamentos	20	
	Em todos os alteamentos	8	
	Outro tipo de drenagem (Considerar eficiência)	1 até 39	
Problemas verificados no corpo da barragem	Trincas	4	10
	Deterioração dos taludes	2	
	Vazamento em tubulação de equipamento de descarga	2	
	Erosão no talude de jusante	2	
	Outros problemas (considerar a gravidade)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

4.4.2 – Cenário hidrológico

Diante de cenários hidrológicos, impõe-se saber como é o comportamento da barragem frente a cheias, mas outros fatores também podem influenciar de forma indireta. Portanto, as questões de projeto e de operação são de fundamental importância e serão

utilizados para definir a pontuação do fator de resposta deste cenário, como pode ser visto na Tabela 4.4. Da mesma forma que no cenário que considera a barragem em regime estático, o valor máximo que poderá ser atingido no somatório geral é 300.

Tabela 4.4 - Cenário hidrológico: pontuação proposta para o fator de resposta

Cenário Hidrológico			
Categorias	Fatores individuais	Pontuações	
		Pontuação indiv.	Max. da categ.
Vazão de projeto dos vertedores	10000 anos	5	55
	1000 anos	20	
	500 anos	40	
	< 500 anos ou desconhecido	55	
Sistema alternativo de descarga das vazões	Bombeamento	15	40
	Outro (considerar eficiência)	1 até 39	
	Nenhum	40	
Drenagem interna	Nenhum	30	30
	Tapete drenante	20	
	Outro tipo de drenagem (Considerar eficiência)	1 até 29	
	Em parte dos alteamentos	10	
	Em todos os alteamentos	5	
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	40	40
	Único ponto, de jusante para montante	30	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	15	
	De jusante para montante com <i>spray bars</i>	5	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	3	
Proteção do talude de jusante	Não existe	10	10
	Vegetação	5	
	Rip rap	3	
	Outra (considerar eficiência)	1 até 9	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	40	40
	Existe monitoramento	15	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	5	
Configuração do depósito	Em vale	10	10
	Em fundo de vale	8	
	Em meia encosta	6	

Fator de segurança considerando uma falha no sistema de drenagem	Em dique fechado	4	65
	$\leq 1,0$	65	
	$> 1,0 \leq 1,3$	55	
	$> 1,3$	20	
Área do reservatório	Não avaliado	45	10
	0,5 a 1 km ²	4	
	1 a 1,5 km ²	6	
	1,5 a 2 km ²	8	
	> 2 km ²	10	

4.4.3 - Cenário sísmico

Da mesma forma que os cenários anteriores, o fator de resposta avaliado busca representar o possível comportamento frente a um evento sísmico e a pontuação final pode chegar a 300 pontos. A distribuição da pontuação proposta é dada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Cenário sísmico: pontuação proposta para o fator de resposta.

Cenário Sísmico			
Categorias	Fatores individuais	Pontuações	
		Pontuação indiv.	Max. da categ.
Nível de vibração causado pelo plano de fogo	Alto	20	20
	Médio	10	
	Baixo	5	
	Não realiza monitoramento	10	
Sismicidade da região (casos históricos)	Desconhecido	20	20
	Médio	10	
	Baixo	5	
Problemas verificados no corpo da barragem	Trincas	15	30
	Deterioração dos taludes	5	
	Vazamento em tubulação de equipamento de descarga	5	
	Erosão no talude de jusante	5	
	Outros problemas (considerar a gravidade)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 30	
Fator de segurança considerando evento sísmico	$> 1,0 \leq 1,3$	80	80
	$> 1,3 \leq 1,5$	70	
	$> 1,5$	10	

	Não avaliado	50	
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	60	60
	Único ponto, de jusante para montante	50	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	35	
	De jusante para montante com <i>spray bars</i>	15	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclone	10	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	45	45
	Existe monitoramento	20	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	8	
Drenagem interna	Nenhum	35	35
	Tapete drenante	20	
	Outro tipo de drenagem (Considerar eficiência)	1 até 34	
	Em parte dos alteamentos	15	
	Em todos os alteamentos	8	
Existência de estradas e/ou ferrovias próximas	Sim	10	10
	Não	3	

4.4.4 – Cenário de interferência humana (operação e manutenção).

A pontuação do fator de resposta do cenário de interferência humana, como o próprio nome indica, é influenciada pelo sistema de gestão da segurança adotado pelos administradores das barragens. De uma forma mais clara e direta, este fator de resposta está principalmente ligado com a periodicidade e o resultado das vistorias realizadas pela própria mineradora, por consultoria especializada e por órgãos regulamentadores. Por estar relacionado com tomadas de decisões, o índice de risco referente a este cenário foi determinado sem considerar o fator de carga, ou seja, sem avaliar a probabilidade de acontecimento do cenário. Isto porque, como pode ser visto na Tabela 4.6, neste cenário não são consideradas deficiências da estrutura e demais fatores que afetam sua segurança, mas se incluem na análise de risco os pesos das decisões tomadas pelos gestores da estrutura, decisões estas que são difíceis de serem estimadas por probabilidade.

Conforme pode ser visto na Tabela 4.6, este cenário pode apresentar pontuação máxima de 100 pontos.

Tabela 4.6 - Cenário de interferência humana: pontuação proposta para o fator de resposta.

Cenário de interferência humana (operação e manutenção)			
Categorias	Fatores individuais	Pontuações	
		Pontuação indiv.	Max. da categ.
Plano de ação emergencial	Não possui	60	60
	Possui – avaliar abrangência e determinar pontuação	1 até 59	
Situação dos projetos	Insuficientes	30	30
	Suficientes	5	
Infrações cometidas	Multa aplicada nos últimos 10 anos	8	10
	Advertência aplicada nos últimos 5 anos	2	
	Outro tipo de infração (considerar relevância)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

4.5 – DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE PERDA DE VIDAS HUMANAS

São vários os fatores a serem considerados para o cálculo de perda de vidas humanas devido ao rompimento de uma barragem. Como foi explicado anteriormente, o cálculo depende de variáveis que são muito difíceis de serem obtidas, como as atividades em que as pessoas estarão envolvidas no momento da ruptura e a saúde de cada pessoa. Portanto, o cálculo utilizado para a determinação do potencial de perda de vidas humanas nesta pesquisa será o proposto por Brown & Graham (1988), Equações 3.3, 3.4 e 3.5.

A única variável utilizada em cada equação é a população em risco, entretanto, o tempo de advertência também é importante, pois determina qual equação deverá ser utilizada.

O tempo de advertência é usado para alertar as pessoas quanto à ruptura de uma barragem e é fundamental para uma efetiva evacuação da população. Esse tempo vai depender principalmente do tipo de ruptura, do cenário de solicitação, do tipo de barragem, da efetividade do plano de evacuação e das advertências, do horário em que ocorreu a ruptura, da distância do núcleo populacional a jusante, etc. Para fins de simplificação, o cálculo do tempo de advertência adotado, será o estimado com base na Equação 3.6 que calcula o tempo de

ruptura da barragem. Portanto, como várias variáveis não podem ser obtidas em um primeiro momento, será considerado que o tempo de ruptura da barragem será o tempo de advertência.

Para a determinação da população em risco será utilizada a população declarada pela mineradora nos processos de licenciamento. Alguns processos não possuem essa informação, pois muitas barragens estão situadas em zonas rurais. Nesse caso, considerando que são poucas as moradias situadas em zonas rurais, será utilizado o programa Google Earth para a contagem de residências situadas no vale a jusante da barragem, assim, considerando uma média de 3,7 pessoas por moradia em zona rural (IBGE, 2010), poderá ser determinada a população em risco.

A distância percorrida pelos rejeitos será estimada pela calculadora online disponível no site: <http://www.wise-uranium.org/ctfs.html> (Diehl, 2009). A principal finalidade desse programa é calcular a extensão de um fluxo de rejeitos liquefeitos, baseado em equações bidimensionais descritas por Jeyapalan et al. (1982). Nas equações, para representar o comportamento do rejeito liquefeito, é utilizado o modelo plástico de Bingham onde o movimento do fluido só começa quando uma tensão de cisalhamento é excedida. O modelo plástico de Bingham é representado pela Equação 4.1, onde τ é a tensão de cisalhamento, σ_e é a tensão de escoamento, μ_p é a viscosidade plástica do fluido e ϵ_c são as deformações cisalhantes.

$$\tau = \sigma_e + \mu_p \cdot \epsilon_c \quad (4.1)$$

Como o fluxo da maioria dos rejeitos liquefeitos é laminar, a calculadora é aplicável somente a este tipo de fluxo. No site é apresentada uma nota informando que a calculadora não é aplicável a rejeitos de fosfato, pois seus parâmetros de resistência e viscosidade são baixos comparados aos de outros rejeitos, promovendo um fluxo turbulento. Outro parâmetro que também não é considerado no cálculo é a resistência exercida pelo atrito das laterais do canal de fluxo e, portanto, no caso de vales estreitos, a distância atingida pelo fluxo pode ser superestimada.

Os parâmetros relacionados com a geometria do terreno e da estrutura são a altura da barragem e a inclinação do terreno a jusante. Os parâmetros dos rejeitos são o peso específico, a resistência ao escoamento de Bingham e a viscosidade plástica de Bingham.

Para se ter uma idéia da confiabilidade dessa ferramenta, pode-se utilizar algumas informações de rupturas históricas de barragens de rejeitos disponibilizadas pela ICOLD (2001), das quais existem dados de altura da barragem e da distância percorrida pelos rejeitos após a ruptura. Com isso, pode-se verificar e comparar a distância calculada pelo programa disponibilizado online com a distância real informada pelo ICOLD (2009). Deste modo, empregaram-se os seguintes dados de entrada para o cálculo: 3% de inclinação do terreno de jusante; resistência ao escoamento de Bingham de 0,96 kPa; viscosidade plástica de Bingham de 0,096 kPa.s; e peso específico do rejeito de 15,7 kN/m³. A Tabela 4.7 mostra essa comparação realizada.

Observa-se que nos casos analisados a ferramenta foi mais conservadora, portanto, considerando que as análises a serem feitas são de caráter investigatório, o programa atende a este propósito.

O cálculo da inclinação do terreno a jusante da barragem será feito utilizando o software Google Earth. O procedimento consiste em traçar uma linha acompanhando a drenagem/vale a jusante com a ferramenta “adicionar caminho”. No menu “editar”, é possível calcular o “perfil de elevação” da linha traçada. Com isso é apresentado um gráfico do perfil de elevação com a média da inclinação do terreno, que é o dado necessário para o cálculo da distância percorrida pelos rejeitos. A geração do perfil de elevação é ilustrado na Figura 4.1.

Os dados de altura e peso específico dos rejeitos poderão ser obtidos na elaboração do inventário. Se alguma barragem não possuir os dados de peso específicos dos rejeitos, poderá ser utilizada uma média dos valores entre 14,1 a 17,3 kN/m³ (Diehl, 2009).

A resistência ao escoamento e a viscosidade plástica de Bingham não serão encontrados nos processos de licenciamento, portanto também serão utilizados os valores recomendados pelo site. Para a resistência ao escoamento de Bingham é recomendado os valores entre 0,96 e 7,2 kPa, já os valores para a viscosidade plástica de Bingham ficam entre 0,096 e 4,8 kPa.s. Na Figura 4.2 é mostrada a interface da calculadora utilizada.

Como o programa não pode ser utilizado para rejeitos de minério de fosfato, nesse caso específico poderá ser considerado que as residências que estão localizadas até 24 km da barragem poderão ser afetadas pela ruptura, pois conforme Brown e Graham (1988), 99% das mortes nos casos avaliados ocorreram dentro dessa distância, considerando a ruptura de barragens convencionais.

Tabela 4.7 - Comparação da distância real atingida por fluxos de rejeitos liquefeitos com a distância calculada pelo programa *Tailings Flow Slide Calculator* disponibilizado por Diehl (2009).

Barragem de rejeito	Ano da ruptura	Minério	Altura da barragem (m)	Distância percorrida pelos rejeitos (m)	Distância calculada (m)
Stava, Itália	1985	Fluorito	29	4000	4200
Unidentified, Texas, USA	1966	Gipsita	16	300	960
Merriespruit, África do Sul	1994	Ouro	31	2000	2800
Balka Chuficheva, Rússia	1981	Ferro	25	1300	2000
Bellavista, Chile	1965	Cobre	20	800	1440
Derbyshire, Reino Unido	1966	Carvão	8	100	270
Merriespruit, África do Sul	1994	Ouro	31	2000	2800
Sgurigrad, Bulgária	1996	Chumbo/ Zinco/Cobre/ Prata	45	6000	10200
Stancil, USA	1989	Areia	9	100	320



Figura 4.1 - Perfil de elevação do terreno no Google Earth.

----- Select Sample Data ----- ▾		Input Data	Reset
Geometry HELP 			
Initial height of dam:	<input type="text"/>	m	
Bed slope:	<input type="text"/>	%V:H *)	
Tailings Properties HELP 			
Total unit weight:	<input type="text"/>	kN/m ³	
Bingham yield strength:	<input type="text"/>	kPa	
Bingham plastic viscosity:	<input type="text"/>	kPa·s	
*) = optional			

Figura 4.2 - Programa utilizado para calcular a distância alcançada por um fluxo de rejeitos liquefeitos (Diehl, 2009).

4.6 – CLASSIFICAÇÃO DO DANO ECONÔMICO E SOCIOAMBIENTAL

Esta classificação tem como objetivo quantificar o dano ambiental, social e econômico, considerando alguns cenários de danos que podem ocorrer com a ruptura de uma barragem de rejeito. Ressalta-se que as características do resíduo sólido armazenado, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), também serão analisadas nesta avaliação e influenciarão na classificação obtida. Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos podem ser classificados como:

- resíduos classe I – Perigosos: resíduo que, dependendo de suas características físicas, químicas e infecto-contagiosas, pode apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente, quando gerenciado de forma inadequada;
- resíduos classe II A – Não inertes: Não se enquadram como resíduo classe I, mas podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água;
- resíduo classe II B – Inertes: em contato com água, seus constituintes não são solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A classificação também será realizada por meio de pontuação, segundo a Tabela 4.8. Dependendo de cada situação, a barragem receberá uma pontuação conforme a classe do

resíduo armazenado, e a pontuação final é o somatório de todos os danos causados. As classes são as seguintes:

- $\Sigma \geq 6$ – Dano extremo;
- $\Sigma \geq 4 < 6$ – Dano muito alto;
- $\Sigma \geq 2 < 4$ – Dano alto;
- $\Sigma < 2$ – Dano considerável.

Não foi considerado um dano baixo, pois a ruptura de uma barragem de rejeitos em si já causa grandes impactos ambientais.

Parte dos dados para esta classificação também deve ser obtida nos processos de licenciamento das barragens de rejeitos junto à SEMARH. Os dados referentes aos pontos de captação de água para abastecimento das cidades e as áreas de conservação ambiental dentro do estado serão obtidos no site da SIEG (Sistema Estadual de Geoinformação). Os arquivos obtidos são do formato shapefile e podem ser utilizados como um sistema de informações geográficas (SIG). Para a visualização dos arquivos, será utilizada a versão gratuita do programa ArcGIS Explorer.

Tabela 4.8 - Sistema de pontuação para a classificação do dano econômico e socioambiental.

Danos causados	Propriedade dos rejeitos armazenados (NBR 10004 – ABNT, 2004)		
	Perigoso	Não inerte	Inerte
Ruptura poderá causar transtornos para o abastecimento de água de alguma cidade	4	2	1
Ruptura poderá afetar alguma área de conservação ambiental	4	1	0,5
Ruptura poderá afetar um núcleo urbano	6	3	2
Ruptura poderá causar danos à mineradora	2	1	0,5
Ruptura poderá causar danos sobre corpos de água superficiais	2	1	0,5
Ruptura poderá afetar núcleos rurais	4	2	1
Ruptura poderá afetar estradas, pontes, rodovias, rede de energia elétrica e/ou telecomunicação, ferrovias, etc.	2	1	0,5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – INTRODUÇÃO

Conforme os objetivos propostos nesta pesquisa, as estruturas de disposição de rejeitos que foram consideradas neste trabalho são os sistemas de disposição de rejeitos de mineração compreendendo as barragens de rejeitos construídas por alteamentos sucessivos. Assim, verificando os arquivos da SEMARH e realizando entrevistas e reuniões com os responsáveis pelo licenciamento dessas estruturas em Goiás, constatou-se que existem 6 estruturas com essas características em todo o estado, como pode ser observado na Tabela 5.1.

Vale ressaltar que embora representem uma prática comumente adotada, os sistemas de disposição de rejeitos em cavas exauridas, em minas subterrâneas desativadas, em diques de reaproveitamento e sistemas de co-disposição, não foram analisados nesta pesquisa. Entretanto, os empreendimentos que utilizam estes métodos foram inclusos no inventário para um melhor controle futuro. Na Tabela 5.2 são apresentados as estruturas armazenadoras de rejeitos que não foram inclusas na análise de risco, mas que podem ser consideradas como métodos de disposição de rejeitos localizados no estado de Goiás.

No caso das mineradoras Prometálica Mineração Centro Oeste S/A, Brasil Minérios Ltda e Companhia Goiana de Ouro S/A, cadastradas na Tabela 5.2 como outras estruturas armazenadoras de rejeitos, não se obteve os dados necessários para a realização da análise de risco. No caso da Prometálica, a disposição era realizada em uma cava exaurida e, com o seu enchimento, foi construído um dique para dar continuidade na disposição, mas não foi possível encontrar os projetos referentes à construção deste dique. Da mesma forma aconteceu com a Brasil Minérios e a Companhia Goiana de Ouro que possuem projetos recentes e não foi possível a obtenção dos dados.

Tabela 5.1 - Dados das barragens de rejeitos consideradas na análise de risco

Dados da mineradora	Empresas	Anglo American Nióbio	Mineração Serra Grande	Vale Fertilizantes	Anglo American Fosfatos	Mineração Maracá	Votorantim Metais Níquel
	Município	Ouvidor	Crixás	Catalão	Ouvidor	Alto Horizonte	Niquelândia
	Minério Explorado	Pirocloro (Nióbio)	Ouro	Rocha fosfática	Rocha Fosfática	Calcopirita (cobre e ouro)	Níquel e Cobre
Dados da barragem de rejeitos	Dist. aprox. do núcleo urbano mais próximo (Km)	7,5	1	13	6,5	5	9
	Coordenadas Geográficas	18°08'53" S 47°48'27" W	14°33'41"S 49°57'38"W	18°06'17"S 47°46'50"W	18°09'48"S 47°50'34"W	14°12'20"S 49°24'23"W	14°21'38"S 48°27'1"W
	Classificação dos rejeitos conforme ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004)	Não Inerte	Não Inerte	Inerte	Inerte	Inerte	Não inerte
	Tipo de represamento	Em anel	Em vale	Em vale	Em vale	Em vale	Em vale
	Altura aproximada da barragem (m)	20	80	61	70	45	67
	Volume aprox. armazenado (hm³)	17,74		95		143,7	51
	Área do reservatório (km²)	1	0,5	6	2,5	5,5	1,6
	Alteamentos	Jusante + Montante	Linha de centro + Montante	Linha de centro + Montante	Jusante + Linha de centro + Montante	Linha de centro	Montante + Linha de centro
	Inclinação aproximada dos taludes	1V:1,5H	1V:2,5H	1V:2,5H	1V:2,5H	1V:3H	1V:3H
	Inclinação aproximada do vale a jusante	- 4,5 %	3%	2%	2%	1%	3%

Constata-se, pela Tabela 5.2, que muitas mineradoras utilizam lagoas em série para a disposição e tratamento dos rejeitos gerados, utilizando um processo de decantação e posterior reutilização do efluente tratado. Os sólidos decantados são periodicamente retirados das lagoas e utilizados na recuperação de áreas degradadas pela atividade de extração. Este procedimento é bastante eficiente em pequenas mineradoras, onde a geração de rejeitos pode ser controlada desta forma. Com a retirada dos sólidos das lagoas para o reaproveitamento não é necessário a realização de alteamentos.

No levantamento dos dados houve certa dificuldade em adquirir as mesmas informações para todas as barragens, pois, considerando o ano de realização de alguns projetos, décadas de 70 e 80, foi possível verificar que alguns estudos considerados fundamentais nos dias atuais não eram comuns na época e, conseqüentemente, o rigor nos licenciamentos era bem menor, de modo que alguns estudos mais detalhados somente começaram a ser exigidos mais recentemente.

Assim, informações relativas à operação de cada barragem, como dados referentes às taxas de disposição de rejeitos, volume armazenado, leitura de piezômetros, etc. não foram obtidos para todas as barragens. Percebe-se, nestes casos, a necessidade de se estabelecer, de forma sistemática, um procedimento que forneça de forma detalhada as informações relativas a estas estruturas e que sejam apresentadas periodicamente para o órgão de licenciamento.

Também houve dificuldade em reunir informações sobre vistorias rotineiras e consequentes anomalias encontradas, pois dificilmente é estabelecida uma periodicidade para sua realização, sendo que os relatórios resultantes dessas inspeções não são exigidos no licenciamento ambiental. Então, foi possível reunir poucos dados a respeito de inspeções de rotina e inspeções realizadas por empresas de consultoria.

Tabela 5.2 - Sistemas de disposição de rejeitos na forma de diques ou lagoas de decantação.

Empreendimento	Cidade	Minério	Coordenadas	Observações
EDEM - Empresa de Desenvolvimento em Mineração Ltda	Santa Tereza de Goiás	Granito	13°36'55.24"S 49° 1'5.94"O	Lagoa de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Areia Goiás Mineração Ltda	Senador Canedo	Quartzito	16° 48' 56,38"S 49° 9' 4,52"W	Lagoas de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
MBM Mineração S/A	Abadiânia	Quartzito	16° 11' 51,13"S 48° 48' 13,35"W	Igual ao anterior
Viza Areia e Transporte Ltda	Novo gama	Quartzito	16° 7' 3,18"S 48° 3' 25,98" W	Lagoa de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
JJX: Fortes Indústria, Comércio, Construções e Mineração Ltda	Formosa	Areia e cascalho	15° 31' 28,32"S 47° 24' 15,49"W	Igual ao anterior
Briteng Britagem e Construção Ltda	Aparecida de Goiânia	Micaxisto	16°47'22.51"S 49°10'15.93"O	Lagoas de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Areial Ouro Branco Ltda ME	Abadiânia	Quartzito	16° 04' 47,5"S 48° 47' 45,6"	Igual ao anterior
Titânio Goiás Mineração, Indústria e Comercio Ltda	Santa Bárbara de Goiás	Gnaisse	16°35'15.35"S 49°42'9.22"O	Igual ao anterior
Mineração Pedra Preta Ltda	São João d'Aliança	Manganês	14°20'6.44"S 47°23'46.60"O	Igual ao anterior
Anglo American Brasil Ltda	Barro alto	Níquel	15° 4'24.01"S 48°56'17.79"O	Tanque de decantação e recirculação de água
Prometalica Mineração Centro Oeste S/A	Americano do Brasil	Níquel e cobre	16°13'50.45"S 50° 3'38.32"O	Disposição em cava exaurida. Atualmente foi construído um dique para dar continuidade na disposição
Mineração Euro Brasil Ltda	Crixás	Ouro	14°30'53.36"S 49°59'26.14"O	Lagoas de decantação desativadas em que foi constatado uma contaminação

				por mercúrio
Mineração Fronteira Ltda	Santo Antônio do descoberto	Manganês/ferro	16° 4'11.64"S 48°20'52.00"O	Lagoas de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Cleveland Premier Mineração Ltda	Crixás	Ouro	14°34'50.82"S 49°56'6.61"O	Lagoa de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Companhia Goiana de Ouro S/A	Pilar de Goiás	Ouro	14°46'45,8"S 49°34'43,9"W	Barragem de rejeito em construção
Janio Alves Matos	Baliza	Diamante	16° 5'33.47"S 52°22'0.89"O	Lagoa de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Mineração Rio Claro Ltda	Iporá	Areia/Cascalho/ Diamante	16° 23' 59,44"S 50° 56' 53,48"W	Igual ao anterior
Paulo Moisés de Sousa e Cia Ltda	Catalão	Diamante	18° 03' 30,24"S 47° 18' 02,72"W	Igual ao anterior
Ronaldo Alves de oliveira	Campos Verdes	Esmeralda	14° 15' 24,61"S 49° 39' 20,04"W	Igual ao anterior
Antonio divino Rodrigues de carvalho	Silvânia	Arenito	16°34'11.98"S 48°22'42.92"O	Igual ao anterior
Adelcio Rissi José	Pirenópolis	Quartzito	15° 50' 48,07"S 48° 51' 36,57"W	Igual ao anterior
Pedreira Anápolis Ltda	Anápolis	Gnaisse	16° 22' 17,44"S 48° 53' 11,51"W	Lagoas de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Pedreira Araguaia Ltda	Aparecida de Goiânia	Xisto	16° 45' 59,61"S 49° 12' 49,11"W	Igual ao anterior
Rialma Distribuidora de Areia e Cascalho Ltda	Abadiânia	Quartzito	16° 11' 31,03"S 48° 47' 44,96"W	Igual ao anterior
Pedras Multicores Ltda	Pirenópolis	Quartzito	48° 52' 21,87"W 15° 44' 40,90"S	Igual ao anterior
Pedras Ponte Alta Ltda	Corumbá de Goiás	Quartzito	15° 51' 28,64"S	Igual ao anterior

			48° 36' 44,13"W	
G. Aranha & Cia Ltda ME	Pirenópolis	Quartzito	15°44'36.99"S 48°51'55.12"O	Igual ao anterior
Pedreira Goiás Ltda	Abadiânia	Xisto	16° 10' 07,36"S 48° 44' 03,47"W	Igual ao anterior
Edson Rodrigues Rosa	Vianópolis	Quartzito	16° 57' 07,15"S 48° 29' 16,69"W	Igual ao anterior
Dleon Mineradora Ltda	Abadiânia	Quartzito	16° 11' 34,72"S 48° 47' 46,50"W	Igual ao anterior
Wanda Lucia Leite	Cocalzinho de Goiás	Quartzito	15°45'23.24"S 48°49'52.63"O	Lagoa de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Brasil Minérios Ltda	São Luís dos Montes Belos	Vermiculita	16° 23' 53,18"S 50° 23' 20,43"W	Dique de rejeitos. Não foram encontrados projetos que fornecessem dados para a realização da análise de risco.
Ciplan Cimento Planalto S/A	Guapó	Granito	16° 51' 48,86"S 49° 27' 27,27"W	Lagoa de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Areia Brasil mineração Indústria e Comércio Ltda	Aragoiânia	Quartzito	16° 57' 27,11"S 49° 25' 37,81"W	Lagoas de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Eduardo Fernandes	Cristalina	Quartzito	16°44'32.11"S 47°34'42.68"O	Igual ao anterior
Armazém da areia Ltda	Senador Canedo	Quartzito	16°40'2.52"S 49°10'18.77"O	Lagoa de decantação de sólidos e reaproveitamento na recuperação de áreas degradadas
Areial Minas Goiás Ltda	Cristalina	Areia saibrosa	16°44'21.90"S 47°33'46.43"O	Igual ao anterior

Obs: por falta de dados não foram considerados para a análise de risco, projetos realizados na década de 70 e 80 que continham poucos estudos e informações sobre as estruturas

Algumas dificuldades também foram encontradas pela inexistência de alguns projetos. A atividade de licenciamento requer a apresentação dos projetos para a aprovação do órgão e, só assim, é liberada a licença para a instalação da obra. Nas obras de engenharia é muito comum que o projeto seja alterado após o início das obras pelas mais variadas questões, como imprevistos verificados em campo, questões econômicas, ambientais, e etc.. Essas alterações deveriam ser reportadas por meio de relatórios ou pela elaboração dos chamados projetos “*as built*”, que detalham a barragem da forma que foi construída. O problema é que a maioria dos projetos encaminhados para a SEMARH só possuem os dados apresentados no requerimento da licença de instalação e, após isso, não são apresentados relatórios contendo informações sobre as obras. Esses relatórios e projetos são muito importantes, pois é a partir deles que é possível constatar se a modificação do projeto inicial alterou alguma hipótese ou prejudicou algum parâmetro assumido nos projetos iniciais.

Na Figura 5.1 é mostrado um mapa do estado evidenciando a concentração dessas mineradoras na região norte e sudeste de Goiás.

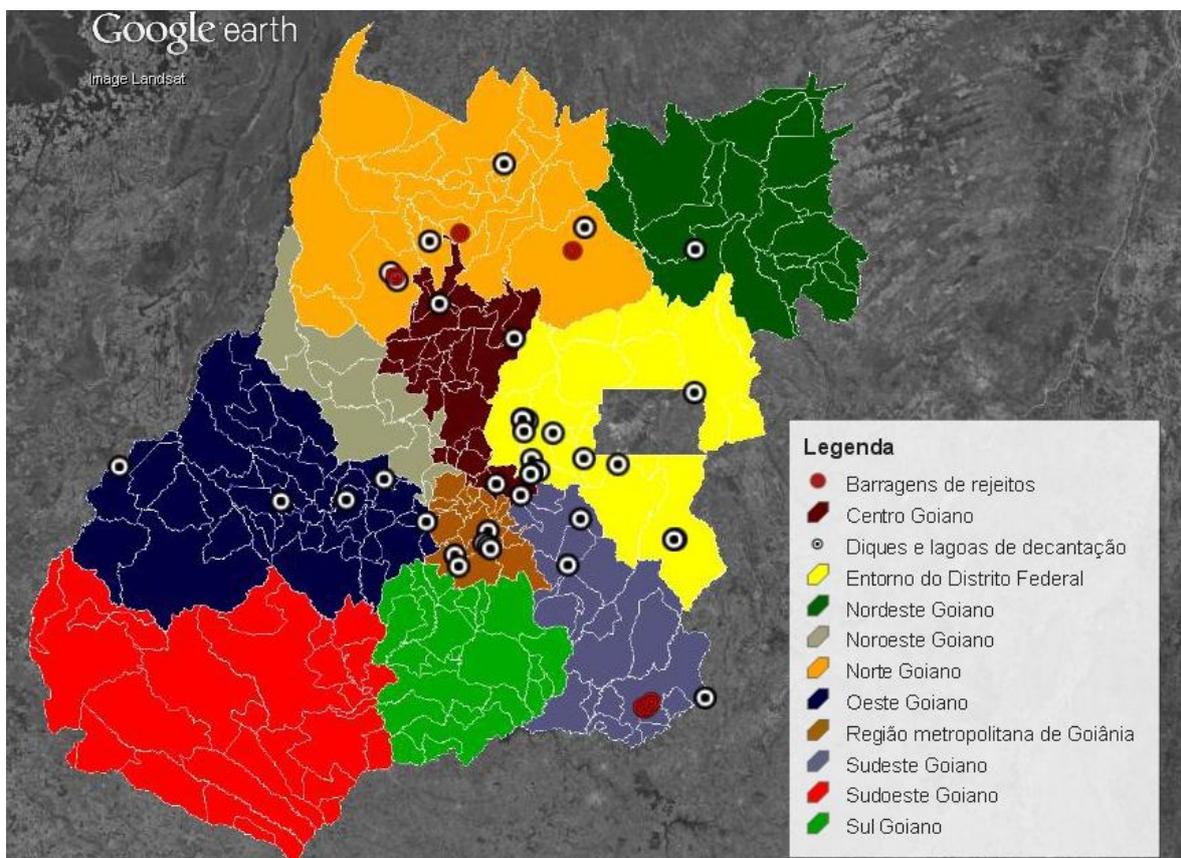


Figura 5.1 - Mapa do estado de Goiás com as barragens de rejeitos e outros sistemas de disposição de rejeitos.

5.2 – ÍNDICES DE RISCO E CLASSIFICAÇÃO DO DANO ECONÔMICO E SOCIOAMBIENTAL DAS BARRAGENS DE REJEITOS DO ESTADO DE GOIÁS

Tomando por base a metodologia apresentada no Capítulo 4, todas as barragens foram analisadas quanto ao índice de falha e de risco e quanto ao dano econômico e socioambiental. Na Figura 5.2 é apresentado um gráfico resumo com os valores encontrados para os índices de falha e de risco, população em risco e perda potencial de vidas humanas.

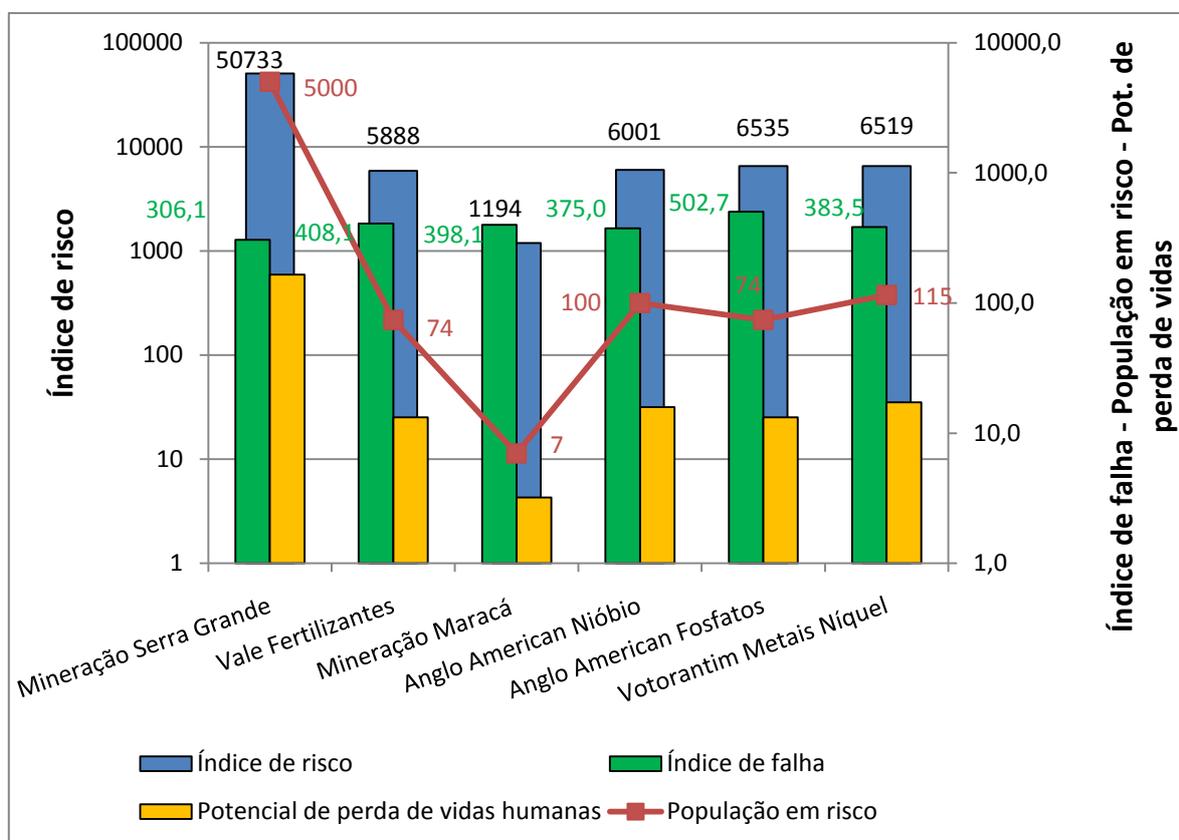


Figura 5.2 - Resultados dos índices de falha, índices de risco, população em risco e potencial de perda de vidas humanas.

Vale ressaltar que foram feitas algumas considerações comuns para todas as barragens, como o estabelecimento do fator de carga de cada cenário de solicitação. O fator de carga, probabilidade de acontecer cada cenário, foi estipulado para todas as barragens com os valores conforme a Tabela 5.3, baseada nos valores da Tabela 4.2 que estabelece valores de probabilidades para descrições verbais. Como não foi possível realizar estudos mais detalhados, partiu-se da premissa de que eventos sísmicos, considerando sismicidade

induzida, e eventos hidrológicos são prováveis. Observa-se que os valores de probabilidade adotados estão superestimados e a favor da segurança para que esta análise inicial seja mais conservadora.

Tabela 5.3 - Fatores de carga considerados para todas as barragens.

Cenários de solicitação	Fator de carga	Descrição verbal, conforme Tabela 4.2
Condição estática	0,999	Evento é certo
Evento hidrológico	0,9	Evento é provável
Evento sísmico	0,9	Evento é provável
Operação humana	Índice de falha é calculado direto	-

A necessidade de determinar a probabilidade por meio de descrições verbais é condicionada à dificuldade da realização de estudos mais aprofundados, para, neste caso específico, obter os dados relativos aos eventos hidrológicos e sísmicos.

No caso de eventos hidrológicos é necessário um estudo detalhado da bacia hidrográfica adequado ao porte do represamento em questão, que necessita, basicamente, da coleta de dados de campo e de dados históricos. A determinação da probabilidade no caso de eventos sísmicos, necessita, primeiramente, de um monitoramento direto nas barragens para controlar a sismicidade induzida por planos de fogo e demais equipamentos que induzam a vibração ao represamento e à barragem. Além disso, é necessário que seja estudado em que nível de vibração e em quais circunstâncias pode ocorrer algum prejuízo à estrutura, e após isso, determinar a probabilidade, baseado no histórico de vibrações, para que seja atingido esse nível determinado. Estudos dessa natureza demandam tempo devido à necessidade de levantamento e tratamento de uma grande quantidade de dados, inviabilizando a utilização em uma análise de investigação como essa. Entretanto, em condições em longo prazo, deveria ser inserida nas propostas de monitoramento e fiscalização a obtenção de dados que pudessem subsidiar análises de risco mais completas no futuro.

Para a determinação da população em risco, primeiramente foi necessário ter uma idéia de qual seria a distância percorrida pelos rejeitos no caso de uma ruptura. Para as barragens de rejeitos analisadas foi utilizada a calculadora disponibilizada online (<http://www.wise-uranium.org/ctfs.html>) e detalhada no capítulo anterior. No caso de barragens que armazenam rejeitos do processamento do minério de fosfato, o programa apresenta limitações e não pode ser utilizado, pois o mesmo é limitado para a determinação de

fluxo laminar, e, segundo o próprio site, rejeitos de fosfato apresentam fluxo turbulento. Portanto, para as barragens da Anglo American Fosfatos e Vale Fertilizantes, considerou-se que o fluxo de rejeitos poderia alcançar 24 km, conforme os estudos de Brown e Graham (1988). O programa foi utilizado para as outras quatro barragens com os parâmetros mostrados na Tabela 5.4. Foram utilizados os valores mínimos de resistência ao escoamento e viscosidade plástica de Bingham, considerando a faixa de valores indicados pelo site para rejeitos, pois, como não se sabe exatamente esses valores para cada tipo de rejeito, entende-se que é necessário considerar os valores mais conservadores para a análise de risco.

Após a determinação do alcance do fluxo de rejeitos, foi feita a contagem das propriedades que estariam dentro dessa distância. Algumas considerações precisaram ser feitas para cada barragem, como no caso da barragem da mineradora Anglo American Nióbio. Imediatamente a jusante do barramento, há edificações que fazem parte da mineradora e uma estrada para o fluxo de veículos. Como não foi possível levantar a quantidade exata de pessoas que trabalham no local e a intensidade do fluxo na via, pelo tamanho da edificação foi estimado que a população em risco da barragem fosse de aproximadamente 100 pessoas. Na Tabela 5.4 encontra-se resumido o cálculo da população em risco.

A única mineradora que apresentou, por meio de um plano de emergência, o número da população em risco caso houvesse a ruptura de sua barragem de rejeitos foi a Mineração Serra Grande. A apresentação deste plano de emergência foi uma exigência da SEMARH devido à barragem ter sido construída muito próxima da cidade de Crixás (cerca de 1 km) e, principalmente, pelo vale escolhido para a construção da barragem ser da mesma bacia hidrográfica de um córrego que passa dentro da zona urbana. Por isso, grande parte da cidade seria afetada por uma onda de inundação. Como foi utilizado o número declarado no plano de emergência, não foi preciso estimar a população em risco para esta barragem.

Tabela 5.4 - Valores utilizados como entrada de dados para o cálculo da distância percorrida pelos rejeitos.

	Mineração Serra Grande	Anglo American Nióbio	Votorantim Metais Níquel	Mineração Maracá	Anglo American Fosfatos	Vale Fertilizantes
Inclinação do terreno a jusante (%)	3	- 4,5	3	1	2	3
Resistência ao escoamento de Bingham (kPa)	0,96	0,96	0,96	0,96	-	-
Viscosidade plástica de Bingham (kPa.s)	0,096	0,096	0,096	0,096	-	-
Peso específico do rejeito (kN/m³)	21	15,7 (adotado)	12,6	17	-	-
Altura da barragem (m)	80	20	67	45	70	61
Distância percorrida pelos rejeitos (km)	24	1,71	17	9,6	24	24
Propriedades em risco	-	1	31	2	48	20
População em risco	5000*	100*	115	7	178	74

* Informada pelo plano de evacuação;

** Parte da mineradora a jusante.

Na Tabela 5.5 estão os resultados de todos os índices propostos na metodologia. Pode-se observar que não ocorreu uma variação significativa do índice de falha, isto porque este índice é calculado considerando, principalmente, critérios de projeto. O valor mais baixo encontrado para este índice foi o da barragem da Mineração Serra Grande, um valor que está relacionado, principalmente, com a boa disponibilidade de projetos, com a elaboração e apresentação de um PAE, com o método de disposição dos rejeitos e de controle da superfície freática, e com os fatores de segurança obtidos. A barragem da Anglo American Fosfatos apresentou um índice de falha de 502,7, o maior entre todas as barragens analisadas. O valor obtido pode ser atribuído ao sistema adotado para a descarga dos rejeitos, sendo de montante para jusante em um único ponto, por não ter apresentado um PAE e pela pouca disponibilidade de projetos.

Os índices de risco, que estão relacionados com o potencial de perda de vidas humanas, apresentaram uma grande variação dependendo da localização das barragens em relação a edificações existentes no vale a jusante. Como esperado, o valor mais alto obtido para o índice de risco foi para a mineração Serra Grande. Nas outras barragens, situadas em zonas rurais, os resultados dos índices foram baixos se comparados com o índice mais alto, mas não se pode dizer que estes dados podem ser tratados com menos seriedade. Os índices baixos apenas permitem que as mineradoras nesta situação disponham de uma maior facilidade na execução de suas atividades relacionadas à mitigação do risco, mas de forma alguma pode ser dito que estas atividades devem ser ignoradas.

Do ponto de vista econômico e socioambiental é possível tirar conclusões parecidas, pois a maioria das barragens encontram-se em zonas rurais que possuem estruturas semelhantes a jusante. Segue as considerações feitas:

- o fato da barragem da Mineração Serra Grande apresentar dano extremo é devido aos seus rejeitos não-inertes, por afetar diretamente um núcleo urbano, e também cursos d'água, núcleos rurais, estradas, rodovias, etc.;
- a barragem da Votorantim Níquel, em Niquelândia, apresentou dano muito alto por, principalmente, apresentar rejeitos não-inertes e pela ruptura afetar estradas, pontes, núcleos rurais e cursos de água;
- as barragens das mineradoras Anglo American Fosfatos e Vale Fertilizantes, por armazenar rejeitos inertes e por colocar em risco núcleos rurais, estradas, pontes e cursos d'água, apresentaram dano alto;

- a barragem da Anglo American Nióbio armazena rejeitos não-inertes e a jusante, existem construções da própria mineradora e uma estrada, por isso apresentou dano alto;
- e, por último, a barragem da Mineração Maracá apresentou dano alto por armazenar rejeitos não-inertes e afetar núcleos rurais e cursos de água.

Ainda, na Tabela 5.5 é mostrado uma comparação entre os resultados da classificação realizada pelo DNPM no ano de 2014 (classificação estabelecida pela Lei nº 12334 de 2010, apresentada no Capítulo 3) e a classificação proposta neste trabalho.

Como pode ser observado na Tabela 5.5, a classificação feita pelo DNPM para as mesmas barragens analisadas neste estudo teve como resultado a mesma categoria de risco para todas as estruturas, a categoria de risco crítico baixo. A categoria de risco crítico, conforme foi explicado no Capítulo 3, considera as características técnicas, o estado de conservação e o plano de segurança das barragens; características essas que também são consideradas no cálculo do índice de falha na metodologia RBPS adaptada neste trabalho.

Considerando que o índice de falha da metodologia RBPS pode ser de até 1000 pontos, pode-se dividi-lo em três categorias, alto, médio e baixo, para que seja possível comparar com a categoria de risco crítico utilizada pelo DNPM. Nesse sentido, o índice de falha obtido a partir da metodologia RBPS adaptada, dividido em três categorias, pode ficar assim:

- baixo: ≤ 333 pontos;
- médio: $> 333 \leq 666$ pontos;
- alto: > 666 pontos.

Dentro desse sistema proposto e considerando a pontuação obtida na metodologia RBPS adaptada, o índice de falha obtido classifica uma das barragens na categoria de risco baixo e o restante na categoria de risco Médio. A diferença entre a categoria de risco crítico e o índice de falha, considerando que o primeiro apresentou-se baixo e o outro médio para a maioria das estruturas, está na quantidade de fatores analisados nos dois sistemas de classificação. Portanto, pelo fato da metodologia adaptada neste trabalho analisar de forma mais detalhada vários aspectos das barragens que não são analisados pelo DNPM, haverá sempre uma diferença e, provavelmente, sempre mais conservadora em relação ao risco, pois tende a englobar mais fatores que podem influenciar na estabilidade das barragens de rejeitos.

Tabela 5.5 - Comparação da classificação feita pelo DNPM com a classificação RBPS adaptada

Mineradoras	Classificação realizada em 2014, conforme Lei nº 12334 de 2010			Classificação proposta para o índice de falha, índice de risco e dano econômico e socioambiental		
	Categoria de risco crítico	Dano potencial associado	Classe	Índice de falha	Índice de risco	Dano econômico e socioambiental
Mineração Serra Grande	Baixo	Alto	C	306,1	50733	Extremo
Anglo American Nióbio	Baixo	Alto	C	375	6001	Alto
Anglo American Fosfatos	Baixo	Alto	C	502,7	6535	Alto
Vale fertilizantes	Baixo	Alto	C	408,1	5888	Alto
Mineração Maracá	Baixo	Alto	C	398,1	1194	Alto
Votorantim Metais Níquel	-	-	-	383,5	6519	Muito Alto

Em relação ao dano potencial associado, que é o índice obtido da metodologia utilizada pelo DNPM que considera a existência de população a jusante, o volume do reservatório e o impacto socioeconômico e ambiental, verifica-se que todas as barragens analisadas tiveram como resultado um dano Alto, ou seja, a classificação máxima possível. Na análise RBPS adaptada realizada neste trabalho, ao invés de avaliar esses impactos com base em apenas um índice, foi avaliado, no índice de risco, a perda de vidas e, no índice de dano econômico e socioambiental, a existência de bens importantes a jusante do barramento, como estradas, pontes, áreas de conservação, núcleos rurais ou urbanos, rios utilizados no abastecimento da população, etc.

Diante dos resultados, pode-se verificar que apenas a barragem da Mineração Serra Grande possui índices mais críticos, sendo que, nas demais, a diferença nos valores dos índices não foi muito significativo, fato que pode ser explicado pelas mesmas estarem localizadas em regiões fora da influência de núcleos urbanos.

Finalmente, comparando as duas metodologias, a classificação proposta pelo DNPM e a classificação utilizada neste trabalho, pode-se concluir que as duas cumprem o propósito de estabelecer uma avaliação das barragens de rejeitos existentes, com a finalidade de subsidiar decisões baseadas nos índices obtidos visando sempre a melhoria da segurança destas estruturas.

Entretanto, a metodologia utilizada pelo DNPM possui um limite para a quantificação de seus índices, podendo ser classificados apenas como baixo, médio e alto. O problema de se ter um limite para quantificar um índice de risco pode ser explicado comparando a barragem de rejeitos da Mineração Serra Grande com as demais barragens. Os resultados obtidos na metodologia proposta neste trabalho mostram que esta barragem possui um índice de risco cerca de quarenta e duas vezes maior do que o índice de risco da barragem da Mineração Maracá, pois basicamente também há uma grande diferença no número de pessoas em risco. Isto mostra que a barragem da Mineração Serra Grande não pode possuir um valor de índice de risco equivalente às demais barragens, pois os danos em caso de ruptura são muito superiores. Isto mostra que a metodologia utilizada pelo DNPM não consegue prever estas diferenças nos índices de riscos por ela avaliados, causando uma uniformização de resultados que pode prejudicar a tomada de decisões com base no risco.

Apesar de ser bem simples do ponto de vista técnico, a metodologia utilizada pelo DNPM cumpre os propósitos de uma análise de investigação, utilizando dados de fácil

obtenção, apresenta resultados que podem ser interpretados facilmente e que estão relacionados com um programa de monitoramento, por meio do qual o DNPM controla a periodicidade de inspeções internas e externas e a documentação que deve ser apresentada.

O programa de monitoramento de barragens completa o propósito das análises de risco, pois é a partir destas avaliações periódicas que é possível se estabelecerem procedimentos, metas de melhoria, rotinas de inspeções, etc., todos visando à redução dos índices de risco e melhorando a gestão de segurança das barragens. Neste contexto, no item seguinte é proposto um exemplo de um programa de monitoramento que pode ser utilizado conjuntamente com a análise RBPS adaptada.

5.3 – PROPOSTA DE UM PROGRAMA DE MONITORAMENTO UTILIZANDO DADOS DA ANÁLISE DE RISCO REALIZADA

Uma das finalidades de uma análise de riscos é subsidiar a tomada de decisões com relação à prevenção de acidentes, estabelecendo procedimentos adequados para cada categoria de risco. Partindo desta premissa e considerando a análise de risco proposta na metodologia utilizada, é feita a sugestão de um modelo de um programa de monitoramento. Neste sentido, são utilizadas as pontuações do índice de falha e do índice de risco de cada barragem; portanto, cada barragem deverá cumprir as exigências referentes aos dois índices.

Tabela 5.6 - Programa de monitoramento vinculado à análise de risco proposta.

Programa de monitoramento		Índice de falha			Índice de risco		
		≤ 333	> 333 ≤ 666	> 666	≤ 10000	> 10000 ≤ 20000	> 20000
Inspeções	Apresentar, no período indicado ou antes da execução de um novo alteamento, relatório de inspeção realizada por um consultor externo com declaração de condição de estabilidade, diagnosticando o barramento e o reservatório e apresentando as irregularidades observadas, assim como as intervenções recomendadas. Este relatório deve apresentar em sua conclusão se o alteamento e/ou a operação é viável, considerando o que foi visto em campo;	Bienal	Anual	Semestral			
	Inspeções internas realizadas a cada (dias):	30	15	7			
Análises	Realizar análises físicas e químicas do curso d'água influenciado pela barragem de rejeitos. Os parâmetros que devem ser analisados são os que podem ser alterados pela presença dos rejeitos. A periodicidade dependerá da classificação do rejeito armazenado: a) Perigoso: análise quinzenal; b) Não inerte: mensal; c) Inerte: Bimestral.	x	x	x			
	Se o depósito for em diques fechados, ou de uma forma que não esteja em contato direto com cursos d'água superficiais, instalar poços de monitoramento do lençol freático para o monitoramento da qualidade da água subterrânea. Realizar uma análise semestral para os parâmetros que	x	x	x			

	podem ser alterados pelas características dos rejeitos armazenados;						
Monitoramento da estabilidade	Marcos superficiais, monitoramento semanal do nível dos piezômetros, medidor de vazão;	X					
	Marcos superficiais, monitoramento diário do nível dos piezômetros, medidor de vazão, inclinômetros, medidores de recalques;		X				
	Marcos superficiais, monitoramento eletrônico do nível dos piezômetros, medidor de vazão, inclinômetros, medidor de vibração e medidores de recalque;			X			
Plano de emergência	Simulação de inundação e quantificação exata da população em risco;				X	X	X
	Identificação das áreas de interesse econômico, social e ambiental que seriam afetadas;				X	X	X
	Implantação de um sistema de alarme sonoro para o aviso da população a jusante;					X	
	Sistema de aviso às autoridades competentes;				X	X	X
	Delimitação das áreas de maior risco, sujeitas a um fluxo destrutivo, separando das áreas que sofreriam apenas pequenos alagamentos;						X
	Implantação de um sistema de alarme sonoro e visual nos locais que podem ser afetados. Os avisos devem ser feitos em rede de televisão e nas estações de rádios AM/FM locais						X
	Treinamento de uma equipe especializada em resgates;						X

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este capítulo está dividido em duas partes, a primeira trata especificamente das observações e conclusões a respeito do contexto teórico da pesquisa e a outra apresenta as conclusões obtidas mais especificamente no contexto da realização do inventário de barragens de rejeitos do estado de Goiás e na aplicação da análise de risco, bem como as limitações e vantagens observadas e as recomendações que seriam interessantes em pesquisas futuras.

Portanto, diante do exposto chega-se à conclusão que as atividades mineiras, considerando apenas as atividades de extração, tratamento e beneficiamento dos minerais, já causam diversos tipos de impactos ambientais. Impactos sobre o solo, sobre a atmosfera, sobre a fauna e flora, sobre as águas subterrâneas e superficiais e, ainda, sobre a população, que sofre com toda essa degradação e pode desenvolver diversas doenças, muitas delas causadas pelo efeito cumulativo de substâncias tóxicas e/ou radioativas no organismo. Se num cenário normal, as atividades mineiras já são bastante impactantes, em situações adversas, como no rompimento de uma barragem de contenção de rejeitos, os impactos ambientais são desastrosos.

No estudo de casos históricos de acidentes em barragens de rejeitos é possível constatar que o índice de acidentes ainda é muito grande, e, apesar dos esforços por parte das mineradoras para a melhoria da segurança das barragens de rejeitos, esses acidentes continuam ocorrendo, como aconteceu, recentemente, nos municípios de Rio Pomba e Miraf em Minas Gerais, nos anos de 2003, 2006 e 2007. Por meio do estudo desses casos históricos, é possível verificar as causas mais frequentes para que as medidas de segurança possam ser tomadas nas fases de projeto e de operação das barragens de rejeitos.

É pelo estudo de casos históricos que se pode comprovar que, dentre todos os problemas apresentados por barragens de rejeitos, como a instabilidade de taludes, o galgamento, a erosão interna e externa, a instabilidade de fundações, etc., a grande maioria é influenciada direta ou indiretamente pelo manejo das águas pluviais e da água presente no próprio depósito de rejeitos (superfície freática). Critérios de projeto e práticas operacionais podem ser adotados, e assim, melhorar significativamente a estabilidade da barragem, como o controle da taxa de disposição e a forma de descarga de rejeitos. O controle da taxa de

disposição é importante para que não ocorram acrécimos de poropressão devido à sobrecarga imposta pela descarga dos rejeitos, onde o ideal é respeitar a capacidade que os rejeitos têm de dissipar as poropressões geradas. Outro critério operacional importante é que a descarga dos rejeitos seja feita com a adoção de um método para melhorar a segregação das partículas sólidas, sendo ainda mais eficiente se associado à disposição em diversos pontos a partir da crista da barragem e no sentido de jusante para a montante. Essa prática faz com que a praia de rejeitos seja estendida e o lago seja afastado do talude de jusante e, ainda, melhora a drenagem interna da barragem, pois os rejeitos mais grossos tendem a ficar mais próximos da barragem e os finos mais distantes.

A escolha de um local para a construção de uma barragem de rejeitos também é um fator que, futuramente, pode influenciar na presença de água dentro do depósito. Barragens dispostas em vales tendem a obstruir drenagens e devem ser projetadas para armazenar parte dessa água, que geralmente é utilizada no processo produtivo da mineradora. Porém, a quantidade de água, dependendo da vazão do rio, é bem maior do que em um depósito em bacia, cuja água presente vem somente do processo de produção e de precipitações. Portanto, o projetista deve considerar esses fatores e tentar compensar esse aspecto implantando um sistema de drenagem que será eficiente até mesmo depois de realizar os alteamentos necessários. É importante ressaltar que depósitos localizados em vales de rios, dependendo do rejeito armazenado, facilitam a contaminação do curso d'água a jusante pelo rejeito estar em contato direto com a água do rio.

O risco, associado à probabilidade e às consequências de todos esses acontecimentos, deve ser avaliado pelos responsáveis dessas barragens e pelos órgãos fiscalizadores a fim de manter um equilíbrio entre o que é produzido e o quanto é degradado. Baseado nisso, a gestão da segurança em barragens surge como uma tentativa de verificação e mitigação desses riscos por meio de atividades regulares e sistemáticas e projetos de melhoria constantes. Os projetos de melhoria podem englobar tanto a parte estrutural, com a instalação, por exemplo, de equipamentos de segurança e monitoramento, como a parte de elaboração dos planos de evacuação e de atendimento às emergências. Dentro das atividades triviais está o cumprimento de critérios operacionais, a realização de inspeções de rotina para verificar as condições da estrutura, a realização de ensaios em campo e análises dos dados coletados e, por último, a realização de análises de riscos que funcionam como um indicador de qualidade das estruturas analisadas, onde o empreendedor deve buscar sempre a melhoria contínua.

Assim, a análise de risco é parte fundamental do processo de gestão de segurança de uma barragem de rejeitos, pois o uso dessas análises permite a verificação dos componentes que precisam de melhorias, o que facilita a tomada de decisões em relação ao processo de mitigação e/ou aceitação do risco.

No Brasil, somente após ocorrer acidentes em barragens de rejeitos no estado de Minas Gerais, foi publicada a Lei nº 12334 de 2010, a resolução (CNRH) nº 143 de 2012 e a portaria (DNPM) nº 416 de 2012, onde ações começaram a serem tomadas tendo como base os resultados de uma análise de riscos. Apesar das análises envolvidas serem qualitativas e pouco detalhadas, é importante ressaltar que esse tende a ser o passo inicial, visto que antes disso não se sabia ao certo nem a quantidade de barragens de rejeitos existentes no Brasil.

Acrescenta-se ainda que os métodos de classificação propostos para as barragens brasileiras apresentam algumas incongruências, pois existem alguns parâmetros com pouca ou nenhuma relevância para o caso das barragens de rejeitos, observando-se também a duplicidade de alguns critérios que acabam influenciando no resultado final. Na quantificação do dano potencial associado, há a tendência em impor um limite específico para a sua determinação, podendo ser baixo, médio ou alto, sendo que as consequências deveriam ser mensuradas sem a imposição de um limite mínimo ou extremo.

Entretanto, é importante reconhecer que, com a publicação dessa lei, o Brasil está dando os primeiros passos na área de segurança de barragens de rejeitos, mas impõe-se sempre melhorar essas práticas, buscando cada vez mais uma gestão eficiente trazendo resultados cada vez mais satisfatórios. Deve-se considerar que, apesar de o Brasil estar apenas iniciando a gestão de suas barragens de rejeitos, muitos países ainda não adotaram nenhum tipo de metodologia por esse problema ser ainda relativamente recente.

Dentro do contexto da legislação das barragens brasileiras, é importante acrescentar que atualmente está tramitando, na câmara dos deputados do Brasil, o projeto de lei nº 6259 de 2013, que poderá tornar obrigatória a contratação de seguros contra os potenciais prejuízos que barragens podem causar. Se esta proposta for fundamentada dentro dos conceitos da engenharia e não no sentido de prejudicar os empreendimentos, poderá, além de garantir a reparação dos prejuízos, servir como incentivo à realização de investimentos para a melhoria da segurança destas barragens. Neste sentido, espera-se que o cálculo do valor do seguro possa, além de considerar a probabilidade de falha da barragem, considerar também a gravidade das consequências que poderão ser causadas a jusante. Estima-se, desta forma, que

o valor do seguro tenderá ser mais baixo quanto menor for o risco de falha e as suas consequências, estimulando os empreendedores a investir cada vez mais na estabilidade e segurança destas estruturas para reduzir os riscos.

Com relação às barragens goianas, devido às dificuldades encontradas na elaboração dos inventários e tomando como base o banco de dados consultado, é possível afirmar que ainda existe uma grande deficiência em relação ao gerenciamento dos dados e informações sobre estas estruturas. No processo de licenciamento dessas barragens de rejeitos, uma das causas de haver tanta divergência é o fato de que ainda não foi estabelecido um termo de referência ou instrução normativa para nortear os empreendimentos na entrega de documentos, e assim, alguns dados que seriam de fundamental importância para a avaliação da barragem são entregues somente se for da vontade do empreendedor, pois não se trata de uma exigência formal.

Com a publicação, por parte do DNPM, da portaria nº 416 de 2012 (DNPM, 2012), alguns procedimentos foram prescritos às mineradoras, sendo que o cumprimento dos mesmos deve ser fiscalizado pelo próprio DNPM. Entretanto, estes procedimentos também deveriam ser fiscalizados e adotados pela SEMARH, que é o órgão responsável pela conservação do meio ambiente no estado de Goiás. Fazendo isso, ou estabelecendo uma norma própria, é possível buscar um melhor controle das barragens de rejeitos presentes no seu território, bem como obter uma melhora significativa na qualidade dos dados apresentados.

A análise RBPS escolhida para adaptação neste trabalho, desenvolvida pela agência norte americana Bureau of Reclamation (Escuder et al., 2007 e Harrald et al., 2004), possui uma proposta interessante, pois pode ser essencialmente qualitativa, da forma como foi utilizada neste estudo, ou seja, sem a utilização de procedimentos estatísticos, ou também possuir partes quantitativas, mas que dependeria da quantidade de dados disponíveis para a utilização.

Como sugestão para complementações futuras dessa análise de risco, recomenda-se a implantação de análises quantitativas, o que tornaria os resultados ainda mais confiáveis. As partes quantitativas poderiam ser inseridas no cálculo dos fatores de carga de cada cenário, sendo que, dentro de cada um deles, podem existir vários tipos de solicitações. No cenário hidrológico, por exemplo, algumas cargas possíveis seriam: a) a probabilidade de elevação da superfície freática a níveis de alerta; b) a probabilidade de elevação da poropressão a valores

que podem comprometer a estrutura, causada por altas taxas de disposição de rejeitos; c) a probabilidade de galgamento, etc. Quanto mais cenários de cargas forem considerados, mais completa e precisa será essa análise de risco. Apesar de não ter sido considerado todos esses cenários na pesquisa realizada, principalmente por falta de dados, essa limitação na determinação dos fatores de carga não prejudicou o resultado dos fatores de resposta e do índice de risco.

Outro fator importante é que, apesar de o Brasil apresentar baixa sismicidade, para a determinação correta do cenário sísmico, é importante que seja feito o monitoramento dos níveis de vibração devido, principalmente, aos planos de fogo executados na mineração. Entretanto, não se encontra na literatura esse assunto mais detalhado, de forma que não se sabe ao certo a faixa tolerável de níveis de vibrações para essas estruturas, o que faz com que os dados obtidos no monitoramento não tenham a devida representatividade, até que se estude o comportamento de barragens de rejeitos submetidas à sismicidade induzida. Diante disso, um estudo experimental poderia ser desenvolvido para avaliar até que ponto a sismicidade induzida não seria prejudicial.

Quanto aos parâmetros utilizados para atribuir a pontuação dos fatores de resposta, acredita-se que os mesmos foram escolhidos coerentemente, pois na proposta para a realização do trabalho não se conhecia de forma completa que tipos de dados seriam obtidos. Apesar de ainda não haver um termo de referência que padronize a documentação necessária para processos de licenciamento ambiental de barragens de rejeitos na SEMARH, os dados computados foram suficientes para se obter resultados interessantes. Ainda é importante ressaltar que este tipo de análise deve ser sistematicamente complementada na medida em que são obtidos novos dados, tornando os resultados cada vez mais sólidos. A distribuição da pontuação também é um fator importante e deve ser realizada preferencialmente por uma equipe experiente, pois influencia diretamente nos resultados.

Alguns métodos utilizados no processo de análise de risco precisam ser revistos em pesquisas futuras, como: o programa utilizado para o cálculo da distância percorrida por um fluxo de rejeitos liquefeitos e os coeficientes utilizados como dados de entrada; a equação utilizada para obter o tempo de ruptura de uma barragem e a equação para a determinação do potencial de perda de vidas humanas.

No primeiro caso não foi possível ter acesso às equações utilizadas pelo programa, dificultando a realização de uma explicação mais adequada do procedimento utilizado nos

cálculos. Apesar de ter sido realizada uma validação com a utilização de dados históricos, é importante lembrar que os dados de entrada foram adotados de forma igual para todas as barragens, o que não acontece na prática. Entretanto, para os propósitos de uma análise de investigação, a ferramenta mostrou-se adequada, considerando a inexistência de dados mais específicos que poderiam ajudar em uma análise mais aprofundada.

Também não foi possível a obtenção de um valor mais adequado para a resistência ao escoamento de Bingham e a viscosidade plástica de Bingham, ficando como sugestão futura a realização de ensaios para a determinação desses coeficientes para diversos tipos de rejeitos ou a obtenção na literatura de valores mais aproximados.

Com relação à Equação 3.6 que foi utilizada para o cálculo do tempo de ruptura da barragem, e às Equações 3.3, 3.4 e 3.5, que foram usadas no cálculo do potencial de perda de vidas humanas, entende-se que é necessário realizar pesquisas mais específicas ao contexto das barragens de rejeitos, pois em barragens convencionais estas análises vêm sendo estudadas há bastante tempo, sendo que há várias metodologias já adotadas por órgãos regulamentadores de outros países.

Nos valores obtidos para os índices de falha observou-se uma pequena variação, principalmente pelos fatores de carga adotados serem iguais para todas as barragens. Com isso ficou evidenciado a necessidade de complementar o sistema de pontuação e considerar critérios que também são muito importantes, como a permeabilidade da fundação da barragem. Desta forma, considerando as deficiências apresentadas no banco de dados durante o desenvolvimento do trabalho, seria interessante a incorporação de mais informações na análise de risco, que poderiam ser obtidas, em uma pesquisa futura, no cadastro realizado pelo DNPM.

Deve-se deixar claro que a realização de análises mais específicas é de fundamental importância para a verificação real do risco, pois um dos objetivos das análises de investigação é fornecer dados para indicar as barragens que precisam de um maior cuidado. Assim, para as barragens que apresentaram altos valores para o índice de falha e/ou índice de risco, é recomendável a realização de uma análise quantitativa detalhada com a finalidade de calcular a probabilidade real de ruptura e, com a ruptura, determinar as consequências avaliando a distância real que pode ser alcançada pelos rejeitos

O programa de monitoramento proposto serviu para exemplificar a utilização dos resultados da análise de risco, e não necessariamente representa a melhor forma de controle

dessas estruturas. Apesar do seu conteúdo não constituir a forma ideal de monitoramento, a estrutura básica é válida, pois estabelece diretrizes para a realização de inspeções internas e externas, para o monitoramento da estabilidade, para a realização de análises e para a execução do plano de emergência. Contudo, para que seja estabelecido um programa de monitoramento efetivo, é necessária a realização de um levantamento do panorama mundial, verificando por meio de um levantamento bibliográfico o que os órgãos fiscalizadores de outros países exigem dos proprietários das barragens de rejeitos em suas zonas de atuação.

Em síntese, apesar dos resultados da análise de risco utilizada neste trabalho não representarem a probabilidade real de cada barragem ocasionar algum acidente, é possível verificar que os números transmitem de forma satisfatória o risco causado por cada barragem, indicando um nível aproximado da confiabilidade da estrutura. Portanto, dentro das circunstâncias apresentadas inicialmente e das dificuldades encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa, a análise RBPS adaptada mostrou-se eficaz para as condições e objetivos propostos, e pode ser considerada uma boa opção de análise de riscos associadas à avaliação geotécnica de barragens de rejeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, P. C., OLIVEIRA, S. L. (1998). Mineração. Geologia de Engenharia, A. M. DOS SANTOS & S. N. A. BRITO (eds.), Editora Oficina de Textos, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABMS), São Paulo, SP, pp. 431-438.

ANDRADE, M. R., SILVA, C. S. (2012). Desempenho do setor mineral – 2012 (ano base 2011), Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Goiânia, GO, Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=6583> Acesso em: 09 dez. 2012.

ASSIS, A. P., HERNANDEZ, H. M., COLMANETTI, J.P. (2003). Apostila de barragens. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170 p.

BRASIL (2010). Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm> Acesso em: 4 de junho de 2014

BRASIL (2012). Resolução nº 143, de 10 de junho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Conselho Nacional dos Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7231> Acesso em: 4 de junho de 2014.

BRASIL (2013). Projeto de lei nº 6259 de 2013. Torna obrigatória a contratação de seguro contra o rompimento ou vazamento de barragens, e dá outras providências. Câmara dos Deputados do Brasil, Brasília, DF. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=529FB2DFD047C4E256BD23C775789A1B.proposicoesWeb1?codteor=1125702&filename=PL+6259/2013> Acesso em: 10 de outubro de 2014.

CAVALCANTE, A. L. B. (2004). Modelagem e simulação do transporte por arraste de sedimentos heterogêneos acoplado ao mecanismo tensão-deformação-poropressão aplicado a barragens de rejeitos. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 313 p.

CHAMBERS, D. M., HIGMAN, B. (2011). Long term risks of tailings dam failure. Report, Center for Science in Public Participation (CSP²), Bozeman, United States of America, 21 p.

DIEHL, P. (2009). Tailings flow slide calculator: Determine the extent of a flow slide of liquefied mill tailings. Disponível em:< <http://www.wise-uranium.org/ctfs.html>> Acesso em: 4 de junho de 2014.

DNPM, (2010). Anuário Mineral Brasileiro 2010. Relatório, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Ministério de Minas e Energia, Brasília, DF, Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2010/GO_2010.pdf> Acesso em: 4 de junho de 2014.

DUARTE, A. P. (2008). Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, MG, 114 p.

EPA (1994). Design and evaluation of tailings dams. Technical report, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, USA, 59 p.

ESCUDE, I., MEMBRILLERA, M. G., MORENO, P., PÉREZ, O., ARDILES, L., JENARO, E. (2007) Development of a complementary program based on security risk analysis for dams of the hydrographic confederation of the Duero (in Spanish). V Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Sevilha, Espanha, 15 p.

ESPÓSITO, T. J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 363 p.

ESPÓSITO, T. J., DUARTE, A. P. (2010). Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco. Revista Escola de Minas (REM), 63(2): 393-398.

FARIAS, R. S. (2004). Avaliação do potencial de dano ambiental das barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no estado de Minas Gerais. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), Belo Horizonte, MG, Disponível em: http://www.em.ufop.br/ceamb/petamb/cariboost_files/relatorio_barrag__20rejeitos_20mg.pdf Acesso em: 16 dez. 2012.

FOSTER, M., FELL, R., SPANNAGLE, M. 2000. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. Canadian geotechnical journal, Canada, pp. 1025-1061.

GOMES, R.C. (2009). Caracterização Tecnológica e Sistemas de Disposição de Resíduos de Mineração. NUGEO - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 220p.

GRAHAM, W. J. (1999). A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. DSO-99-06, Bureau of Reclamation, Denver, USA, 43 p.

HARRALD, J. R., RENDA-TANALI, I., SHAW, G. L., RUBIN, C. B., YELETAYSI, S. (2004). Review of risk based prioritization/decision making methodologies for dams. Report, Institute for Crisis, Disaster, and Risk Management, The George Washington University, Washington, USA, 42 p.

IBGE (2010). Censo demográfico 2010, características da população e dos domicílios. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Ministério do Planejamento,

Orçamento e Gestão, Brasília, DF, Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/93/cd_2010_caracteristicas_populopopu_domicilios.pdf> Acesso em: 4 de junho de 2014

ICOLD (1989). Tailings dams safety - guidelines. Bulletin 74, International Commission on Large Dams (ICOLD).

ICOLD (2001). Tailings dams: risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121, International Commission on Large Dams (ICOLD), France, 144 p.

ICME (1998). An Introduction to Tailings. Case Studies on Tailings Management. International Council on Metals and the Environment (ICME), Ottawa, Canada, 58 p.

JEYAPALAN, et al., (1982). Dam-break studies for mine tailings impoundments. In: Geotechnical Engineering Program, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, USA, pp. 39-53.

LOZANO, F. A. E. (2006). Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 128 p.

MENESCAL, R. A., CRUZ, P. T., CARVALHO, R. V., FONTENELLE, A. S., OLIVEIRA, S. K. F. (2005b). Uma metodologia para avaliação do potencial de risco em barragens do semi-árido. A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil, Ministério da Integração Nacional, Brasília, DF, pp. 137-153.

MENESCAL, R. A., VIEIRA, V. P. P. B., OLIVEIRA, S. K. F. (2005a). Terminologia para análise de risco e segurança de barragens. A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil, Ministério da Integração Nacional, Brasília, DF, pp. 31-53.

MMA (1996). Classification of dams according to the potential risk (in Spanish). Guía Técnica, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España, 63 p.

OLDECOP, L., RODRÍGUEZ, R. (2006). Stability and security of mineral deposits (in Spanish). R. Rodríguez & A. G. Cortés (Eds.), Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España, pp. 197-243.

ORTUÑO, M. G. M. (2007). Contribution to the implementation of analysis and hazard statements in Spanish dams, including prioritization of investments (in Spanish). PhD Thesis, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Valencia, España, 903 p.

PERINI, D. S. (2009). Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação de mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.

PROCURADORIA DA REPÚBLICA EM MINAS GERAIS (2012). MPF entra com 55 ações para obrigar empresas a apresentar plano de contenção de barragens. Belo Horizonte, MG. Disponível em: <<http://www.prmg.mpf.gov.br/imprensa/noticias/meio-ambiente/mpf->

entra-com-55-acoes-para-obrigar-empresas-a-apresentar-plano-de-contencao-de-barragens>. Acesso em: 19 dez. 2012.

RIBEIRO, L. F. M. (2000). Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235 p.

RIBEIRO, L. F. M., ASSIS, A. P., MILONAS, J. G. (2009). Caracterização tecnológica de sistemas de contenção de rejeitos de minério de ferro construídos com a técnica do aterro hidráulico. Livro comemorativo dos vinte anos do Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Editora FT, Brasília, DF, pp. 393-426.

ROBERTSON, A. M., SHAW, S. (2003). Risk management for major geotechnical structures on mines. Proceedings of computer applications in the mineral industries, CAMI, Calgary, Canada, pp. 8-10.

RODRÍGUEZ, R., ACERO, P. (2006). Risk and environmental impact of mining and metallurgical activities (in Spanish). Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente, R. Rodríguez & Á. García-Cortés (eds.), Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Espanha, pp. 377-393.

RODRÍGUEZ, R., GARCÍA, C., MANTECA, J. I. (2006). Thematic cartography and inventory in mining areas (in Spanish). Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente, R. Rodríguez & Á. García-Cortés (eds.), Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Espanha, pp. 27-66.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (2000). Decifrando a Terra. Oficina de textos, São Paulo, SP, 568 p.

UNEP (1998). Case Studies on Tailings Management. United Nations Environment Programme (UNEP), International Council on Metals and the Environment, France, 58p.

USBR (2011). Dam safety risk analysis: best practices training manual. Manual for internal use, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (USBR), Denver, USA.

VICK, S. G. (1983). Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. Wiley Int., New York, USA.

ZARDARI, M. A. (2011). Stability of tailings dams: Focus on numerical modelling. PhD Thesis, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 196 p.