

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

GESTÃO DE RISCO APLICADO A OBRAS DE BARRAGEM

BERNARDO ELOI KLIMKIEVICZ

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM
ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE GEOTECNIA

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2016

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

GESTÃO DE RISCO APLICADO A OBRAS DE BARRAGEM

BERNARDO ELOI KLIMKIEVICZ

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ANA CAROLINA LOYOLA
(EXAMINADORA EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 DE DEZEMBRO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

KLIMKIEVICZ, BERNARDO ELOI

Gestão de Risco Aplicado a Obras de Barragem. [Distrito Federal] 2016.

(ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Barragens

2. Gestão de Risco

3. Módulo de Ruptura

4. Análise de Risco

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

KLIMKIEVICZ, B. E. (2016). Gestão de Risco Aplicado a Obras de Barragem. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-AA005/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bernardo Eloi Klimkievicz

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Gestão de Risco Aplicado a Obras de Barragem.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

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

Bernardo Eloi Klimkievicz

Condomínio Prive Morada Sul – Jardim Botânico

71680-352 - Brasília/DF – Brasília

RESUMO – GESTÃO DE RISCO APLICADO A OBRAS DE BARRAGEM

As barragens são grandes estruturas com a função de reter fluidos e sólidos. Como qualquer outra obra de engenharia, as barragens estão sujeitas a diversas incertezas durante sua construção e operação. Devido ao seu grande porte, o colapso de uma barragem pode gerar enormes danos, destruindo regiões inteiras que se encontram a jusante do acidente. Neste contexto, existe uma grande necessidade em se apurar os riscos gerados por essas estruturas e adotar medidas proativas de gestão desse risco de forma que eles nunca se concretizem ou, caso o cenário de catástrofe venha a ocorrer, que ele cause o menor dano possível.

Neste projeto será abordada a técnica de gestão de risco a qual visa quantificar e gerir os riscos em todas as fases do ciclo de vida do empreendimento. Também será abordada a Política Nacional de Segurança de Barragem, instituída pela Lei nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010, que traz um enfoque da gestão de risco para as obras de barragem aplicável em todo o território nacional. Ainda será realizado um estudo de caso para calcular a susceptibilidade da barragem à instabilidade de talude nos cenários em que o reservatório se encontrar no nível d'água máximo maximorum e no nível d'água normal.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	ESCOPO DO PROJETO	14
2	AValiaÇÃO DE RISCO	15
2.1	CONCEITO DE RISCO	17
2.2	GESTÃO DE RISCO	18
2.2.1	Estabelecimento do contexto	20
2.2.1.1	Crterios de tolerância e aceitabilidade	21
2.2.2	Identificação de riscos	25
2.2.3	Análise de risco	26
2.2.3.1	Métodos de análise de risco	26
2.2.4	Avaliação de riscos	30
2.2.5	Tratamento de riscos	31
2.3	LEI N° 12.334, DE 2010.....	32
3	ESTUDO DE BARRAGENS	35
3.1	CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS	35
3.1.1	Barragens convencionais.....	37
3.1.1.1	Barragem de terra.....	38
3.1.1.2	Barragem de enrocamento.....	39
3.1.1.3	Barragem de concreto	40
3.1.2	Barragens não convencionais.....	40
3.2	MODOS DE RUPTURA DAS BARRAGENS.....	41
3.2.1	Modos de ruptura das barragens de terra e enrocamento.	41
3.2.1.1	Galgamento.	41
3.2.1.2	instabilidade de taludes.....	46
3.2.1.3	Erosão interna (“piping”)	48
3.2.2	Modos de ruptura das barragens de concreto.....	51
3.2.2.1	Estabilidade à Flutuação	53
3.2.2.2	Estabilidade ao tombamento.....	55
3.2.2.3	Estabilidade ao deslizamento	56
3.3	ANALISE DE FLUXO EM REGIME PERMANENTE.....	59
4	MÉTODOS DE ANÁLISE PROBABILISTICA.....	60
4.1	MÉTODO FOSM	62
4.2	MÉTODO DAS ESTIMATIVAS PONTUAIS	63
4.3	MÉTODO MONTE CARLOS.....	65

5	ESTUDO DE CASO	66
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM	67
5.2	SEÇÃO DE ESTUDO DA BARRAGEM.....	68
5.3	CÁLCULO DE RISCO PELO MÉTODO QUALITATIVO	69
5.4	CALCULO DA SUSCEPTIBILIDADE	70
5.4.1	Susceptibilidade do primeiro cenário	71
5.4.2	Susceptibilidade do segundo cenário.....	77
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	80
6.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	81
	BIBLIOGRAFIA	83
A	APÊNDICE	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistema integrado de segurança (PERINI, 2009)	16
Figura 2.2: Esquema geral do sistema de segurança integrada aplicado a barragem (ALMEIDA, 2001).....	16
Figura 2.3: Principais atividades da gestão de risco (Pimenta, 2009).	19
Figura 2.4: Processo de Gestão de Risco (ABNT, 2009).	20
Figura 2.5: Curva F-N para riscos (Melo, 2014)	22
Figura 2.6: Curva F-N proposta pelo CETESB.	23
Figura 2.7: Exemplo de uma matriz de risco semi-quantitativa (Pimenta, 2009).	24
Figura 2.8: Arranjo esquemático da Política Nacional de Segurança de Barragens (Melo, 2014)	33
Figura 3.1: Amortecimento de uma onda de cheia MODIFICADO (GUO, 2013).	36
Figura 3.2: Seção típica de uma barragem de terra homogênea (ASSIS, 2014)	38
Figura 3.3: Barragem de terra zoneada – Barragem de Orós (CRUZ, 1996)	39
Figura 3.4: Processo de rompimento por galgamento (USACE, 2014)	42
Figura 3.5: Árvore de evento sem detecção de cheia (Silveira & A. Machado, 2005).	45
Figura 3.6: Árvore de evento com detecção de cheia (Silveira & A. Machado, 2005).	45
Figura 3.7: Superfícies de ruptura circulares (Assis, 2003).	46
Figura 3.8: Possíveis rupturas planares (ASSIS, 2003).	47
Figura 3.9: Processo de rompimento por piping (USACE, 2014).....	49
Figura 3.10: Distribuição simplificada das pressões hidrostáticas (ELETÓBRÁS, 2003).	53
Figura 3.11: Distribuição simplificado das pressões hidrostática com linhas de drenos (ELETÓBRÁS, 2003).	54
Figura 3.12: Relação entre posição da resultante e tensões de compressão na base da barragem (USACE, 1995).	56
Figura 3.13: Deslizamento na estrutura (MARQUES & CARVALHO, 2013).	57
Figura 3.14: Deslizamento no contato estrutura-fundação (MARQUES & CARVALHO, 2013).	57
Figura 3.15: Deslizamento na fundação (MARQUES & CARVALHO, 2013).	58
Figura 4.1: Comparação entre duas distribuições do F.S distintas (MAIA, 2003).	61
Figura 4.2: Combinações das variáveis aleatórias (MAIA, 2003).	64

Figura 4.3: Metodologia Esquemática para Aplicação do MET (modificado de Rocscience, 2013).....	65
Figura 5.1: Barragem Pedra do Cavalo	67
Figura 5.2:Seção da Barragem (CBDB, 2000).....	68
Figura 5.3: Seção da barragem modela no GeoStudio.	71
Figura 5.4:Poropressões no interior da barragem, em kPa.	72
Figura 5.5:Superfície de Ruptura.....	73
Figura 5.6: Poropressões do cenário 2.....	78
Figura 5.7: Superfície de ruptura do cenário 2.	78
Figura A.1: Barragens com Categoria de Risco (CRI) Alto (*), em 30 de setembro de 2015 (ANA, 2016).....	87
Figura A.2 : Exemplo ilustrativo de aplicação de uma árvore de eventos (CNPGB, 2005). ...	90
Figura A.3: Exemplo ilustrativo de aplicação de uma árvore de falhas (CNPGB, 2005).	91
Figura A.4: Representação esquemática do método Nó Borboleta (CNPGB, 2005).....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros para cálculo da VERA.	25
Tabela 4.2: Matriz de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado	34
Tabela 4.3: Volumes a serem obedecidos para cada classe.....	34
Tabela 3.1: Fatores de segurança para diferentes estágios de carregamento.....	48
Tabela 3.2: Critério de estabilidade ao tombamento (USACE, 1995).	56
Tabela 5.1: Propriedades da argila compacta (CBDB, 2000).....	69
Tabela 5.2: Valor calculado do CR e suas componentes.....	70
Tabela 5.3: Valores de permeabilidade adotados.	71
Tabela 5.4: Parametros adotados na análise de estabilidade de talude.....	73
Tabela 5.5: Coeficientes de variação adotados, (Baecher e Christian,2010).	74
Tabela 5.6: Média e desvio Padrão dos parâmetros.	74
Tabela 5.7: Derivadas do Fator de Segurança em relação aos parâmetros.....	75
Tabela 5.8: Contribuição dos parâmetros no cálculo do desvio padrão.	76
Tabela 5.9: Parâmetros acrescidos/decrescidos do seu desvio padrão.	76
Tabela 5.10: Fatores de Segurança das combinações.....	76
Tabela 5.11: Derivadas parciais do FS, cenário 2.	79
Tabela 5.12: Contribuição dos parâmetros no cenário 2.	79
Tabela 5.13: FS das combinações do cenário 2.....	79
Tabela A.1: Barragens cadastradas por uso principal nas Unidades da Federação (UF) MODIFICADO (ANA, 2016).	86
Tabela A.2: Exemplo ilustrativo da aplicação do método HAZOP (CNPGB, 2005).	88
Tabela A.3: Exemplo ilustrativo da aplicação do método FMEA (CNPGB, 2005).....	89
Tabela A.4: Símbolos lógicos utilizados na construção de árvores de falhas (CNPGB, 2005).	92
Tabela A.5: Quadro de classificação quanto à categoria de risco-CT ADAPTADO (CNRH, 2012).....	94
Tabela A.6: Quadro de classificação quanto à categoria de risco-EC ADAPTADO (CNRH, 2012).....	95
Tabela A.7: Quadro de classificação quanto à categoria de risco - PS	96
Tabela A.8: Quadro de classificação quanto ao potencial de dano – DPA ADAPTADO (CNRH, 2012).....	97
Tabela A.9 Quadro para classificação das barragens de acumulação de água (CNRH, 2012).	98

Tabela A.10: Estrutura e Conteúdo Mínimo do Plano de Segurança da Barragem99

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

A.C	Antes de Cristo.
A_i	Área efetiva comprimida da estrutura no plano em análise.
ALARP	<i>As low as Reasonably Practicable.</i>
C	Consequência.
CCC	Caso de Carregamento de Construção.
CCE	Caso de Carregamento Excepcional.
CCN	Caso de Carregamento Normal.
CRI	Critério de Risco.
CT	Características Técnicas.
c_i	Coesão característica ao longo da superfície de deslizamento.
DPA	Dano Potencial Associado.
D_{15}	Diâmetro do filtro em que 15 % em peso tem diâmetro menor.
D_{50}	Diâmetro do filtro em que 50 % em peso tem diâmetro menor.
d_{15}	Diâmetro do material a ser protegido em que 15 % em peso tem diâmetro menor.
d_{50}	Diâmetro do material a ser protegido em que 50 % em peso tem diâmetro menor.
d_{85}	Diâmetro do material a ser protegido em que 85 % em peso tem diâmetro menor.
EC	Estado de Conservação.
ETA	Análise por Árvore de Eventos.
eb	Distância da força resultante na base até o ponto de tombamento T.
FSD	Fator de Segurança ao Deslizamento.
FSD \emptyset	Fator de Segurança da Resistência ao atrito.
FSDc	Fator de Segurança da Resistência da coesão.
FSF	Fator de Segurança a Flutuação.
FST	Fator de Segurança ao Tombamento.
FMEA	Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos.
FTA	Análise Árvore por Falhas
G-E	Gestão de Risco-Emergência.
HCV	Maior valor assumido pela variável (Highest Conceived Value).
k_w	Permeabilidade do solo.
LCI	Diagrama de Localização, Causa e Indicadores de Falhas.
LCV	Menor valor assumido pela variável (Lowest Conceived Value).

M-V	Monitoramento-Vigilância.
P	Probabilidade.
PAE	Plano de Ação de Emergência.
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens.
PS	Plano de Segurança da Barragem.
Rn	Resto, que pode ou não ser zero.
RSB	Relatório de Segurança de Barragens.
T-O	Técnico-Operacional.
v	Velocidade da água.
σ	Desvio Padrão da Média.
$\rho_{x_i x_j}$	Coefficiente de correlação entre os parâmetros x_i e x_j .
$\partial h_w / \partial y$	Gradiente Hidráulico.
$\partial \theta / \partial t$	Varição da umidade em relação ao tempo.
ΣU	Somatório das forças de subpressão.
ΣV	Somatório das forças gravitacionais.
ΣMe	Somatório dos momentos estabilizantes atuantes sobre a estrutura, consideradas como tal, o peso próprio da estrutura, as cargas permanentes mínimas e o peso próprio dos equipamentos permanentes, se instalados.
ΣMt	Somatório dos momentos de tombamento, devido a atuação de cargas desestabilizantes, tais como, pressão hidrostática, subpressão, empuxos de terra, etc. Deverão ser desprezados os efeitos estabilizantes de coesão e de atrito despertados nas superfícies em contato com a fundação.
ΣN_i	Somatório das forças normais à superfície de deslizamento.
ϕ_i	Angulo de atrito característico da superfície de deslizamento.
ΣT_i	Somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.
$f^n(\bar{x})$	n-ésima derivada avaliado para $x = \bar{x}$.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história da humanidade, as barragens têm desempenhado um importante papel na infraestrutura ajudando na fixação e desenvolvimento das populações. As barragens têm uma grande capacidade de combater as variações sazonais dos níveis d'água permitindo um desenvolvimento socioeconômico e potencializando o desenvolvimento de áreas carentes.

Embora as barragens tragam bastante benefícios para a sociedade, seus impactos sobre as áreas vizinhas incluem diversos fatores, principalmente no aspecto relacionado à segurança. Os graves impactos econômicos, sociais e ambientais provenientes das rupturas das barragens têm criado uma forte demanda da sociedade para minimizar o risco dessas obras.

Em 20 de setembro de 2010 foi implantado o Relatório de Segurança de Barragens com o intuito de apresentar à sociedade um panorama da evolução da segurança das barragens brasileiras e medir a implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

O Relatório de Segurança de Barragens de 2015 registrou um total de 17.259 barragens em todo o território nacional, sendo que a sua grande maioria é de uso múltiplo da água (15.671). A Tabela A.1, encontrada no anexo, apresenta a distribuição das barragens pelos estados brasileiros.

Das 17.259 barragens cadastradas, 2.368 foram classificadas por Categoria de Risco (CRI) e 2.224 classificadas quanto ao Dano Potencial Associado (DPA), o que representa apenas uma pequena parte das barragens brasileiras. Com relação a classificação por Categoria de Risco, temos um total de 735 barragens classificadas como risco alto (o que corresponde a 31% do total dessa categoria de risco). A situação fica ainda pior quando analisamos as barragens classificadas por Dano Potencial Associado, onde 1.017 barragens tiveram um DPA alto (o que corresponde a 46% do total dessa classificação). Há ainda a interseção desses dois grupos, onde temos ao todo 263 barragens classificadas como risco alto e com DPA alto (ANA, 2016).

Em novembro de 2015, houve o rompimento da barragem de Fundão, o qual ocasionou a morte de 19 pessoas e um grande impacto ambiental em toda a bacia do Rio Doce. Após esse acidente houve uma maior mobilização das entidades fiscalizadoras, dos empreendedores e dos órgãos de controle em relação à temática segurança de barragens. Essa tragédia revelou o

descaso dado para a gestão de risco e despertou o interesse dos parlamentares na promoção e aperfeiçoamento da Lei nº 12.334/2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens.

1.1 OBJETIVOS

Define-se como objetivo geral avaliar os princípios e as diretrizes da gestão de riscos propostas pela NBR ISO 31000:2009; analisar a metodologia de análise de risco proposta pela Política Nacional de Segurança de Barragens, segundo a Resolução-ANA nº 91, 02 de abril de 2012; e aprofundar as técnicas de cálculo da susceptibilidade da barragem para os principais cenários que podem levá-la à ruptura.

Os objetivos específicos incluem:

- ✓ Avaliar as metodologias de análise de risco e tentar entender onde cada uma delas melhor se encaixa quando se está analisando o risco de uma barragem.
- ✓ Abordar alguns dos princípios adotados para se quantificar as consequências.
- ✓ Realizar uma breve revisão bibliográfica sobre os tipos de barragens e seus modos de ruptura.
- ✓ Executar o cálculo da probabilidade de ruptura de uma barragem conhecida utilizando métodos probabilísticos com a finalidade de se calcular a susceptibilidade a instabilidade de talude da barragem em estudo.

1.2 ESCOPO DO PROJETO

Este projeto está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo trata da introdução do trabalho, apresenta o tema e os objetivos a serem cumpridos ao longo do projeto.

O segundo capítulo trata o assunto de gestão de risco, introduzindo o conceito de risco e abordando as várias etapas da gestão de risco. Esse capítulo também versa sobre a Lei nº 12.334/2010, a qual propõe uma metodologia de análise de risco a ser implementada em todo o território nacional, e sobre a Resolução-ANA nº 91/2012, que complementa o citado diploma legal, criando um modelo simples de gestão de risco.

Inicia-se o terceiro capítulo falando das funções e utilizações que uma barragem pode ter e de suas classificações para, logo em seguida, adentrar no estudo de ruptura. Para as barragens de solo são mencionados os três tipos de ruptura mais comuns (galgamento, piping e instabilidade de talude) e para as barragens de concreto é abordado as rupturas por flutuação, tombamento e deslizamento. Esse capítulo também trata da análise de fluxo em regime permanente.

No quarto capítulo são descritas as três metodologias mais conhecidas de análise probabilística de estabilidade de talude, incluindo as principais simplificações e limitações para cada uma dessas metodologias.

O quinto capítulo apresenta o estudo de caso deste trabalho – desenvolvimento da análise de risco adotando os critérios estabelecidos pela Lei 12.334/2010 e do cálculo da susceptibilidade da barragem para os cenários do reservatório com o nível d’água no máximo maximorum e com o nível d’água na cota normal.

No último capítulo (sexto), são expostas as conclusões advindas dos resultados obtidos no capítulo anterior e são feitas sugestões para futuros trabalhos relacionados ao mesmo tema dessa monografia.

2 AVALIAÇÃO DE RISCO

O conceito Sistema Integrado de Segurança adotado para o controle de segurança de barragem é composto por três pilares: O Técnico-Operacional (T-O), o de Monitoramento-Vigilância (M-V) e o de Gestão de Risco-Emergência (G-E). Cada pilar tem um importante papel na segurança da obra, sendo que, um completa o outro (ALMEIDA, 2001).



Figura 2.1: Sistema integrado de segurança (PERINI, 2009)

Os dois primeiros componentes do Sistema Integrado de Segurança fazem parte das medidas tradicionais do sistema de segurança, sendo o Técnico-Operacional responsável pelo controle da segurança estrutural, hidráulica e operacional, e o Monitoramento-Vigilância pelo monitoramento, inspeção, detecção e análise da obra. Deve-se incluir o desenvolvimento de novas técnicas de previsão especiais com o objetivo de antecipar a detecção de crises e falhas, aumentando assim o tempo total de alerta, de aviso e de evacuação (ALMEIDA, 2001).

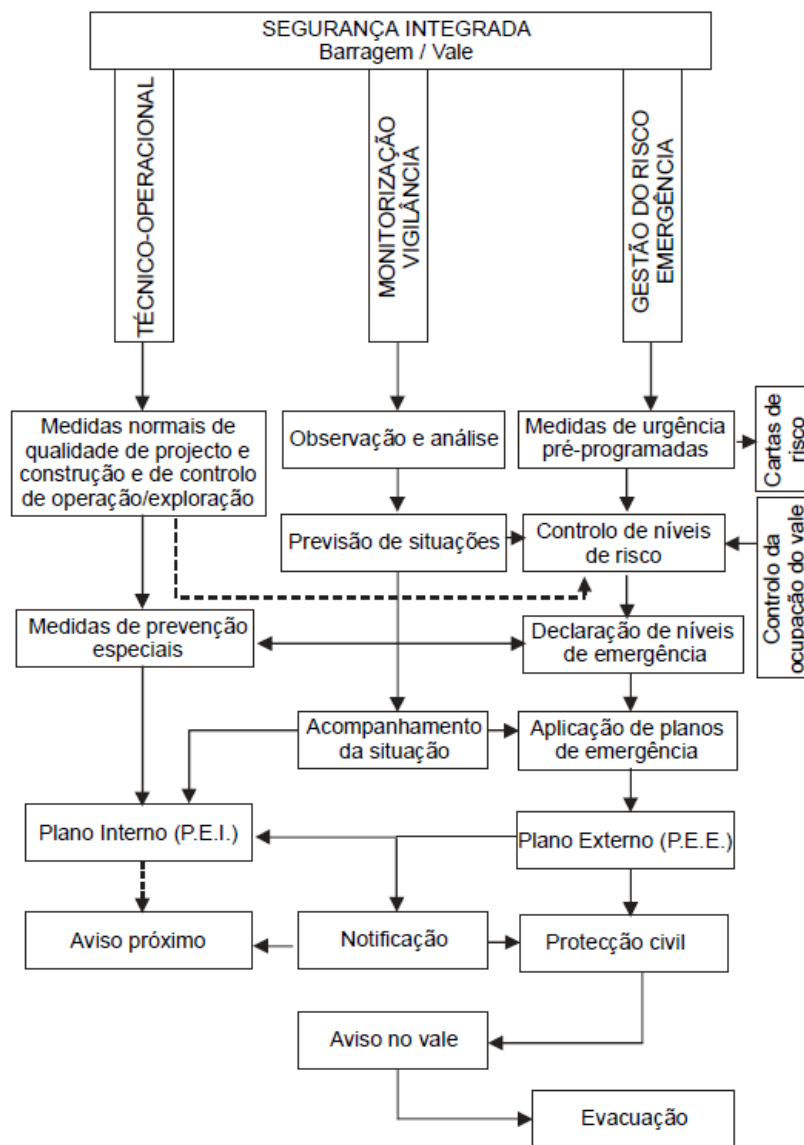


Figura 2.2: Esquema geral do sistema de segurança integrada aplicado a barragem (ALMEIDA, 2001)

Para ampliar os sistemas de segurança tradicionais foi implementado, a partir da década de oitenta, o terceiro pilar do tripé do Sistema Integrado de Segurança. Esse pilar, Gestão de Risco-Emergência, trata tanto da identificação, análise e manutenção dos riscos em níveis aceitáveis durante as fases de projeto, construção e operação, quanto dos planos de ação na ocorrência de qualquer situação crítica ou acidente imprevisto que coloque em perigo a barragem ou o vale (Almeida, 2001).

Durante a fase de projeto é ideal que o projetista identifique os riscos trazidos pela sua obra e sempre que possível trate de elimina-los ou reduzi-los. É uma boa prática que o projeto apresente uma flexibilidade para a ação de medidas emergências, as quais, muitas vezes, não estavam previstas no projeto.

Na fase de construção, importante estar atento aos riscos criados devido a escolha do método construtivo, que só existiram durante a construção. Mesmo que o tempo de exposição a esses riscos seja curto, uma gestão de risco deve apurá-los.

A fase de operação é a mais longa das três. Tendo em vista o grande período de duração dessa fase, que varia de acordo com a vida útil da obra, é nela onde se encontra a maior probabilidade de ocorrência de algum acidente. Nessa fase, é muito importante que o monitoramento e a gestão de risco caminhem juntas com o intuito de garantirem que o desempenho da obra não decaia.

2.1 CONCEITO DE RISCO

O conceito de risco já era explorado muito antes de ser aplicada no conceito de gestão de riscos. Por isso, é natural que se encontrem várias definições distintas para esse termo em diferentes fontes bibliográficas. Tais definições foram evoluindo até se chegar a um consenso quase generalizado (Pimenta, 2009).

O risco que inicialmente era considerado, por alguns autores, como sendo a probabilidade de ruptura e, por outros, como a consequência dessa ruptura, atualmente é visto como o produto da probabilidade de ruptura pela sua respectiva consequência (Pimenta, 2009).

A vantagem de se trabalhar com essa definição de risco é que ela se torna quantificável. Na formulação matemática apresentada por Harrford e Baecher (2004, citado por Melo, 2014) a primeira parcela da equação representa a probabilidade de ocorrência dos eventos iniciadores, enquanto que a segunda traduz a probabilidade condicional de que tais eventos conduzam à falha do sistema (resposta da barragem). O risco pode ser calculado pela equação a seguir:

$$Risco = \sum \{P(evento) \times P(Falhas | Eventos) \times P(consequencia)\} \quad (2.1)$$

Em que:

P=probabilidade

Os dois primeiros fatores da equação (2.1) juntos representam a susceptibilidade do sistema, enquanto o último fator se refere a quantificação das consequências. Em uma versão mais simplificada, o risco pode ser expresso simplesmente por:

$$Risco = S \times C \quad (2.2)$$

Em que:

S = susceptibilidade;

C = consequência.

2.2 GESTÃO DE RISCO

Segundo Melo (2014), os conceitos atuais de gestão de risco têm origem nas fortes demandas da sociedade por responsabilidade e transparência na tomada de decisão. No campo da engenharia de barragens, essa preocupação tem se tornado de interesse vital para a comunidade, tendo em vista as consequências de uma ruptura de barragem sobre os interesses da população em geral”.

A gestão de risco consiste no desenvolvimento integrado das atividades de análise de risco, apreciação de riscos e de controle de risco. No controle de risco as medidas cabíveis

podem ser listadas como: mitigação, prevenção, detecção, planejamento de emergência, revisão e comunicação do risco (Pimenta, 2009).

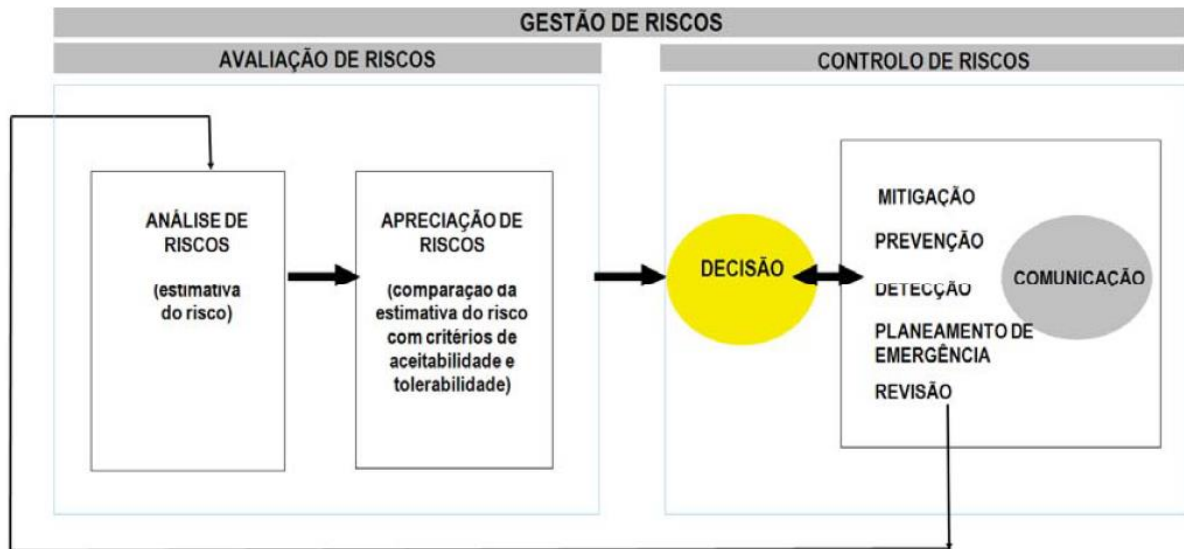


Figura 2.3: Principais atividades da gestão de risco (Pimenta, 2009).

Em uma linha de pensamento muito similar ao de Pimenta, Almeida (2001) trabalha com a gestão de risco como sendo um conceito operacional de avaliação e mitigação dos riscos de uma forma consistente, controlável e lógica. Na visão de Almeida a gestão de risco envolve metodologias e procedimentos específicos aplicados basicamente a quatro tipo de ações:

- Identificação e caracterização dos eventos perigosos (naturais ou não) e determinação da respectiva probabilidade de ocorrência.
- Análises de risco, admitindo a ocorrência de eventos, o desenvolvimento de cenários de ruptura e a avaliação das respectivas probabilidades, bem como a avaliação das respectivas consequências, por forma a ser possível quantificar o risco da barragem e compará-lo com níveis de referência ou de aceitação social.
- Redução dos riscos, estudando e implementando medidas de proteção estruturais ou não estruturais que permitam reduzir a probabilidade de ruptura e/ou a gravidade dos efeitos a jusante.
- Resposta a crises, preparando as medidas a implementar no caso de ocorrer uma situação de emergência ou de crise, incluindo a assistência durante e após uma catástrofe.

Em 2009 foi criada a NBR ISO 31000:2009 no intuito de fornecer os princípios e as diretrizes genéricas para a gestão de risco. Nela a gestão de risco é dividida e interpretada conforme mostra a Figura 2.4.

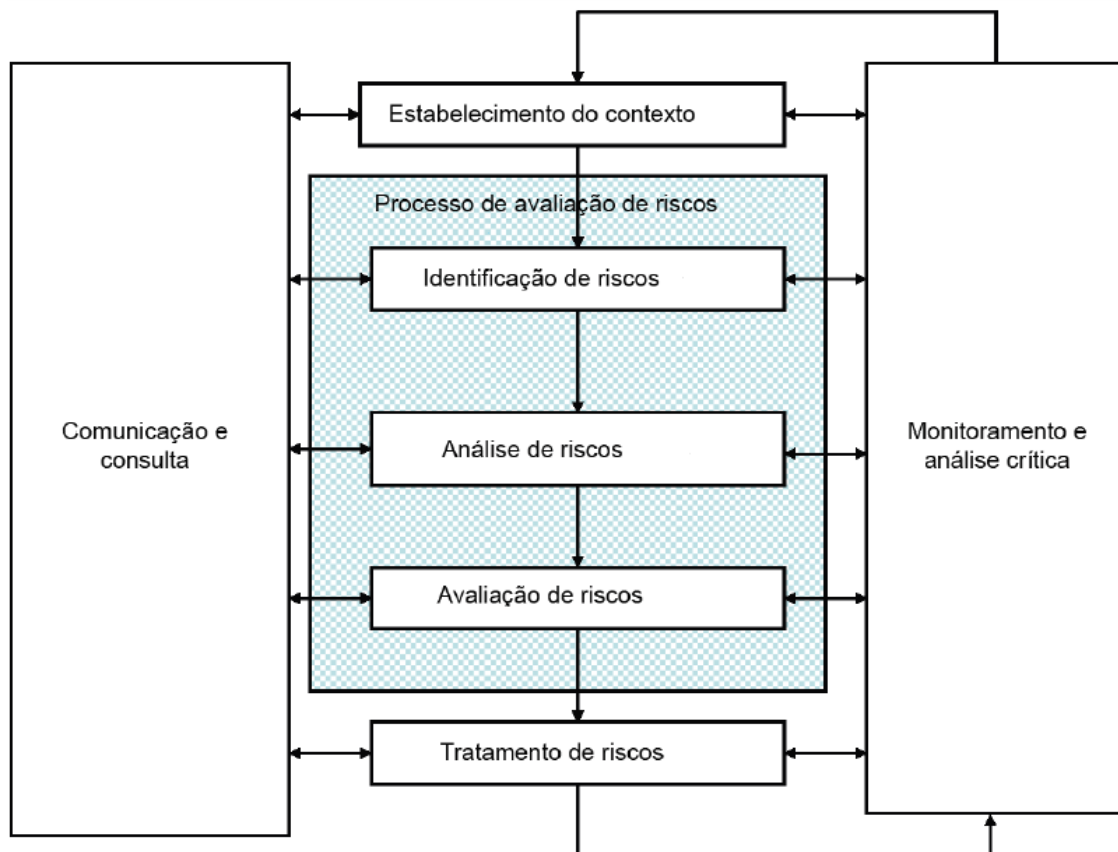


Figura 2.4: Processo de Gestão de Risco (ABNT, 2009).

2.2.1 ESTABELECIMENTO DO CONTEXTO

É no estabelecimento do contexto que se definem as metas, as responsabilidades, os critérios e os contextos tanto internos quanto externos no qual a obra está envolvida.

Segundo a NBR ISO 31000:2009 o contexto externo é o ambiente externo no qual a organização busca atingir seus objetivos. O contexto externo pode incluir, mas não está limitado a:

- Ambientes cultural, social, político, legal, regulatório, financeiro, tecnológico, econômico, natural e competitivo, quer seja internacional, nacional, regional ou local;
- Fatores-chave e tendências que tenham impacto sobre os objetivos da organização;
- Relações com as partes interessadas externas e suas percepções e valores.

Já o contexto interno é o ambiente no qual a organização busca atingir seus objetivos. Convém que o processo de gestão de riscos esteja alinhado com a cultura, processos, estrutura e estratégia da organização. O contexto interno é algo dentro da organização que pode influenciar a maneira pela qual uma organização gerenciará os riscos (ABNT, 2009).

2.2.1.1 CRITÉRIOS DE TOLERÂNCIA E ACEITABILIDADE

Os limites de aceitabilidade e tolerância representam limites superiores máximos para o risco. Um risco que esteja acima do limite de tolerância é considerado inaceitável, independentemente do nível de benefícios que essa atividade gerará ela não poderá ser implantada enquanto seus riscos estiverem acima do limite de tolerância. Riscos que se encontram entre ambos os limites estão na zona do tolerável. A sociedade está preparada para tolerar riscos dessa magnitude desde que eles de uma certa maneira tragam benefícios em troca. Por fim, os riscos abaixo do limite de aceitabilidade se encontram na região do amplamente aceitável. O incremento de risco gerado por empreendimentos abaixo do limite de aceitabilidade se encontram na ordem de grandeza dos incrementos de risco gerados por atividades cotidianas, de tal forma, que para a sociedade esses riscos são considerados insignificantes e adequadamente controlados (Melo, 2014).

Ao estabelecer os critérios de tolerância é necessário conhecer o risco individual e o risco societal gerados pelo empreendimento. O risco individual equivale ao incremento de risco gerado pela existência desse novo empreendimento. No caso de barragens, esse incremento é o aumento do risco de vida, com o qual o indivíduo viverá por ele ser diretamente afetado pelas consequências que uma eventual ruptura da barragem poderá causar (ICOLD, 2005).

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

respectivos benefícios. Um exemplo disso é a construção de uma hidrelétrica cuja construção trará um risco as populações localizadas a jusante, mas a geração de energia poderá beneficiar toda a sociedade, considerando a disponibilidade de energia por meio de um sistema interligado. O equilíbrio entre custos e benefícios está sujeito à discussão pública (ICOLD, 2005).

O risco societal pode ser expresso por meio da curva F-N, onde a ordenada representa o valor de F (probabilidade anual de um acidente com um número de fatalidades igual ou superior a N) e na abcissa o valor de N (número de fatalidades). A Figura 2.5 é um exemplo de uma curva F-N. É necessário observar que nessa representação, só são consideradas as consequências associadas a perda de vida humana, omitindo-se outros impactos tais como os ambientais e econômicos (alguns autores acabam adotando o critério de fatalidade equivalente para contabilizar de forma indireta os feridos). O gráfico de F-N pode ser adotado para a realização de análises de risco quantitativas (Melo, 2014).

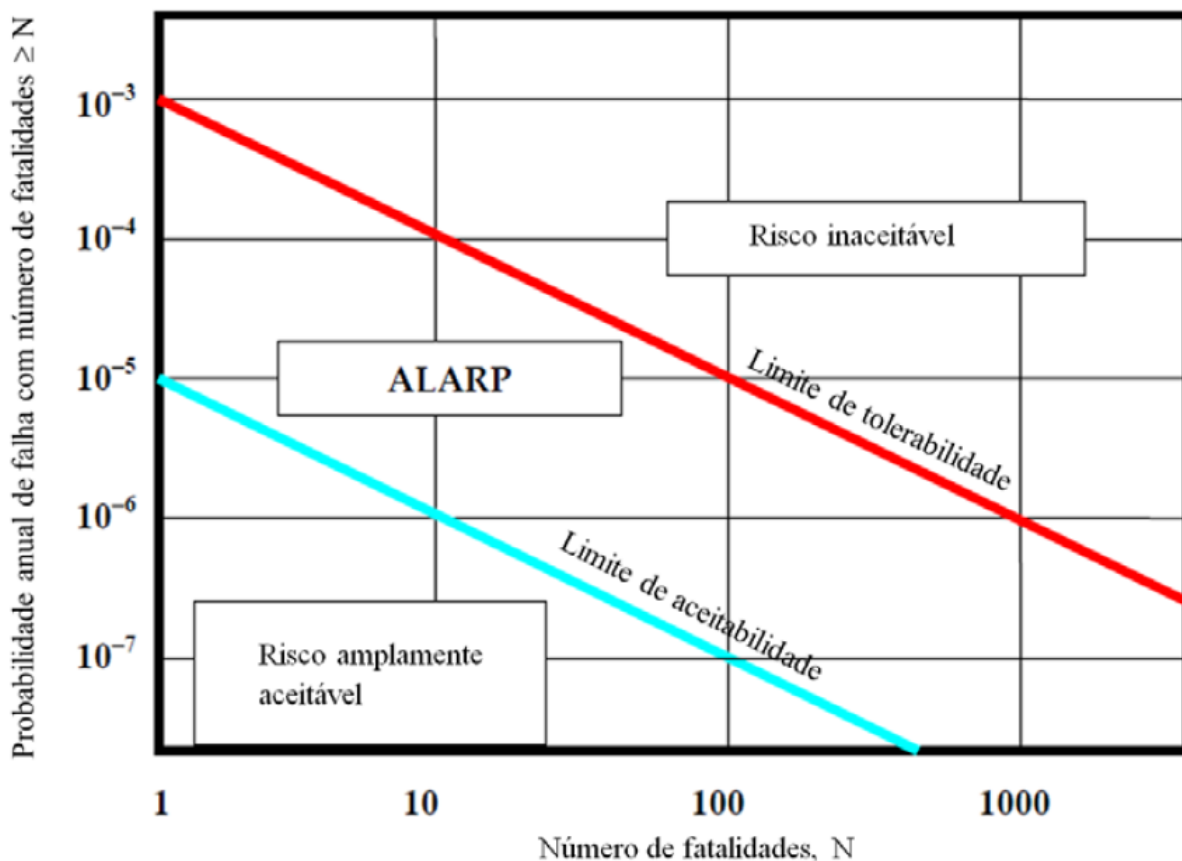


Figura 2.5: Curva F-N para riscos (Melo, 2014)

Analisando a curva F-N é possível notar três zonas distintas. A zona de risco amplamente aceitável que se encontra abaixo do limite de aceitabilidade, a zona de riscos

inaceitáveis cuja posição está acima do limite de tolerância e a zona intermediária que na Figura 2.5 foi chamada de ALARP. Riscos encontrados na zona intermediária são considerados toleráveis desde que as atividades geradoras do risco tragam algum tipo de benefício. Segundo o princípio ALARP (*As low as Reasonably Practicable*), riscos encontrados nessa zona devem ser mantidos o mais baixo possível em níveis praticáveis.

Segundo Pimenta (2009) a grande maioria dos critérios de tolerabilidade do risco utiliza, como ponto âncora, o valor 10^{-4} ou 10^{-6} para 10 fatalidades, sendo o limite de aceitabilidade estabelecido como sendo 100 a 1000 vezes menor que o limite de tolerabilidade.

Apesar de ainda não ser uma prática consolidada alguns órgãos ambientais brasileiros como o CETESB em São Paulo, o FEEMA no Rio de Janeiro e o FEMA Rio Grande do Sul já trabalham com suas próprias curvas F-N para fazer o controle do licenciamento de instalações com produtos perigosos. Na Figura 2.6, temos a curva F-N adotada pela CETESB.



Figura 2.6: Curva F-N proposta pelo CETESB.

Além das representações quantitativas, como é o caso da curva F-N, existem ainda modelos quantitativos ou até mesmos semi-quantitativos. Essas matrizes de risco tratam de classificar a probabilidade de ocorrência de ruptura e as suas respectivas consequências através de escalas numéricas ou descritivas. Um bom exemplo a é Figura 2.7.

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	MUITO ELEVADA	3	4	4	5	5
	ELEVADA	2	3	4	4	5
	MODERADA	2	2	3	4	4
	BAIXA	1	2	2	3	4
	POUCO PROVÁVEL	1	1	2	2	3
		MUITO BAIXAS	BAIXAS	MODERADAS	ELEVADAS	MUITO ELEVADAS
CONSEQUÊNCIAS						

Classes de risco

Figura 2.7: Exemplo de uma matriz de risco semi-quantitativa (Pimenta, 2009).

A Figura 2.7 é uma matriz de risco dividida em cinco classes de probabilidade (pouco provável, baixa, moderada, elevada e muito elevada) e cinco classes de consequências (muito baixas, baixas, moderadas, elevadas e muito elevadas). Adotando eles como parâmetros de entrada, é possível chegar a um quadrante que lhe dará a sua classe de risco cuja variação vai de um a cinco.

Um problema de se trabalhar apenas com a curva F-N é o fato dela não contabilizar as consequências ambientais e econômicas. Uma vez que a única entrada de dado seja o número de fatalidades esse método não quantifica o prejuízo ambiental, o qual pode atingir valores enormes como vem nos mostrando o caso do rompimento da barragem de fundão, ou até mesmo a pura destruição de bens materiais como casas e objetos.

Uma maneira de se resolver esse problema é substituir o número de fatalidades pelo custo monetário gerado pelo acontecimento. Dessa forma é somado o custo de tudo o que foi atingido pelo acontecimento junto com o custo de todas as atividades que estão sendo impedidas

de serem realizadas e ainda é feito a valoração de todo o dano ambiental e social que foi ocasionado pelo evento.

A valoração ambiental envolve conceitos que visam resguardar o equilíbrio ecológico e os recursos ambientais em consonância com o desenvolvimento social e econômico. O valor econômico é calculado medindo todos os atributos, estando ou não correlacionados com o uso do recurso. Já existem várias escolas econômicas que desenvolveram conceitos e metodologias para o cálculo do valor econômico do recurso ambiental (VERA), mas de forma simplificada todas essas linhas de pensamento levam em conta quatro pontos: o valor de uso direto (VUD), o valor de uso indireto (VUI) valor de opção (VO) e o valor de existência (VE).

$$(VERA) = (VUD + VUI + VO) + Ve \quad (2.3)$$

Tabela 2.1: Parâmetros para cálculo da VERA.

Valor Econômico de Recurso Ambiental			
Valor de Uso			Valor de Não-Uso
Valor de Uso Direto	Valor de Uso Indireto	Valor de Opção	Valor de Existência
Bens e serviços ambientais apropriados diretamente da exploração do recurso e consumidos hoje.	Bens e serviços ambientais que são gerados de funções ecossistêmicas e apropriados e consumidos indiretamente hoje.	Bens e serviços ambientais de usos diretos e indiretos a serem apropriados e consumidos no futuro.	Valor não associado ao uso atual ou futuro e que reflete questões morais, culturais, éticas ou altruísticas.

2.2.2 IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS

Com relação a identificação de riscos a NBR ISO 31000:2009, no item 5.4.2, diz que é responsabilidade do responsável pela obra identificar e listar todas as fontes de riscos com suas respectivas áreas de impacto, eventos, causas e consequências potenciais. Nessa listagem terão de estar incluídos até mesmo os riscos cujas fontes não estão sob o controle da organização. Ela ainda alerta sobre a necessidade de se identificar todos os riscos, pois um risco que não é identificado nesta fase não será incluído em análises posteriores.

2.2.3 ANÁLISE DE RISCO

A análise de risco é, na sua essência, o processo de estimativa do risco. Ela tenta tratar de forma explícita as incertezas, clarificando o que se sabe e o que não se sabe. Através do tratamento de forma sequencial, dedutivo ou indutivo dos modos de ruptura, é promovido um conhecimento detalhado do sistema. A análise de risco está associada a uma escala de tempo, que determina a necessidade de acompanhamento da evolução do risco durante a vida útil da obra (Pimenta, 2009).

A análise de probabilidade de falha da barragem envolve o estudo da resposta da barragem devido aos eventos que iniciam o processo de falha. A resposta da barragem deve ser modelada de acordo com o método de análise escolhido na contextualização. No modelo, a decomposição do sistema e seus mecanismos de falha devem ser avaliados de acordo com o nível de complexidade desejado (Melo, 2014).

O objetivo final da realização de uma análise de riscos é o cálculo de uma grandeza matemática que refletirá o estado da barragem, a expectativa do seu desempenho futuro e as consequências da sua eventual ruptura no período de tempo no qual foi realizado a análise (Pimenta, 2009).

Tendo em vista a necessidade de classificar e quantificar os riscos a CNRH N° 143/2012 apresenta critérios qualitativos para a classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório. Nessa resolução o CNRH apresenta tanto uma classificação por categoria de risco (sendo que a CNRH está considerando risco como sendo a possibilidade de ocorrência de acidente) quanto pela categoria de dano potencial associado. O critério de risco (CRI) seria calculado pelo somatório das Características Técnicas (CT), Estado de Conservação (EC) e o Plano de Segurança da Barragem (PS) enquanto o Dano Potencial Associado (DPA) apresenta é independente de demais fatores. Os cálculos das componentes do CRI e do próprio DPA são feitos utilizando as tabelas apresentadas na própria resolução CNRH N° 143/2012 que estão expostas no apêndice.

2.2.3.1 MÉTODOS DE ANÁLISE DE RISCO

A análise de risco pode ser qualitativa ou quantitativa. As análises qualitativas se utilizam de uma forma descritiva ou escalas de ordenação numérica para apresentar a magnitude de consequências potenciais e sua probabilidade de ocorrência. Já as análises quantitativas são baseadas em valores numéricos das consequências potenciais e suas probabilidades, assumindo que tais valores sejam uma representação válida da magnitude real das consequências e da probabilidade dos vários cenários estudados (Melo, 2014).

As duas formas de análise apresentam suas limitações importantes. As análises qualitativas tendem a ser subjetivas, por sua vez, as análises quantitativas ainda apresentam dificuldade na caracterização analítica das incertezas envolvidas nos problemas geotécnicos. Sendo assim, nenhuma das duas abordagens pode ser considerada totalmente adequada.

Existe ainda as análises semi-quantitativas as quais utilizam as mesmas ferramentas de análise das qualitativas, porém adotam escalas de probabilidades para obterem como resultado parâmetros numéricos.

Já existem vários métodos de análise com ampla experiência de utilização em outras áreas técnico-científicas e um vasto conjunto de referências bibliográficas que podem ser trazidos para a análise de risco nas obras de engenharia de barragem. Entre esses métodos o Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens de Portugal (CNPGB, 2005).cita, como sendo os métodos mais adequados para aplicação em barragens, os métodos.

a) Análise dos Perigos e da Operacionalidade (HAZOP):

Desenvolvido pela indústria química nos anos 70 apresenta como foco a análise sistemática dos desvios de grandezas com repercussão no comportamento do sistema, suas causas e consequências.

Este método pode, com algumas adaptações, ter uma aplicação privilegiada na engenharia de barragens na fase de construção, no âmbito das atividades de fiscalização, e na fase de exploração, no âmbito da análise do comportamento das obras a partir dos dados de observação.

O método HAZOP centra-se na resposta dos vários sub-sistemas e tem como principais vantagens o seu carácter sistemático e uma aplicação relativamente expedita. Como principal desvantagem, é de realçar o fato de não analisar explicitamente os modos de falha que podem determinar os desvios. Acresce, no caso específico das barragens, a dificuldade em classificar

os desvios possíveis com palavras-chave genéricas, aplicáveis às diferentes grandezas que podem caracterizar o comportamento dos vários sub-sistemas.

b) Análise dos Modos de Falha e de seus Efeitos (FMEA):

O método foi utilizado pela primeira vez nos anos 40 pela indústria de armamentos dos EUA e ganhou fama depois de ter sido utilizado pela NASA para analisar possíveis falhas nos equipamentos a serem utilizados no programa espacial Apollo.

Trata-se de um método particularmente adaptado ao estudo das falhas e respectivas consequências, passível de ser aplicado a materiais, a equipamentos ou a sistemas mais complexos. Na Engenharia de Barragens pode ter uma aplicação transversal a todas as fases – concepção e projeto, construção, primeiro enchimento e exploração – e aos diferentes sub-sistemas em que uma barragem se pode subdividir.

O FMEA é um método indutivo que permite avaliar, a partir de um determinado modo de falha, as respectivas causas e sequência de efeitos (locais, em outros sub-sistemas e terminais), assim como os meios de detecção e prevenção dos modos de falha (colapso ou perda de funcionalidade) e de mitigação dos seus efeitos.

O FMEA é um método de análise de riscos qualitativo, que pode ser adaptado para a realização de análises semi-quantitativas – designando-se então por FMECA (análise dos modos de falha, dos seus efeitos e severidade) – através da aplicação de escalas de probabilidade de ocorrência das falhas e de gravidade dos seus efeitos. Permite assim caracterizar a importância no funcionamento do sistema de cada um dos modos de falha, o impacto que estes têm sobre a sua fiabilidade e a dimensão das respectivas consequências.

As principais vantagens desses métodos são a sistematização e o carácter metódico de análise dos vários sub-sistemas, respectivos estados de funcionamento, modos de falha e sequência de efeitos, o que permitem ainda uma reflexão fundamentada sobre os meios de detecção e prevenção e de mitigação dos respectivos efeitos. O seu carácter exaustivo constitui, contudo, a sua principal limitação, pela morosidade e consequentes custos de aplicação.

c) Análise por Árvore de Eventos (ETA):

Desenvolvida para dar apoio a análise de risco em centrais nucleares no início dos anos 70, atualmente é utilizada em diversos campos técnico-científicos.

Devido ao fato de ser um método indutivo de análise dos possíveis resultados a partir de um determinado acontecimento iniciador, a árvore de eventos é particularmente adequada para a análise de sistemas que integrem diversas componentes/dispositivos de segurança. A árvore de eventos é também muitas vezes utilizada em análises de riscos após acidente. Por permitir calcular a probabilidade de ocorrência de sequências de eventos, tal método pode ser enquadrado como sendo uma análise semi-quantitativa ou quantitativa.

O método pressupõe que se consigam identificar, para cada subsistema em análise, os acontecimentos iniciadores que podem desencadear uma sequência de eventos até conduzir a uma falha relevante a qual afeta o comportamento global do sistema. No campo de engenharia de barragem o método ETA pode ser aplicado de forma semelhante ao FMEA

A principal vantagem desse método é a identificação dos acontecimentos iniciadores de maior impacto potencial no sistema permitirá reduzir significativamente o tempo e respectivos custos de aplicação deste método.

d) Análise por Árvore de Falhas (FTA):

Foi um dos primeiros métodos a serem desenvolvidos com o intuito de ser utilizado na análise de risco. Desenvolvido nos anos 60, pela companhia americana *Bell Telephone*, o método foi utilizado para estudos de avaliação de risco em lançamentos de mísseis. Atualmente é um dos métodos mais utilizado nas mais diversas áreas.

Trata-se de um método dedutivo que, a partir de uma determinada falha, procura identificar todas as sequências e combinações de eventos (até chegar aos acontecimentos iniciadores) que podem conduzir à sua ocorrência, podendo ser utilizado em análises qualitativas, semi-quantitativas ou quantitativas. Da mesma forma que o ETA esse método permite uma análise de risco após o acidente. A análise por árvore de falhas é um método gráfico que recorre a um conjunto de símbolos lógicos normalizados que caracterizam a relação entre os vários eventos.

Uma das principais vantagens deste método é a possibilidade de analisar todas as combinações de eventos que conduzem à falha do sistema em análise, o que o torna particularmente adequado ao tratamento de acidentes de grande escala, designadamente na Engenharia de Barragens, que resultam frequentemente de um conjunto de eventos que individualmente não teriam capacidade para originar o acidente.

e) Nó Borboleta:

O método do Nó Borboleta é uma conjugação dos métodos de árvore de falhas e de árvore de eventos.

O evento central constitui uma possível falha do sistema, traduzindo uma não verificação dos estados limites últimos ou dos estados limites de utilização. A parte à esquerda do evento central é uma árvore de falhas, que analisa as sequências e combinações de eventos que ligam os possíveis acontecimentos iniciadores à falha do sistema, e a parte à direita é uma árvore de eventos, que analisa os resultados possíveis da falha em causa.

O método tem um domínio de aplicação comum ao dos dois métodos que o constituem - árvore de falhas e árvore de eventos – e reúne as respectivas vantagens e desvantagens. Devido ao fato de ser uma análise mais detalhada e por isso demorada é recomendado que ela seja aplicada essencialmente nas falhas particularmente críticas.

2.2.4 AVALIAÇÃO DE RISCOS

A avaliação de riscos vem para auxiliar na tomada de decisões com base nos resultados obtidos pela análise de risco. A avaliação de riscos envolve comparar o nível de risco encontrado durante o processo de análise com os critérios de risco estabelecidos quando o contexto foi considerado. Com base nesta comparação, será possível determinar quais riscos necessitam de tratamento e qual será prioridade dada para cada risco.

A NBR ISO 31000:2009 ressalta que as avaliações de riscos devem levar em conta o contexto mais amplo de risco. Deve-se levar não só a tolerância ao risco da organização que se beneficia deles, mas também a dos terceiros que estão expostos a eles. Convém que as decisões sejam tomadas de acordo com os requisitos legais, regulatórios e outros requisitos.

Na visão de Melo (2014) a avaliação de riscos, por trabalhar com a definição de critérios de aceitabilidade e tolerância dos riscos, provavelmente é o tema mais polêmico no universo da gestão de risco. A avaliação de risco ultrapassa a fronteira do mundo técnico da engenharia de barragens em direção a um enfoque mais subjetivo de julgamento de valores, abrangendo interesses políticos, sociais, econômicos e legais. No caso de barragens, tem o agravante de

envolver riscos cujas consequências podem envolver um número elevado de perdas de vidas, embora associados a probabilidades de ocorrências extremamente baixas. É perceptível na mídia como a sociedade valoriza de forma diferente os acidentes de reduzida probabilidade e elevada consequência (ex: acidentes aéreos) e aqueles de alta probabilidade e baixa consequência (acidentes de transporte terrestre), mesmo que os riscos calculados (probabilidade x consequência) sejam equivalentes.

2.2.5 TRATAMENTO DE RISCOS

A partir do momento que a avaliação de risco diz que determinado risco ultrapassa os critérios estabelecidos na contextualização é necessário realizar o tratamento do risco. O tratamento de riscos envolve a seleção de uma ou mais opções para modificar os riscos e a implementação dessas opções. Uma vez implementado, o tratamento fornece novos controles ou modifica os existentes.

Selecionar a opção mais adequada de tratamento de riscos envolve equilibrar, de um lado, os custos e os esforços de implementação e, de outro, os benefícios decorrentes, relativos a requisitos legais, regulatórios ou quaisquer outros, tais como o da responsabilidade social e o da proteção do ambiente natural. Convém que as decisões também levem em consideração os riscos que demandam um tratamento economicamente não justificável, como, por exemplo, riscos severos (com grande consequência negativa), porém raros (com probabilidade muito baixa) (ABNT, 2009).

O ICOLD (2005) cita que na perspectiva do gerenciamento as opções de controle de risco podem ser agrupadas em cinco categorias.

- Evitar (eliminar) o risco;
- Reduzir (prevenir) a probabilidade de ocorrência;
- Reduzir (mitigar) as consequências;
- Transferir o risco;
- Conservar (tolerar ou aceitar) os riscos (residuais).

As três primeiras categorias de medidas reduzem o risco real enquanto as últimas duas categorias apenas tiram parte da responsabilidade do risco das mãos do proprietário.

2.3 LEI N° 12.334, DE 2010

A lei N° 12.334, DE 2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). No seu texto original não é definido o termo risco, mas definiu-se os seguintes termos:

- Gestão de Risco: “ações de caráter normativo, bem como aplicação de medidas para prevenção, controle e mitigação de riscos”.
- Dano potencial associado à barragem: “dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem”.
- Segurança de Barragem: “condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente, sinalizando para o espectro do que constituiria o dano potencial associado, que deverá ser classificado em alto, médio ou baixo, em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem, conforme artigo específico sobre classificação das barragens”.

A lei N° 12.334 cita cinco instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens sendo que os instrumentos mais relevantes para esse projeto são: o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado, o Plano de Segurança de Barragem e o Relatório de Segurança de Barragens.

O Relatório de Segurança de Barragens (RSB) é produzido pela Agência Nacional de Águas de acordo com as especificações estabelecidas pelo PNSB. O objetivo do RSB é apresentar à sociedade um panorama da evolução da segurança das barragens brasileiras, com a implementação da PNSB, e na melhoria da gestão da segurança (ANA, 2016).

O Plano de Segurança de Barragem é um documento que os responsáveis das barragens devem enviar para os seus devidos órgãos fiscalizadores. Esse documento deverá apresentar a identificação do empreendedor, dados técnicos referentes ao empreendimento, estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais, manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções, regra operacional do dispositivo de descarga da barragem, plano de ação emergencial (PAE) caso exigido, relatórios das inspeções de segurança e revisões periódicas de segurança.

O sistema de classificação de barragens, por categoria de risco, por dano potencial associado e por volume, pode ser considerado, de certo modo, o mais importante dos sete instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). A partir dele que serão selecionadas as medidas e procedimentos de monitoramento a serem adotados, de forma a tornar mais seguras as barragens, determinando a periodicidade e o conteúdo mínimo das inspeções regulares e especiais, da revisão periódica, e a obrigatoriedade ou não da elaboração de um plano de ação de emergência (PAE) da barragem segundo regulamentos a serem publicados pelos agentes fiscalizadores da segurança de barragens. Vale observar que cada entidade fiscalizadora da segurança de barragem poderá estabelecer critérios específicos ou complementares aos critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (Anderáos, et al., 2013). As entidades, atribuições e fluxo de atividades e responsabilidades contidas na PNSB são ilustrados na Figura 2.8.

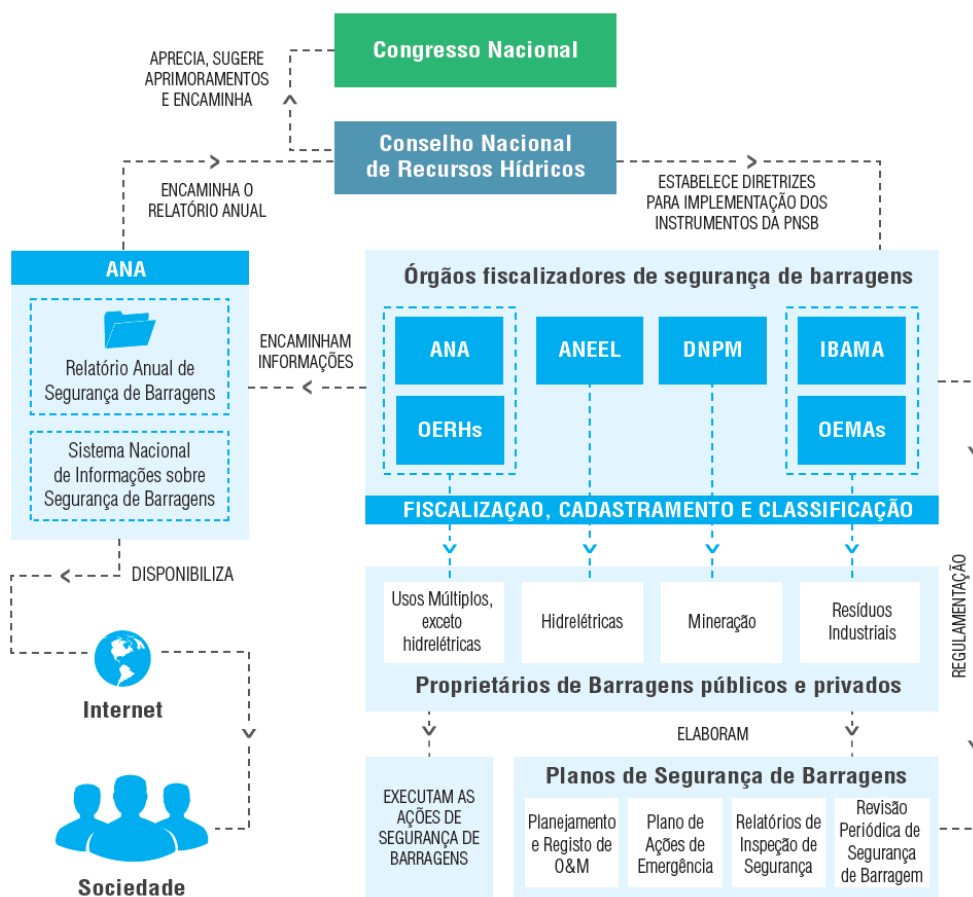


Figura 2.8: Arranjo esquemático da Política Nacional de Segurança de Barragens (Melo, 2014)

Uma vez que a barragem foi classificada é necessário ver os critérios estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores. A ANA, na Resolução nº 91/2012, estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem e da sua Revisão Periódica de Segurança como função da combinação das classificações em categoria de risco e dano potencial associado, conforme a Tabela 2.2, que consiste na Matriz de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado. Nota-se que tal procedimento está de acordo com o que se foi discutido no Capítulo 2.2.3, onde foi utilizado um método qualitativo para chegar a um valor que representa o estado da barragem (ANA, 2012).

Tabela 2.2: Matriz de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	A	C	D
BAIXO	A	D	E

Para cada nível de risco (A, B, C, D ou E) a ANA defini uma série de critérios a serem obedecidos e estipula um período mínimo da Revisão Periódica de Segurança de Barragem. A Tabela 2.3 apresenta quais critérios terão de ser obedecidos e a periodicidade das revisões enquanto os critérios serão expostos na Tabela A.10 encontrada no APÊNDICE.

Tabela 2.3: Volumes a serem obedecidos para cada classe.

CLASSE	VOLUMES	PERIODICIDADE
Classe A	Volumes I, II, III, IV e V.	A cada 5 anos.
Classe B	Volumes I, II, III, e V.	A cada 5 anos.
Classe C	Volumes I, II, III, e V.	A cada 7 anos.
Classe D	Volumes I, II, III, e V.	A cada 10 anos.
Classe E	Volumes I, II, III, e V.	A cada 10 anos.

Apesar de ser uma boa prática, na construção de uma matriz de risco, que a probabilidade mais baixa deva resultar em risco aceitável, mesmo para a consequência mais alta, pois, do contrário, todos os casos com a consequência mais alta seriam definidos como risco intolerável a matriz adotada pela ANA apresenta o nível de risco A (nível de risco mais elevado) para esse caso. Isso se deve porque a PNSB exige a criação do Plano de Ação de Emergência para todas as barragens classificadas como de dano potencial associado alto. Alternativamente, poderia ter sido adotada pela ANA um nível de risco mais baixo para esse caso e a proposta de um PAE simplificado para as barragens que tivessem dano potencial alto, porém categoria de risco baixa.

3 ESTUDO DE BARRAGENS

O objetivo deste capítulo é fazer uma breve revisão das formas de se classificar uma barragem para então analisar os três principais modos de ruptura.

É importante se ter em mente que quando falamos em ruptura de uma barragem a classificação mais importante passa a ser o seu material, pois barragens construídas com materiais diferentes apresentam comportamentos bem distintos.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS

As barragens podem ser classificadas por vários critérios. As classificações mais utilizadas no ponto de vista da engenharia estão ligadas ao seu uso, função e pelo material de construção utilizado.

Devido ao objetivo de uma barragem ela pode ser classificada em um desses dois grupos: barragem de regularização e barragem de retenção (COSTA, 2012).

As barragens de regularização são construídas para acumular água durante o período de chuva para ser usada no período de seca, esse tipo de barragem é utilizado na construção de hidrelétricas, barragens de irrigação e de armazenamento para uso doméstico. Dependendo da finalidade específica da regularização, é desejável aumentar o nível de água armazenada, elevar a cota d'água no reservatório ou até mesmo criar um lago (COSTA, 2012).

A função das barragens de contenção é segurar os picos de cheia causado pela chuva e liberar a água de forma constante e controlada. Ela é muito construída em cidades altamente densificadas onde o baixo grau de impermeabilidade pode gerar uma onda de cheia com um grande potencial de degradação da cidade. Dessa forma a barragem de detenção é construída para interceptar parte do escoamento e lança-lo aos poucos no sistema de drenagem ou em algum corpo de água com uma vazão suportável. As barragens destinadas ao acumulo de sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de minério também são classificadas nessa categoria. Nesse caso as barragens de retenção tentam evitar que o material retido danifique o leito dos corpos d'água a jusante, tanto fisicamente quanto quimicamente (COSTA, 2012).

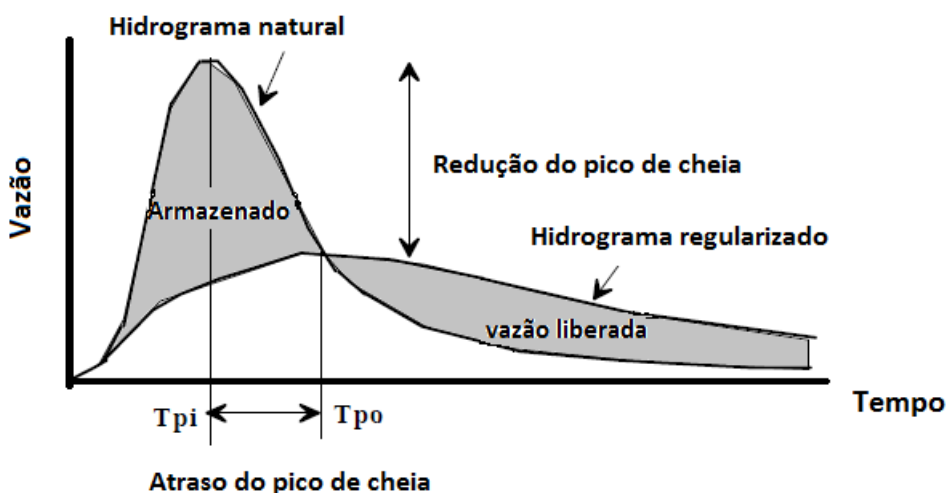


Figura 3.1: Amortecimento de uma onda de cheia MODIFICADO (GUO, 2013).

Com relação ao propósito da construção da barragem e do seu reservatório, as barragens podem ter os seguintes fins (USBR, 1987).

- Irrigação: O suprimento de água deve ser o suficiente para sustentar a irrigação (podendo ter pequenas faltas de água) por um custo por unidade de área razoável, tanto na operação, manutenção e reposição. A qualidade da água não pode causar danos a plantação e ao solo onde ela será usada.
- Uso doméstico e municipal: O suprimento de água deve ser adequado para a sua demanda. A qualidade da água deve ser tal que ela possa ser considerada potável e aceitável para o uso doméstico e para a maior parte do uso industrial por um custo de tratamento que seja

considerado economicamente aceitável. É desejável que toda a bacia hidrográfica seja protegida para evitar a contaminação do reservatório.

- **Uso industrial:** É muito parecido com o uso doméstico e municipal só que para determinadas indústrias é necessário um maior controle de qualidade da água para que ela não danifique equipamentos ou esteja mais adequado com o processo de produção da indústria.
- **Estocagem de água:** A qualidade da água deve estar de acordo com a função para a qual se deseja estocar. O reservatório deve estar localizado em uma área acessível para o seu uso, tanto direto quanto por utilização de tubulação ou canais.
- **Geração de energia:** Quando se fala em geração de energia é desejável que o reservatório tenha um bom volume de retenção de água e uma altura considerável. A qualidade da água não pode gerar dano aos equipamentos da usina hidrelétricas.
- **Controle de enchente:** Nos estudos de controle de cheias alguns fatores devem ser considerados: o custo da construção e manutenção do sistema de controle de enchentes deve ser menor que os benefícios trazidos pela sua implementação (tais benefícios surgem da redução dos danos causados pela chuva); o tempo de armazenamento deve ser o suficiente para minorar o pico da vazão de escoamento ou diminuir a frequência de enchentes; deve-se preferir sistemas automáticos ao invés de manuais.
- **Regularização de corpos hídricos:** O armazenamento de água para regularização de corpos hídricos pode ser justificado nos casos de rios que cessam ou tem sua vazão extremamente reduzidas nos períodos de seca e são utilizados como fonte principal de água para comunidades ou são usados para diluir a água residual gerada por alguma cidade (depois do seu devido tratamento). Nesses projetos precisa-se verificar qual seria a menor vazão regularizada para o desejado fim e se a sua construção não afetará a qualidade da água.

Ainda temos a classificação da barragem de acordo com os seus materiais de construção. Segundo Costa (2012) as barragens devem ser separadas em dois grandes grupos: as convencionais, que são as mais utilizadas e as não convencionais.

3.1.1 BARRAGENS CONVENCIONAIS.

Entre as barragens convencionais temos a barragem de terra, a barragem de enrocamento, a barragem de concreto e a barragem mista, sendo que os principais fatores para

a escolha de qual barragem será construída vai depender, principalmente, da existência de material para a sua construção e dos aspectos geológicos e geotécnicos da região.

3.1.1.1 BARRAGEM DE TERRA

As barragens de terra são consideradas homogêneas quando há uma predominância de um único material, tais barragens podem apresentar elementos diversificados feitos como filtros, rip-rap etc. Já as barragens zonadas apresentam na sua seção típica mais de um tipo de solo. Esses solos são dispostos em zonas em função da característica de cada material (COSTA, 2012).

As barragens de terra são recomendadas quando o reconhecimento de campo indicar que a rocha se encontra a grandes profundidades na área em consideração. Esse tipo de barragem exige menor declividade nos paramentos de montante e jusante e, portanto, resultando em maiores volumes. Por isso, é utilizado para pequenas e médias alturas (ASSIS, 2014).

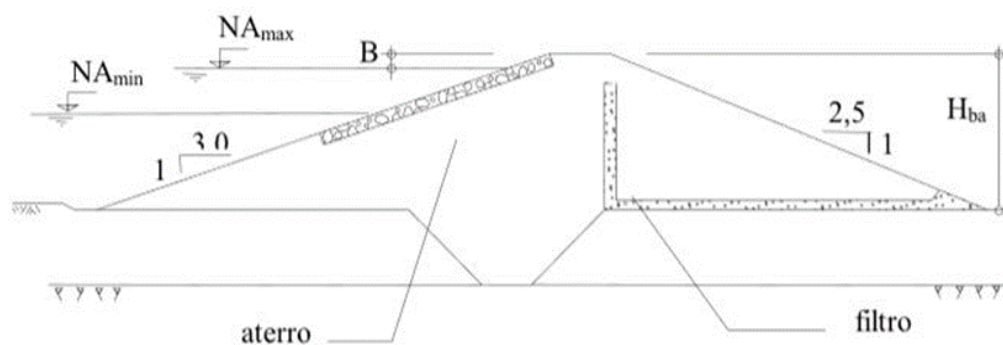


Figura 3.2: Seção típica de uma barragem de terra homogênea (ASSIS, 2014)

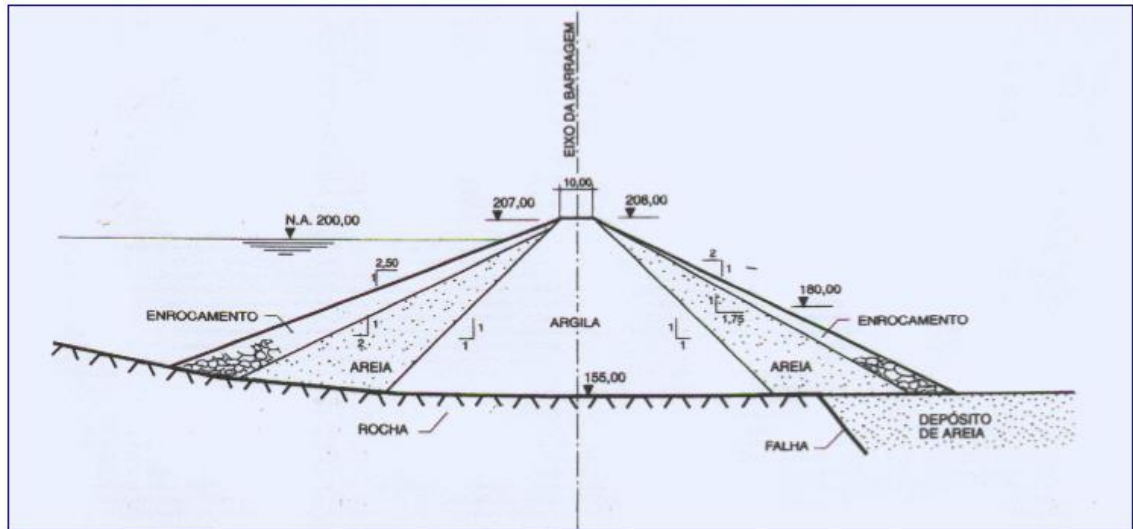


Figura 3.3: Barragem de terra zoneada – Barragem de Orós (CRUZ, 1996)

3.1.1.2 BARRAGEM DE ENROCAMENTO

As barragens de enrocamento tem o material rochoso como predominante. Por causa da alta permeabilidade do material rochoso é necessário a construção de uma zona impermeável. Essa zona pode ser um núcleo ou uma face impermeável.

Os núcleos permeáveis são formados por material argiloso, para evitar o carreamento do material fino é necessário construir uma transição entre o enrocamento e o núcleo. Com relação a posição do núcleo, Costa (2012) coloca que esse pode ser tanto construído centralizado ou inclinado para montante. O núcleo inclinado permite que durante o período de chuva concentre-se todo o trabalho no enrocamento de jusante e nos meses de seca seja feito o núcleo e o enrocamento de montante.

A utilização da barragem de enrocamento com face impermeável se torna uma boa saída para as regiões muito chuvosas onde a compactação do núcleo argiloso fica comprometido durante o período de chuva (Assis, 2014). Nesses casos a impermeabilidade se dá através de uma camada de asfalto, uma placa de concreto ou ainda, por uma chapa de aço instalado a montante (COSTA, 2012).

3.1.1.3 BARRAGEM DE CONCRETO

Com relação as barragens de concreto, a mais usual seria a barragem de gravidade. Nesse caso o corpo da barragem é constituído por um maciço de concreto, com pouca armação, cuja a característica física é ter sua estrutura trabalhando apenas à compressão (COSTA, 2012). Nas barragens de concreto gravidade a sua estabilidade é dada pelo seu peso próprio.

As barragens de concreto gravidade podem se tornar bastante onerosas devido a necessidade do grande volume de concreto. Por conta disso foram desenvolvidos novos formatos com um intuito de minimizar o volume de concreto da obra. Entre esses formatos temos as de gravidade aliviada, em contraforte e abóbada. Essas barragens tiram vantagem do seu formato, estrutura de contraforte e/ou uma maior armação para vencerem os esforços aplicados sobre elas (COSTA, 2012).

Por fim, a barragem será considerada mista quando ela for construída por diferentes matérias ao longo do seu traçado ou até mesmo na sua seção transversal. Os tipos mais conhecidos são: terra/enrocamento; terra/concreto e enrocamento/concreto, Vale ressaltar que uma barragem não é considerada mista quando ela é de terra ou enrocamento e apresenta alguma estrutura complementar como um vertedouro em concreto.

3.1.2 BARRAGENS NÃO CONVENCIONAIS

Como o próprio nome já diz, esse grupo de barragens não são muito utilizados, sendo que a maioria caiu em desuso. Nesse grupo temos as barragens de gabião, de madeira e alvenaria de pedra. Normalmente são obras de pequeno porte apesar de ser possível encontrar algumas barragens de alvenaria de pedra e madeira de médio porte, especialmente na Europa.

As barragens de gabião costumam ser inferiores a 10 metros e são projetadas para servir parcial ou totalmente como vertedouros. Essa obra é constituída por uma parede de gabião com extensão para jusante formando a própria bacia de dissipação e um aterro de material argiloso a montante. Entre argila e gabião é instalado uma manta de bidim para evitar o carreamento. Uma placa de concreto na parte superior é necessária para proteger o coroamento quando a barragem estiver vertendo grandes vazões (COSTA, 2012).

Nas barragens de madeira são construídas grandes caixas de madeira de boa qualidade que são preenchidas com rocha para evitar o seu deslocamento pelas pressões hidrostáticas. A jusante é necessário um revestimento, normalmente uma chapa de aço, que irá garantir a vedação da estrutura.

Muito parecido com as barragens de concreto, as barragens de alvenaria de pedra são formadas por blocos de alvenaria de pedra rejuntadas manualmente com cimento. Elas não necessitam de armação e nem de fôrma para a sua construção.

3.2 MODOS DE RUPTURA DAS BARRAGENS

Para se avaliar os riscos associados a construção de uma barragem, primeiro precisa-se entender os modos que uma barragem pode falhar e acabar se rompendo. Quando se trata de barragem cada tipo de barragem apresenta os seus próprios modos de ruptura. Nesse trabalho vamos focar apenas nos modos de ruptura das barragens convencionais: terra, enrocamento e concreto, pois elas constituem a maioria das barragens encontradas no Brasil.

3.2.1 MODOS DE RUPTURA DAS BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO.

Os modos de ruptura de grande consequência de uma barragem de terra são o galgamento, a instabilidade de talude, e a erosão interna. Todos eles podem levar a ruptura total da barragem e trazer diversos prejuízos para o que se encontrar a jusante.

A causa de falha mais comuns nas barragens de terra e enrocamento é o galgamento (*overtopping*) sendo a causa primaria de 31% e a causa secundaria de 18% das falhas. Em segundo lugar temos a erosão interna do corpo da barragem tendo sido considerado a causa primaria de 15% dos acidentes e 13% como causa secundaria (ICOLD, 1995).

3.2.1.1 GALGAMENTO.

O galgamento (*overtopping*) é o transbordar da água por cima da barragem. As barragens de terra não aguentam tais eventos e tem o carreamento de seus materiais e desprendimento dos blocos deixando grandes marcas de erosão no seu talude de jusante. Caso a onda de cheia seja muito grande ela é capaz de destruir toda a estrutura da barragem. Ondas de cheias pequenas, também podem ser bastante letais, pois até mesmo um pequeno estrago no talude de jusante pode levar a uma instabilidade do talude ou criar um caminho preferencial da água que futuramente poderá evoluir-se para o piping. Na prática da engenharia da barragem não é aceito em nenhuma condição que as barragens de terra sofram o galgamento.

O rompimento da barragem ocorre por erosão da face à jusante, o processo se inicia geralmente no pé da barragem e acaba se expandindo em direção a montante e lateralmente. Quando a erosão atinge o topo da barragem, ocorre o rompimento da crista e o início da formação de brecha (USACE, 2014). O processo de rompimento da barragem é descrito conforme a Figura 3.4.

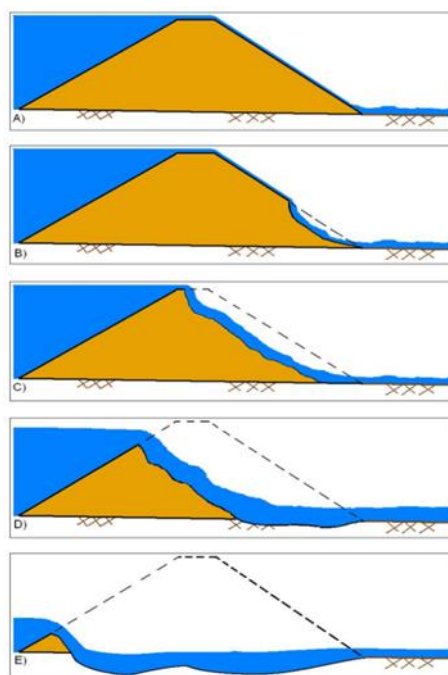


Figura 3.4: Processo de rompimento por galgamento (USACE, 2014)

O fenômeno do galgamento pode ser analisado como um fenômeno hidrológico. A maneira encontrada para se evitar esse tipo de ruptura é através do correto dimensionamento do vertedouro para dar vazão de forma segura a toda a vazão excedente com um tempo de

recorrência predefinido e a estipulação de uma borda livre alta o suficiente para não permitir que o transbordo das ondas formadas pelos ventos.

O galgamento pode ocorrer devido a 4 cenários específicos:

- Galgamento devido à capacidade de descarga do vertedouro ser insuficiente para dar vazão ao volume excedente de água devido a uma cheia extraordinária;
- Galgamento em situações onde houve uma redução da capacidade de amortecimento dos hidrogramas de cheias devido ao fato de uma ruptura de talude no entorno ter reduzido o volume disponível para trânsito do reservatório;
- Galgamento em situações onde houve a redução da capacidade de extravasar devido a obstrução do vertedouro;
- Galgamento da barragem por uma onda gerada pela ruptura de taludes no entorno do reservatório.

Para o cálculo da probabilidade de galgamento do primeiro cenário é necessário ter as curvas altura-duração-frequência da região, a partir delas deve-se calcular as alturas de precipitação para diferentes períodos de retorno e gerar o hidrograma de cheia. Para cada período de retorno escolhido deve-se fazer a análise hidrológica para se encontrar o nível d'água máximo do reservatório nesse evento. A probabilidade de galgamento será igual ao inverso do menor tempo de retorno que gerar um nível d'água maior que a cota de coroamento.

$$P_{galg.} = \frac{1}{TR} \quad (3.1)$$

No segundo cenário, para se realizar o cálculo da probabilidade de galgamento, é necessário calcular a probabilidade de ruptura dos taludes no entorno do reservatório e para cada um dele estimar o volume de solo deslocado. Depois disso basta atualizar a curva cota-volume do reservatório e realizar o mesmo procedimento realizado no primeiro cenário. A probabilidade de galgamento desse cenário será igual ao produto da probabilidade de galgamento da barragem com o seu volume reduzido versus a probabilidade de ruptura do talude o qual gerou a redução do volume.

$$P_{galg.red.vol.} = P_{ruptura\ de\ taludes} \times \frac{1}{TR_{redução\ volume\ disponível}} \quad (3.2)$$

No terceiro cenário, para se realizar o cálculo da probabilidade de galgamento, é necessário calcular a probabilidade de obstrução do sistema extravasor, calcular a curva cota-descarga do vertedouro considerando o percentual da sua capacidade perdida e realizar o mesmo procedimento adotado no cálculo do primeiro cenário. A probabilidade de galgamento desse cenário será igual ao produto da probabilidade de galgamento da barragem com o seu vertedouro obstruído versus a probabilidade de obstrução do vertedouro.

$$P_{galg. obstrução} = P_{obstr. vertedouro} \times \frac{1}{TR_{obstr. vertedouro}} \quad (3.3)$$

Não foi encontrado nenhuma metodologia padrão para o cálculo da probabilidade de galgamento do quarto cenário porem para realizar o seu cálculo é necessário calcular a probabilidade de ruptura dos taludes no entorno do reservatório, calcular o tamanho da onda gerada pelo volume de solido deslocado ter atingido o reservatório e calcular a probabilidade dessa onda galgar a barragem. A probabilidade de galgamento desse cenário será igual ao produto da probabilidade da onda galgar a barragem versus a probabilidade de ruptura do talude o qual gerou onda.

Uma vez que a barragem é galgada existe probabilidade dela resistir a passagem da água ou dela sofrer sérias erosões as quais a levariam a ruptura. A probabilidade de ruptura devido ao galgamento pode ser calculada utilizando-se a arvore de eventos, nela terá de ser levado em conta a espessura de lâmina d'agua, o tempo de galgamento e o material da barragem. Por fim a susceptibilidade da barragem ao galgamento é igual ao produto da probabilidade de sofrer o galgamento versus a a probabilidade de ruptura devido ao galgamento.

Em barragens de grande porte costuma-se ter um monitoramento da precipitação dentro da bacia hidráulica com o objetivo de detectar antecipadamente a vinda de uma cheia excepcional. Ao se detectar uma cheia excepcional é adotado o procedimento de rebaixamento rápido com o intuito de aumentar a capacidade de amortecimento de cheia do reservatório.

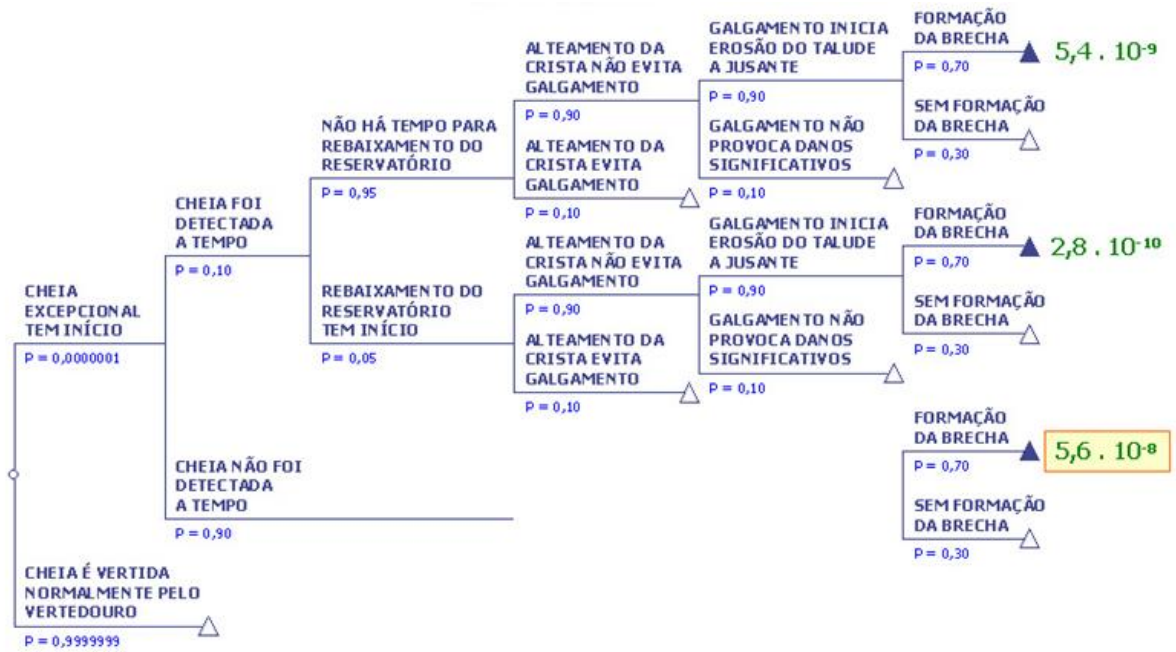


Figura 3.5: Árvore de evento sem detecção de cheia (Silveira & A. Machado, 2005).

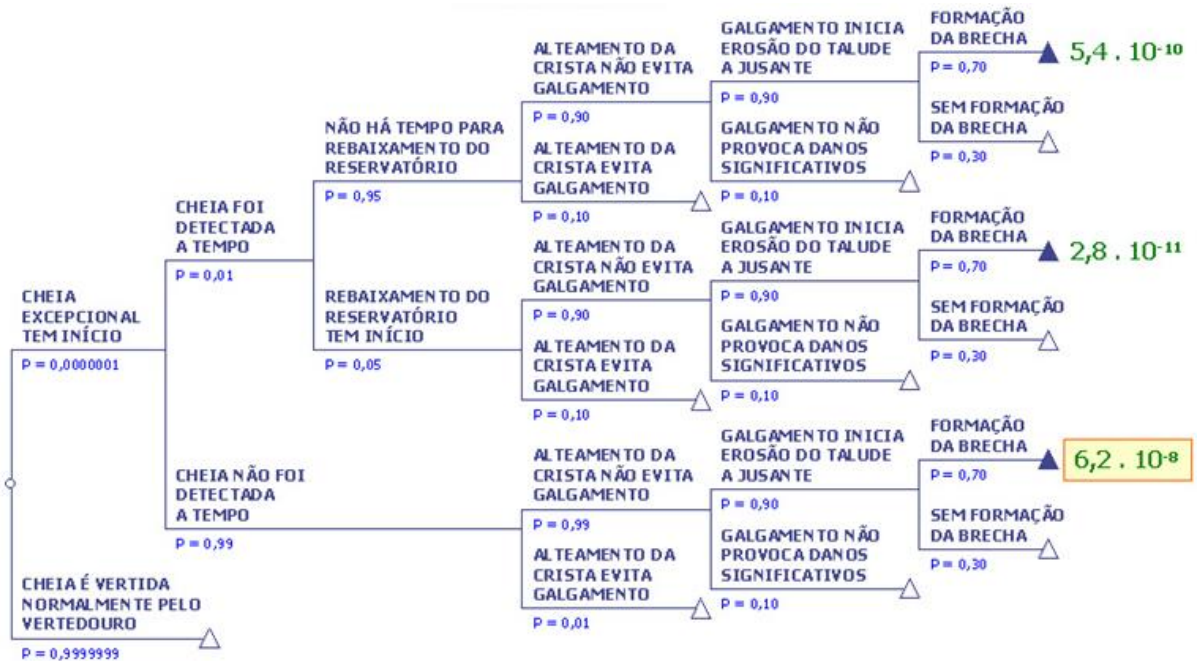


Figura 3.6: Árvore de evento com detecção de cheia (Silveira & A. Machado, 2005).

Silveira & A. Machado (2005) fizeram uma análise sobre o impacto que o sistema de detecção causa no risco ao galgamento da barragem João Leite pertencente a SANEAGO e

concluíram que apesar do sistema de detecção não alterar em muito o valor da susceptibilidade da barragem ao galgamento ela consegue diminuir bastante o risco ao aumentar o tempo de resposta da população. A Figura 3.5 seria a árvore de evento construída para a barragem sem a presença do sistema de detecção enquanto a Figura 3.6 teria o sistema de detecção.

3.2.1.2 INSTABILIDADE DE TALUDES

A instabilidade de talude é caracterizada pela mobilização de uma massa de solo, no caso das barragens o mecanismo de instabilidade mais comum é o deslizamento da massa de solo. Os estudos de estabilidade de taludes devem ser feitos para cada um dos casos de solicitação: período construtivo, operação e rebaixamento rápido.

Segundo Assis (2014) a superfície de ruptura depende do tipo de material presente na barragem e na sua fundação. Caso a coesão do material seja predominante, a superfície de ruptura vai tender a ser profunda e circular ao passo em que os materiais cujo atrito seja mais marcante, a sua ruptura tende a ser mais superficial e com uma forma mais planar.

A Figura 3.7 apresenta algumas das superfícies de ruptura circulares mais comuns em barragens.

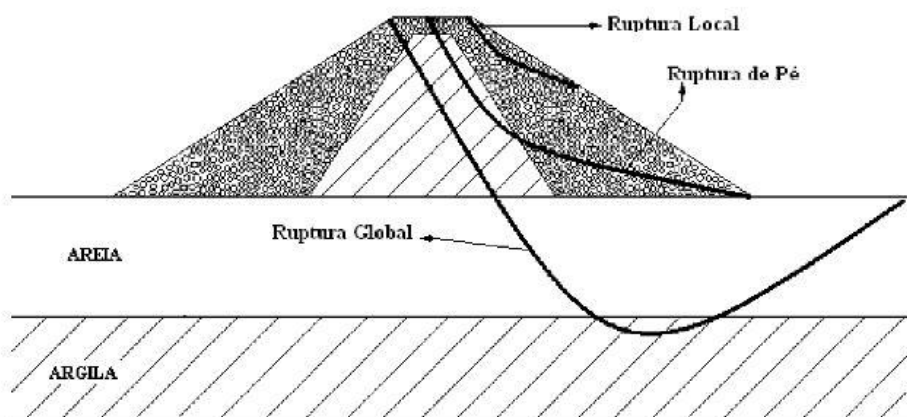


Figura 3.7: Superfícies de ruptura circulares (Assis, 2003).

Em casos de barragens zonadas ou barragens de enrocamento com núcleo impermeáveis de argila onde exista uma boa diferença de resistência entre dois materiais vizinhos, pode-se

ocorrer uma ruptura planar na fronteira dos dois materiais. Ao realizar uma análise computacional, Assis, (2003) recomenda que se analise planos de ruptura passando por esses materiais.

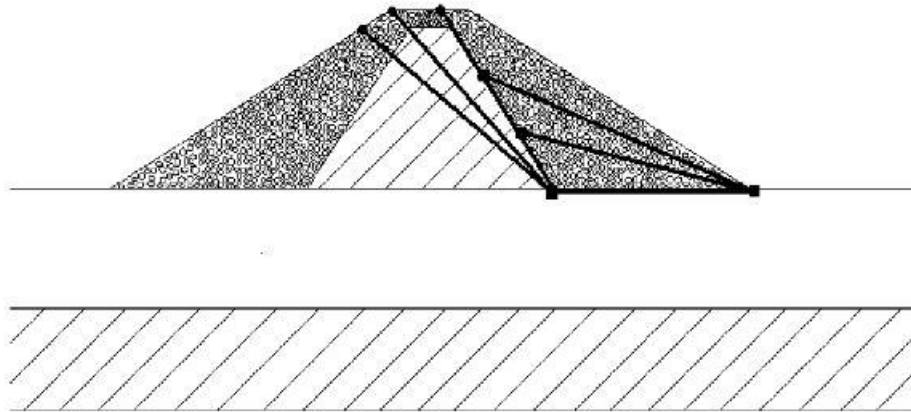


Figura 3.8: Possíveis rupturas planares (ASSIS, 2003).

Os métodos mais tradicionais de cálculo de estabilidade de talude considerando o deslizamento circular e se baseiam na divisão da massa de solo em fatias. Como exemplo desses métodos temos o método de Morgenstern e Price que é considerado mais refinado e satisfaz rigorosamente às condições de equilíbrio.

No caso de a análise de ruptura planar é necessário a utilização de outro método de cálculo no qual não se tenha restrição quanto a forma da superfície de deslizamento. Para esse caso recomenda-se o método do *US Corps of Engineers* ou o método generalizado de Janbu (1954).

Segundo Cruz (1996), nas análises de estabilidade deve-se considerar a estabilidade externa (taludes dos espaldares) quanto a estabilidade interna ou geral (barragem mais fundação). Verificada ambas as estabilidades externa e interna, é necessário estabelecer todos os mecanismos potenciais de ruptura e analisa-los um a um separadamente; ruptura circulares, planares ou em uma combinação de superfícies.

Segundo o critério de projeto civil de usinas hidrelétrica da Eletrobrás (ELETBRÁS, 2003), os critérios de segurança para estabilidade devem ser avaliados para os vários casos de análise. Como diretriz geral para fatores de segurança, deverá ser utilizado o “*U.S. Corps of*

Engineer - Design Manual EM - 1110-1-1902 - Stability of Earth and Rockfill Dams”, com algumas adaptações a seguir apresentado:

Tabela 3.1: Fatores de segurança para diferentes estágios de carregamento.

CASO	COEFICIENTE DE SEGURANÇA	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	OBSERVAÇÕES
Final de Construção	1,3 (a)	Q ou S (b)	Taludes Montante e Jusante
Rebaixamento Rápido	1,1 a 1,3 (c)	R ou S	Valor mínimo para solos dilatantes Valor máximo para solos que contraem no cisalhamento
Percolação Estável	1,5	R ou S	Talude Jusante
Análise Sísmica	1,0	R ou S	Taludes Montante e Jusante

(a) Para barragens acima de 15 m de altura sobre fundações relativamente fracas, usar fator de segurança mínimo de 1,4.

(b) Em zonas em que não são antecipadas pressões neutras, usar resistência de ensaios S.

(c) Nos casos em que o rebaixamento ocorre com frequência, considerar o coeficiente 1,3.

3.2.1.3 EROSIÃO INTERNA (“PIPING”)

Numa certa medida todas as barragens sofrem uma percolação, seja pela fundação ou pelo próprio corpo da barragem. Essa percolação é causada pelo gradiente hidráulico formado pelo barramento e caso a barragem tenha sido bem dimensionada e construída não acarretará em nenhum problema grave.

A percolação começa a ser um problema quando ela acaba provocando uma grande poropressão no corpo da barragem afetando a sua estabilidade ou quando a percolação começar a carrear os materiais finos, criando uma erosão interna na barragem (“piping”). Segundo Cruz (1996) as observações de rupturas ocorridas no passado demonstram que o fenômeno de piping é regido pela estatística dos extremos, ou seja, os valores extremos para a resistência à tração ou coesão é que condicionam a formação deste fenômeno. Como os ensaios laboratoriais são feitos em condições sobre controle os ensaios acabam sendo submetidos a cenários de estatística média e não em cenários de estatística extremos.

Uma vez que o processo de erosão interna se inicia é muito complicado e oneroso combatê-lo, por esse motivo deve-se projetar a barragem de tal forma que o “piping” não se

inicie (o caso do rompimento da barragem da Pampulha é um bom exemplo). Uma boa barragem deve ter um sistema de drenagem capaz de interceptar toda a água percolante e guiá-la para fora da barragem sem que a água cause danos. Além disso é necessário que se dimensione corretamente as transições entre os materiais finos e grossos.

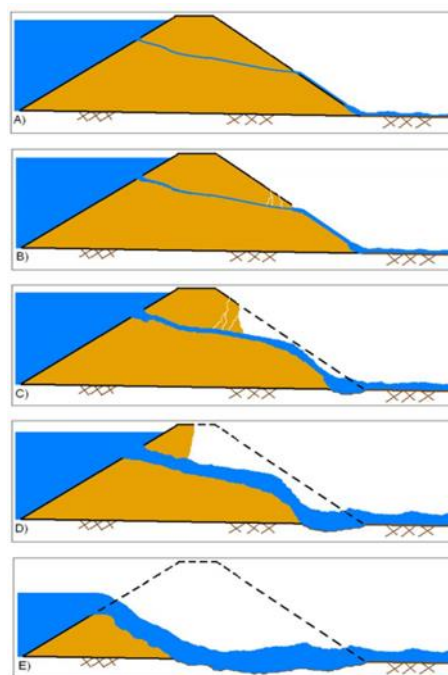


Figura 3.9: Processo de rompimento por *piping* (USACE, 2014)

Segundo Carvalho (2011) O projeto de um filtro deve ter como base fundamental a granulometria do material a ser empregado. Esta granulometria deve ser tal que:

- As partículas menores se acomodem nos vazios entre as partículas maiores, de modo que o conjunto atue sempre como camada filtrante, ou seja, o material sólido deve ser retido e a água consiga percolar com facilidade. Quando tal ocorre, a água que surge a jusante do filtro se apresenta límpida e isenta de material sólido;
- O material mais fino seja retido pelo filtro, evitando o carreamento de partículas sólidas e, conseqüentemente, a formação de erosão regressiva (“*piping*”);
- Os vazios do material do filtro devem ser suficientemente pequenos, de forma que impeçam a passagem das partículas do solo a ser protegido;
- Os vazios do filtro devem ser suficientemente grandes de forma que propiciem a livre drenagem das águas e o controle de forças de percolação, impedindo o desenvolvimento de altas pressões hidrostáticas, isto é, a carga dissipada no filtro.

Segundo (Cruz, 1996) os critérios convencionais de dimensionamento de filtros propostos por Betran e Terzaghi são recomendados para transições entre areia e cascalho ou brita. Posteriormente *U.S Army Corps of Engineers* acrescentou mais um critério aos requisitos que Terzaghi sugeriu e o *Bureau of Reclamation* limitou o diâmetro mínimo do filtro em 76mm (CARVALHO, 2011).

$$D_{15}/d_{15} > 4 \quad (3.4)$$

$$D_{15}/d_{85} < 4 \quad (3.5)$$

$$D_{50}/d_{50} < 25 \quad (3.6)$$

Onde,

D_{15} = Diâmetro do material em que 15% em peso tem diâmetro menor.

D_{50} = Diâmetro do material em que 50% em peso tem diâmetro menor.

d_{15} = Diâmetro do material a ser protegido em que 15 % em peso tem diâmetro menor.

d_{50} = Diâmetro do material a ser protegido em que 50 % em peso tem diâmetro menor.

d_{85} = Diâmetro do material a ser protegido em que 85 % em peso tem diâmetro menor.

Ainda existem outros critérios como os apresentados pelo *U.S Bureau of Reclamation* (1965) para barragens de pequeno porte ou mesmo os propostos por Sherard e USBR (Assis, 2003).

Segundo Espósito (2010) a modelagem do fenômeno de piping utilizando uma metodologia puramente determinística pode trazer erros devido a natureza aleatória de todos os fatores envolvidos na ruptura.

Uma forma de escapar dos problemas devido a natureza aleatória do fenômeno é utilizar uma abordagem probabilística. Para o fenômeno do piping é muito utilizado a Árvore de Falhas, onde os fatores causais necessários para o piping são identificados e ordenados de maneira lógica (Espósito, et al., 2010).

Ao se calcular a susceptibilidade ao piping deve-se avaliar os três cenários prováveis de piping: erosão interna do maciço, erosão interna pela fundação e a erosão interna do maciço para a fundação. Para cada um desses cenários existem específicos fatores causais que devem ser identificados e quantificados, porém todas elas seguem uma base genérica de sequência de eventos proposto pela USBR (2012):

1. Condição do nível d'água do reservatório,
2. Iniciação: início da erosão,
3. Continuação: fluxo de água com saída sem filtro ou com filtro inadequado,
4. Progressão: formação de tubo (teto estável e contínuo ou paredes laterais),
5. Insucesso na detecção ou intervenção,
6. Progresso: formação do mecanismo final de ruptura
7. Ruptura da barragem: liberação sem controle do volume do reservatório.

3.2.2 MODOS DE RUPTURA DAS BARRAGENS DE CONCRETO

Quando se está trabalhando com barragens de concreto a maior preocupação se encontra na estabilidade externa e interna. Ambas as estabilidade tem de atender aos requisitos básicos de segurança estabelecidos em função do tipo da obra e das diversas condições de carregamento admitidas.

Segundo o guia de segurança de barragens (CBDB, 2001) a estabilidade da estrutura é feita considerando-a como um conjunto monolítico. Os cálculos de estabilidade devem ser realizados para os três casos de carregamento: caso de carregamento normal (CCN); caso de carregamento de construção (CCC) e casos de carregamento excepcional (CCE).

O CCN corresponde a todas as combinações de ações que apresentem grande probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, durante a operação normal ou manutenção normal da obra, em condições hidrológicas normais. Os seguintes esforços devem ser considerados:

- Peso próprio, empuxo de aterros, reaterros e assoreamentos;
- Carga acidental uniformemente distribuída, concentrada e cargas móveis e vento;
- Carga relativa às atividades rotineiras de operação e manutenção da obra;
- Esforços hidrostáticos com NA do reservatório e do canal de fuga variando entre os níveis máximo normal e mínimo normal, sendo que a condição mais severa de carregamento deverá ser selecionada para cada estrutura;
- Subpressão, drenos operantes;

- Esforços hidrodinâmicos decorrentes de fluxo hidráulico pelas passagens d'água e durante a operação da usina;
- Temperatura e retração do concreto;
- Ancoragens ativas;
- Esforços sobre a estrutura no primeiro estágio de operação, em casos onde o segundo estágio da estrutura deva ser completado posteriormente.

O CCC corresponde a todas as combinações de ações que apresentem probabilidade de ocorrência durante a construção da obra, apenas durante períodos curtos em relação à sua vida útil e em boas condições de controle. Podem ser devidas a carregamentos de equipamentos de construção, estruturas executadas apenas parcialmente, carregamentos anormais durante o transporte de equipamentos permanentes e quaisquer outras condições semelhantes. Neste caso deverão ser considerados os esforços:

- da fase de construção;
- de montagem, instalação e testes de equipamentos permanentes ou temporários;
- de cimbramento e descimbramento;
- de construção como execução e ancoragens, injeções, esgotamento, enchimento, compactação e outros, inclusive os níveis de água a montante e a jusante durante a fase de construção.

Por fim o CCE corresponde a quaisquer ações de cargas de ocorrência eventual de baixa probabilidade de: condições hidrológicas excepcionais, falha no sistema de drenagem, manobra de caráter excepcional, efeito sísmico entre outros. Deve-se considerar a mesma relação de esforços do Caso de Carregamento Normal (CCN), calculados, no entanto, para as condições excepcionais de operação ou manutenção e com as seguintes modificações:

- reservatório no NA máximo normal e NA jusante no máximo correspondente ou reservatório no NA máximo normal e NA jusante correspondente a vazão zero incluindo efeitos sísmicos;
- subpressão com drenos inoperantes e NA jusante máximo e drenos operantes com NA jusante entre normal e mínimo;
- quaisquer esforços excepcionais sobre as estruturas de primeiro estágio.

3.2.2.1 ESTABILIDADE À FLUTUAÇÃO

Subpressões causadas pela percolação de água na fundação podem ser tão elevadas a ponto de soerguerem o corpo da barragem. Caso haja uma imersão significativa a barragem deve resistir aos esforços provenientes das subpressões, evitando que a estrutura seja empurrada para cima.

Segundo Volkmer (2011) a subpressão corresponde a componente vertical das poropressões, exercendo um esforço na estrutura ou em sua fundação no sentido ascendente, isto é, de baixo para cima, em planos determinados das estruturas de barragens de concreto (juntas de concretagem), no contato estrutura-fundação ou em discontinuidades da fundação (fraturas, falhas, contatos geológicos etc.).

Na publicação “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas” (ELETBRÁS, 2003) é apresentada uma fórmula de análise simplificada para as subpressões no contato entre estrutura e fundação. Essa simplificação é feita admitindo-se uma variação linear de perdas de carga ao longo de linhas de fluxo selecionados que correspondem a caminhos de percolação preferenciais.

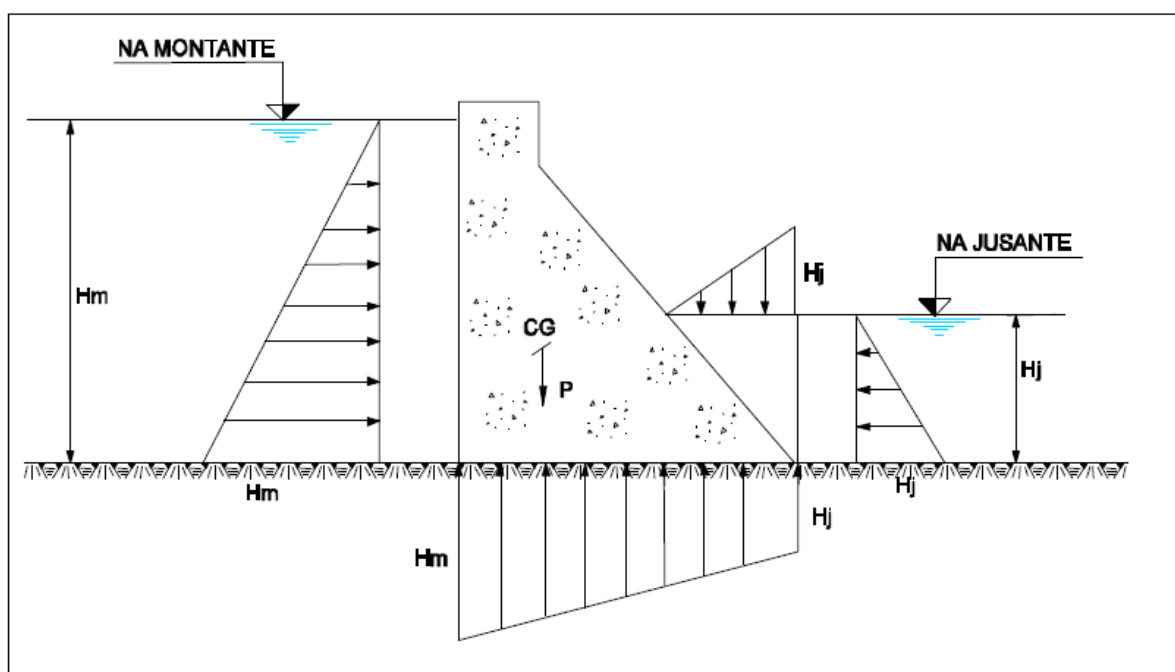


Figura 3.10: Distribuição simplificada das pressões hidrostáticas (ELETBRÁS, 2003).

Para diminuir a pressão gerado pela percolação da água na fundação da barragem costuma-se construir uma linha de drenos. Essa linha de drenos não zera as subpressões mas acaba alterando o diagrama das pressões hidrostáticas. Segundo a Eletrobrás (2003) o novo diagrama, considerando a linha de drenos, pode ser simplificado conforme mostra a Figura 3.11.

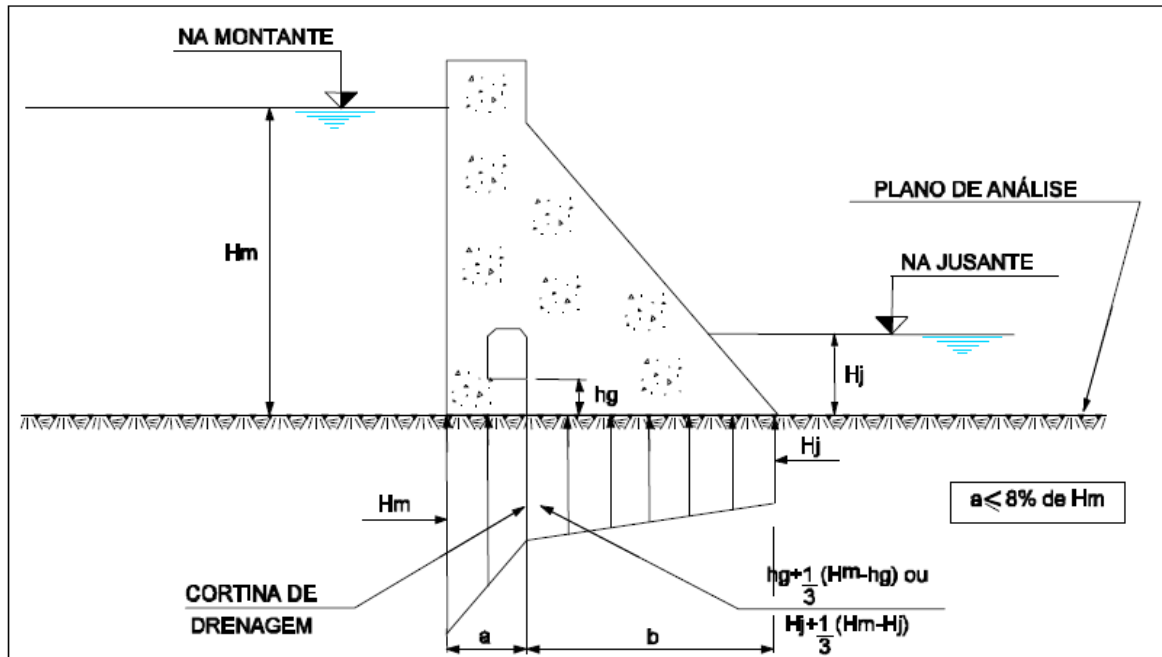


Figura 3.11: Distribuição simplificado das pressões hidrostática com linhas de drenos (ELETOBRÁS, 2003).

Com o diagrama de pressões hidrostáticas estabelecido é necessário fazer o cálculo do fator de segurança à flutuação conforme a equação (3.7). Vale ressaltar que quaisquer contribuições favoráveis devidas à coesão e ao atrito deverão ser desprezadas, o mesmo é válido para as cargas acidentais. As forças verticais deverão incluir as cargas permanentes mínimas das estruturas, o peso próprio de equipamentos permanentes, se instalados, e de lastros (água ou aterro) e sistemas de ancoragem, se utilizados durante determinados estágios da construção (ELETOBRÁS, 2003).

$$FSF = \frac{\sum V}{\sum U} \quad (3.7)$$

Onde,

FSF = Fator de Segurança a Flutuação;
 ΣV = Somatório das forças gravitacionais;
 ΣU = Somatório das forças de subpressão.

3.2.2.2 ESTABILIDADE AO TOMBAMENTO

O tombamento da barragem nada mais é do que a rotação da barragem em relação a um ponto ou eixo efetivo. Segundo Marques Filho (2005, citado por Marques & Carvalho, 2013), em estruturas usuais de barragens, considera-se como ponto natural de rotação o seu pé de jusante. Marques Filho (2005) ainda ressalta que a situação é fictícia, pois antes de qualquer movimento as tensões induzidas levariam a ruptura do material.

A Eletrobrás (2003) apresenta na sua publicação “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas” a equação (3.8), para o cálculo do fator de segurança ao tombamento.

$$FST = \frac{\Sigma M_e}{\Sigma M_t} \quad (3.8)$$

Onde,

FST = Fator de segurança ao tombamento.

ΣM_e = Somatório dos momentos estabilizantes atuantes sobre a estrutura, consideradas como tal, o peso próprio da estrutura, as cargas permanentes mínimas e o peso próprio dos equipamentos permanentes, se instalados;

ΣM_t = Somatório de momentos fletores das forças normais atuantes em relação ao ponto de tombamento T.

Pode-se adotar como critério complementar a localização da força resultante vertical, como é proposto pelo *U.S Army Corps of Engineers (1195)*.

$$e_b = \frac{\Sigma M_t}{\Sigma V_t} \quad (3.9)$$

Onde,

e_b = Distância da força resultante na base até o ponto de tombamento T;

ΣMt = Somatório de momentos fletores das forças normais atuantes em relação ao ponto de tombamento T;

ΣVt = Somatório das forças verticais.

Uma vez obtido a distância da força resultante na base para cada condição é possível compara-la com a Tabela 3.2. Caso a distância do somatório das forças verticais ao centro da base esteja a uma distância menor ou igual ao mostrada na Tabela 3.2, a barragem estará satisfazendo o critério.

Tabela 3.2: Critério de estabilidade ao tombamento (USACE, 1995).

Casos de carregamento	Localização da força resultante
Usual	1/3 médio da base
Não usual	1/2 médio da base
Extremo	Dentro da base

O *U.S Army Corps of engineers* (1195), ainda apresenta um croqui das tensões de compressão na base da barragem em relação a posição da força vertical resultante. Como é mostrado na Figura 3.12.

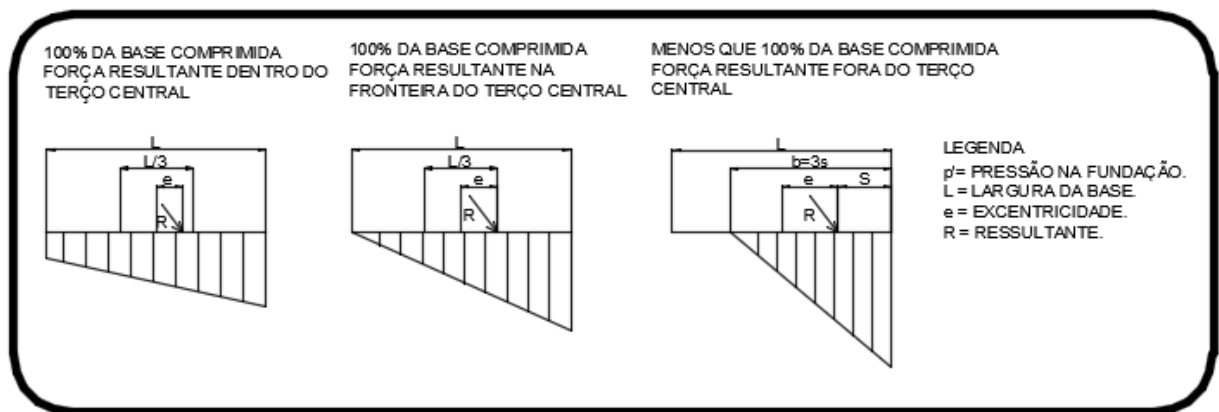


Figura 3.12: Relação entre posição da resultante e tensões de compressão na base da barragem (USACE, 1995).

3.2.2.3 ESTABILIDADE AO DESLIZAMENTO

Conforme Proença (2004, citado por MARQUES & CARVALHO, 2013) ao se fazer a análise de estabilidade ao deslizamento é necessário selecionar as superfícies de ruptura possíveis, incluindo os planos de menor resistência ou os submetidos às tensões críticas tanto na estrutura quanto na fundação e no contato estrutura-fundação. As Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15 ilustram o deslizamento nesses três locais.

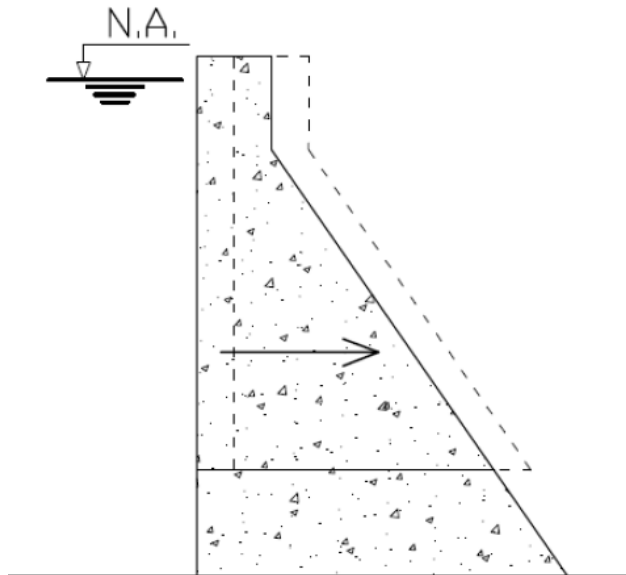


Figura 3.13: Deslizamento na estrutura (MARQUES & CARVALHO, 2013).

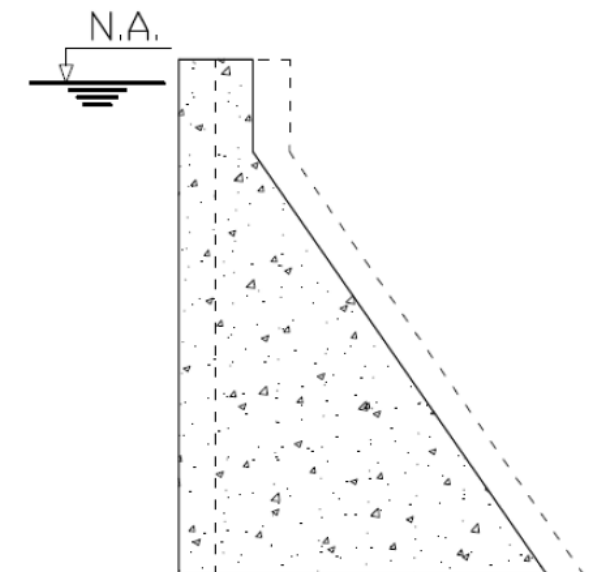


Figura 3.14: Deslizamento no contato estrutura-fundação (MARQUES & CARVALHO, 2013).

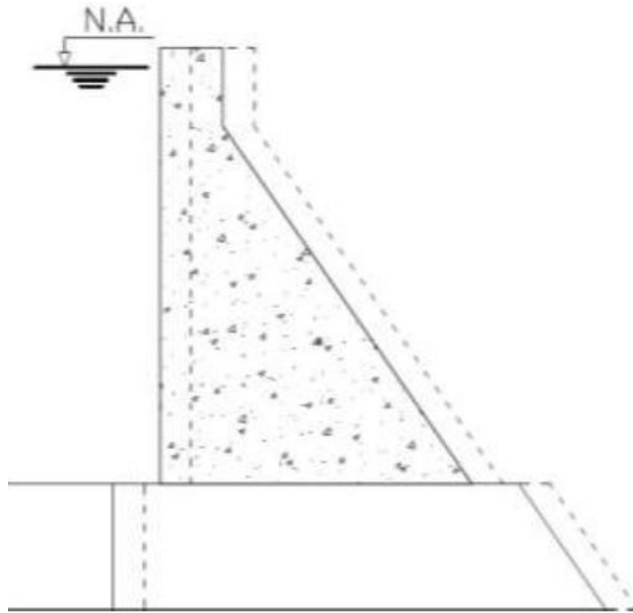


Figura 3.15: Deslizamento na fundação (MARQUES & CARVALHO, 2013).

O fator de segurança ao deslizamento é considerado o indicador de desempenho mais importante da estabilidade de uma barragem de concreto. Ele é dado através da razão entre a resistência ao cisalhamento disponível e a resultante de todas as forças na direção do plano potencial de deslizamento analisado. A equação apresentada pela ELETOTBRÁS (2003) pode ser usada para o cálculo do fator de segurança:

$$FSD = \frac{\frac{\sum N_i \tan \phi_i}{FSD_\phi} + \frac{\sum C_i A_i}{FSD_c}}{\sum T_i} \quad (3.10)$$

Onde,

FSD = Fator de segurança ao deslizamento;

FSD ϕ = Fator de redução da resistência ao atrito;

FSD c = Fator de redução da resistência à coesão;

$\sum N_i$ = Somatório das forças normais à superfície de deslizamento, em análise;

ϕ_i = Ângulo de atrito característico da superfície de deslizamento, em análise;

C_i = Coesão característica ao longo da superfície de deslizamento;
 A_i = Área efetiva comprimida da estrutura no plano em análise;
 $\sum T_i$ = Somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.

ZNAMENSKY (2007, citado por VOLKMER, 2011) ressalta que, na prática mundial de projetos e de construção de barragens de peso, executada sem concreto estrutural, massa convencional ou compactado a rolo, ciclópico ou alvenaria argamassada, quando a condição de estabilidade ao deslizamento-escorregamento de uma estrutura de peso é satisfeita, as demais condições citadas são satisfeitas automaticamente. Assim, as principais soluções construtivas utilizadas em barragens do tipo gravidade baseiam-se na otimização do coeficiente de segurança ao deslizamento.

3.3 ANÁLISE DE FLUXO EM REGIME PERMANENTE

No regime permanente as vazões e pressões permanecem constantes e o fluxo é ditado pela Lei de Darcy.

$$v = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \quad (3.11)$$

O parâmetro k_w é a permeabilidade do solo, ele é função do grau de saturação do solo e do seu volume de vazios. Em solos saturados costuma-se trabalhar com ele como sendo uma constante enquanto em solos não saturados a permeabilidade é influenciada pela sucção mátrica, a qual varia espacialmente (RIOS, 2015).

Ao trabalharmos em meios heterogêneos e anisotrópicos a permeabilidade começa a apresentar uma variabilidade espacial e em um mesmo ponto a permeabilidade pode ter valores diferentes dependendo da direção em que se está estudando ($k_{wx} \neq k_{wy}$). No caso mais geral ainda, ao invés de trabalhar com um fluxo permanente, a vazão no meio estará variando ao longo do tempo. Nesse caso estaríamos analisando um fluxo bidimensional em regime

transiente passando por um meio heterogêneo e anisotrópico, e a equação diferencial que o rege passa ser a equação(3.12):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{wx} \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{wy} \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) \quad (3.12)$$

A equação(3.12) foi derivada da conservação de massa dentro de um volume de controle de tal forma que, a diferença do fluxo de entrada e saída é igual a variação do volume de fluido armazenado no volume de controle. Caso o estudo seja feito em fluxo permanente, o fluxo de entrada será igual ao fluxo de saída e dessa forma não haverá uma variação no volume armazenado ($\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$).

Ao resolver essa equação obtemos duas famílias de curvas ortogonais entre si. Essas famílias de curvas são chamadas de linhas equipotenciais e linhas de fluxo e juntas elas formam a rede de fluxo do problema analisado. Antigamente, as redes de fluxo eram obtidas de forma manual, muitas vezes desenhando-as seguindo algumas regras gráficas. Porém com a melhoria das ferramentas computacionais tais métodos de obtenção das redes de fluxo caíram em desuso e passou-se a traçar as redes de fluxo usando métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos (MEF). Ao adotar esse método é necessário discretizar a barragem e entrar com as condições de contorno do problema, as quais podem ser tanto o fluxo em determinada região ou então a carga hidráulica.

4 MÉTODOS DE ANÁLISE PROBABILÍSTICA

As análises de estabilidade de taludes apresentadas anteriormente são todas análises determinísticas as quais avaliam a estabilidade do talude através de um fator de segurança. Todos esses métodos acabam adotando valores fixos para os parâmetros geotécnicos do solo mesmo sabendo que muitos desses parâmetros apresentam grande dispersão.

Ao adotar um método probabilístico que leve em conta a variabilidade dos parâmetros do solo é possível construir uma distribuição do fator de segurança. Com a distribuição do fator

de segurança é possível ter uma maior noção dos riscos associados ao deslizamento desse talude e pode-se tomar decisões baseadas na probabilidade de o talude em estudo romper.

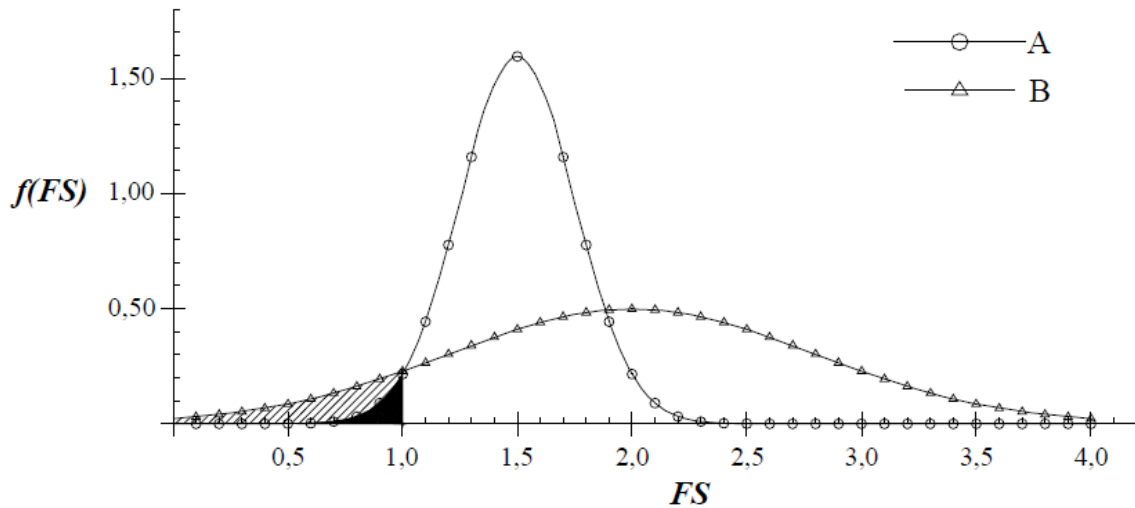


Figura 4.1: Comparação entre duas distribuições do F.S distintas (MAIA, 2003)

Na Figura 4.1 é apresentado duas distribuições do fator de segurança. A distribuição A apresenta um fator de segurança de 1,5 e desvio padrão de 0,25 enquanto o B apresenta um fator de segurança igual a 2 e desvio padrão de 0,80. Analisando ambos os fatores de segurança deterministicamente, cria-se a falsa sensação de que o talude B apresenta um menor risco de romper. Porém, caso seja levado em conta o desvio padrão de ambas as distribuições vemos que o talude A apresenta uma probabilidade de ruptura menor que o talude A.

O primeiro grande desafio para adotar uma abordagem probabilística é encontrar a variabilidade dos parâmetros do solo. A variabilidade do solo pode ser descrita como sendo o desvio padrão e segundo Duncan (2000) existem três formas de obter o desvio padrão. A primeira é pelo calculo do desvio padrão a partir de uma amostragem satisfatória, opção que na Engenharia Geotécnica costuma ser inviável devido a dificuldade e onerosidade de obter dados suficientes. Outra opção é a obtenção de valores típicos publicados do coeficiente de variação para diversos parâmetros. A partir do coeficiente de variação pode ser calculado o desvio padrão para a análise probabilística. Ainda pode-se utilizar a regra três-sigma, que parte do princípio de que quase 100% dos valores de variáveis normalmente distribuídas encontram-se afastados em no máximo três desvios padrão da média. Dessa forma, o desvio padrão σ pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$\sigma = \frac{HCV - LCV}{6} \quad (4.1)$$

Onde,

σ = Desvio padrão da média.

HCV = Maior valor assumido pela variável (Highest Conceived Value).

LCV = Menor valor assumido pela variável (Lowest Conceived Value).

Uma vez que se tem os valores médios e o desvio padrão dos parâmetros basta escolher o método probabilístico desejado. Nesse trabalho será apresentado três métodos sendo eles: o método FOSM, o método das estimativas pontuais e o método Monte Carlos.

4.1 MÉTODO FOSM

O método FOSM desenvolvido a partir da expansão de série de Taylor, para a determinação da distribuição probabilística de uma função de com um determinado número de variáveis aleatórias. O método é desenvolvido realizando o truncamento na derivada de primeira ordem da série de Taylor expandida (RIOS, 2015).

$$f(x) = f(\bar{x}) (x - \bar{x}) + \frac{f'(\bar{x})}{2!} (x - \bar{x})^2 + \dots + \frac{f^{N-1}(\bar{x})}{N-1!} (x - \bar{x})^{N-1} + R_N \quad (4.2)$$

Onde,

$f^n(\bar{x})$ = n-ésima derivada avaliado para $x = \bar{x}$.

R_n = resto, que pode ou não ser zero.

$$F(x, y) = F(\bar{x}, \bar{y}) + \frac{\partial F}{\partial x} (x - \bar{x}) + \frac{\partial F}{\partial y} (y - \bar{y}) \quad (4.3)$$

A equação (4.2) mostra a série de Taylor sobre o ponto $x = \bar{x}$ enquanto a equação (4.3) seria a expansão da série de Taylor de uma função com 2 variáveis $F(x,y)$ nos pontos \bar{x} e \bar{y} truncada no termo de primeira ordem.

Sendo F uma função de múltiplas variáveis x_1, x_2, \dots, x_n de valores médios X_1, X_2, \dots, X_n , o seu valor esperado $E[F]$ e sua variância σ_F^2 são calculados através das seguintes equações:

$$E(F) \approx F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.4)$$

$$\sigma_F^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_i} \frac{\partial F}{\partial x_j} \rho_{x_i x_j} \sigma_{x_i} \sigma_j \quad (4.5)$$

Onde,

$\rho_{x_i x_j}$ = coeficiente de correlação entre os parâmetros x_i e x_j .

Caso não haja nenhuma correlação entre as variáveis da função é possível simplificar o cálculo da variância pela seguinte expressão:

$$\sigma_F^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (4.6)$$

Para o caso da análise de estabilidade a função F seria o fator de segurança e os dados de entrada, os quais dependem do método de cálculo do fator de segurança escolhido, seriam as variáveis x_1, x_2, \dots, x_n .

A utilização do método FOSM é bastante utilizado em estudos geotécnicos devido ao fato dele necessitar de uma matemática simples, não necessitando de cálculos auxiliares, mas apenas o conhecimento dos valores dos momentos das distribuições estatísticas das variáveis (MAIA, 2003).

4.2 MÉTODO DAS ESTIMATIVAS PONTUAIS

Muitas vezes, obter o valor das derivadas parciais da função expandida pode se mostrar um trabalho muito complexo. Dessa forma, Emilio Rosenblueth simplificou o problema em seu método das Estimativas Pontuais, substituindo variáveis aleatórias contínuas por variáveis discretas cujas distribuições de probabilidade fornecem momentos de ordem m iguais (RIOS, 2015).

A distribuição de uma variável aleatória X_i é concentrada no intervalo entre o seu valor médio mais o desvio padrão (X_{i+}) e o seu valor médio menos o desvio padrão (X_{i-}). A probabilidade associada a esses pontos é dada por P_+ e P_- , as quais são funções da não simetria da distribuição.

No caso de n variáveis correlacionadas, o método das estimativas pontuais necessita de 2^n valores estimados, sendo elas as combinações de X_{i+} e X_{i-} de cada variável, conforme mostra a Figura 4.2.

Número de Variáveis Aleatórias

		1	2	3	4	...	n	
<i>N ú m e r o d e T e r m o s</i>	2^1	1	-	-	-	-		
		2	+	-	-	-		
	2^2	3	-	+	-	-		
		4	+	+	-	-		
		5	-	-	+	-		
		6	+	-	+	-		
	2^3	7	-	+	+	-		
		8	+	+	+	-		
		9	-	-	-	+		
		10	+	-	-	+		
	2^4	11	-	+	-	+		
		12	+	+	-	+		
		13	-	-	+	+		
		14	+	-	+	+		
			15	-	+	+	+	
			16	+	+	+	+	
		.						
		.						
		.						
		2^n						

Figura 4.2: Combinações das variáveis aleatórias (MAIA, 2003).

Para o caso em estudo nesse projeto temos que, o valor esperado Y elevado à potência m é dado pela equação (4.7) enquanto a variância pode ser obtido pela equação (4.8).

$$E[Y^m] \approx \sum P_i (y_i)^m \quad (4.7)$$

$$Var(Y^m) \approx E[Y^{2m}] - (E[Y^m])^2 = \sum P_i (y_i)^{2m} - \left(\sum P_i (y_i)^m \right)^2 \quad (4.8)$$

Segundo Rios (2015), O método das estimativas pontuais é prático e acurado para muitos problemas práticos da Geotecnia mas deve-se evitar o uso do método quando as variáveis analisadas apresentam alto coeficiente de variação. A Figura 4.3 ilustra o funcionamento do método das estimativas pontuais.

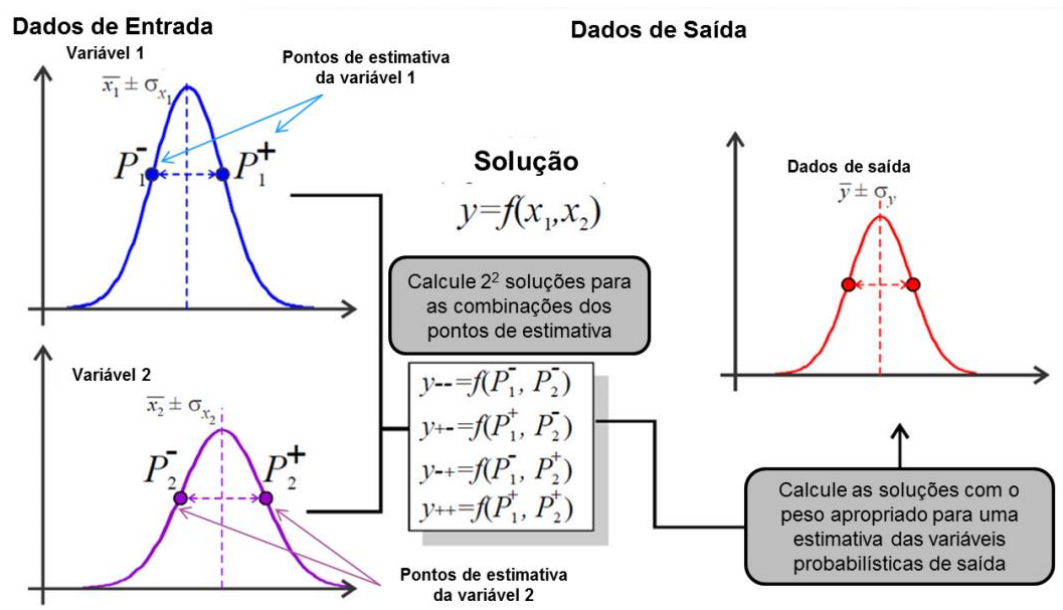


Figura 4.3: Metodologia Esquemática para Aplicação do MET (modificado de Rocscience, 2013).

4.3 MÉTODO MONTE CARLO

O método Monte Carlo se diferencia dos outros métodos por gerar uma grande amostragem de parâmetros a partir do sorteio aleatório dos valores de cada um dos seus parâmetros, de modo que a partir disso o método possa acabar gerando uma amostra da função desejada.

Sendo uma função F das variáveis x_1, x_2, \dots, x_n de distribuição de probabilidade, média e desvio padrão conhecidos, realiza-se o sorteio do valor das n variáveis e calcula-se o valor de

F. Com o sorteio e o cálculo repetido inúmeras vezes cria-se uma boa amostra dos valores da função F. Para o caso em questão, uma vez tendo uma amostra significativa do fator de segurança, bastaria achar a porcentagem dos valores que se encontram abaixo de 1 (RIOS, 2015).

O método Monte Carlo é prático e facilmente programável em computador e é uma proposta interessante por não requerer que seja estipulada uma distribuição de probabilidade para a função F analisada. Ele apresenta a desvantagem de uma convergência lenta, de modo que costumam ser necessárias muitas amostras para uma representação confiável da realidade (RIOS, 2015).

5 ESTUDO DE CASO

A barragem Pedra do Cavalo, alvo de estudo nesse trabalho, fica localizada no interior da Bahia e ela é considerada uma barragem de uso múltiplo da água, sendo os usos mais importantes:

- Suprimento de água para as a região metropolitana de Salvador e para a Feira Santana.
- Irrigação das regiões próximas à Cruz das Almas e Santo Estevão.
- Geração de energia.
- Controle de inundação.

O projeto da barragem Pedra do Cavalo foi desenvolvido pela CNEC, Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores, fiscalizado pela Companhia de Desenvolvimento do Vale do Paraguaçu (DEVENVALE) e construído pela Noberto Odebrecht. A obra foi concluída em 1985.

A barragem fica localizada no rio Paraguaçu a 40 km da sua nascente. Ela também se encontra a uma distância de 4 km das cidades históricas de Cachoeirinha e São Felix e 110 km de Salvador. O eixo da barragem se encontra nas coordenadas: Latitude 12° 36' S Longitude 39° 01' W. A barragem de Pedra do Cavalo pode ser acessada pela rodovia BR-101.



Figura 5.1: Barragem Pedra do Cavalo

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM

O Barramento principal é formado por uma barragem de enrocamento com núcleo de argila compactada assentada sobre rocha sã. Sua crista está localizada a uma altura de 125,73 metros e a barragem se estende por 470 m. Além do barramento principal tem-se dois diques de solo sendo o primeiro com uma altura de 26,5 m e um comprimento de 435 m fechando uma cela topográfica localizada ao lado esquerdo do barramento e o segundo dique com 20 m de altura e 200 m de comprimento fechando a cela topográfica por onde a rodovia BR-101 costumava passar.

A tomada d'água foi construída entre o barramento principal e o vertedouro sendo que ele é equipado com quatro aberturas com tela e controlado por comportas. De cada uma dessas entradas nasce um túnel escavado em rocha os quais levam para a casa de força localizada logo abaixo da tomada d'água.

Segundo o CBDB (2000) o volume do reservatório é de $266 \times 10^6 m^3$ e uma cota normal de 120, podendo alcançar os 124,0 m. O vertedouro da barragem foi projetado para dar vazão a $12.000 m^3/s$, valor correspondente a vazão de 10.000 anos.

5.2 SEÇÃO DE ESTUDO DA BARRAGEM

Foi escolhido para esse estudo a seção padrão do barramento principal da UHE Pedra do Cavalo, conforme mostrado na Figura 5.2.

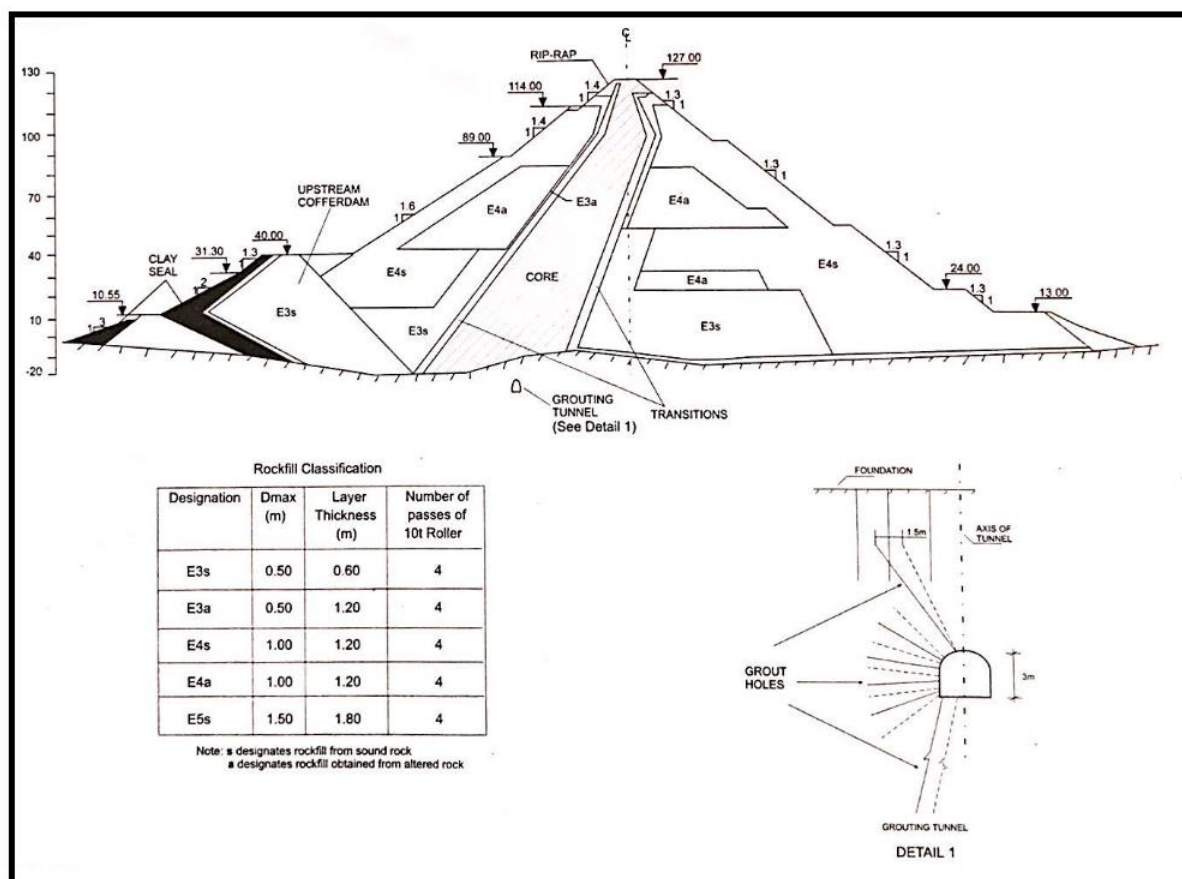


Figura 5.2:Seção da Barragem (CBDB, 2000).

Como se pode ver na imagem, o barramento principal é composto por uma barragem de enrocamento com um núcleo argiloso inclinado. A montante da barragem foi projetado um rip-rap com 3 metros de espessura que começa na elevação 89 m. Para fazer a transição entre o núcleo argiloso e o enrocamento foram usados entre 3 e 4 camadas de transições.

O núcleo é composto por uma argila arenosa com as propriedades apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Propriedades da argila compacta (CBDB, 2000).

Propriedade	Valor
Peso específico unitário (compacto) (kN/m ³)	20,9
Densidade relativa dos grãos	2,67
Máxima densidade seca (t/m ³)	1,87
Límite de liquidez (%)	38,1
Índice de plasticidade	17,5
Umidade Ótima (%)	14,6

O enrocamento foi construído com o material obtido pelas escavações em rocha e apresenta um diâmetro que varia de 0,5 a 1,5 m. As camadas de enrocamento foram compactadas por 4 passadas de um rolo vibrador de 10 t. O peso específico máximo obtido por ensaios em campo foi de 21,0 kN/m³.

Mais uma vez deve ser reiterado que as análises doravante não constituem uma aplicação fidedigna da barragem, mas sim um estudo acadêmico, onde suas hipóteses e limitações podem diferir do caso real.

5.3 CÁLCULO DE RISCO PELO MÉTODO QUALITATIVO

Nesse capítulo será calculado o risco de acordo com a metodologia de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado proposto na lei 12.334 de 2010.

A Característica Técnica pode ser calculada analisando as características técnicas da barragem. Por sua vez, para o cálculo do Estado de Conservação e o Plano de Segurança foi apenas possível graças as informações obtidas da Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia (CERB). Os valores podem ser vistos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Valor calculado do CR e suas componentes.

Característica Técnica	11
Estado de Conservação	01
Plano de Segurança	00
Categoria de Risco	12

O cálculo do Dano Potencial Associado envolve analisar as áreas atingidas caso haja uma ruptura da barragem. Devido ao fato da cidade de cachoeirinha estar localizado nas margens do rio gravatal a 4 quilômetros a jusante da barragem e o volume de água ser muito grande o potencial de perdas de vidas humanas, o impacto ambiental e o impacto socioeconômico são muito alto. No caso o valor do DPA calculado foi de 23 o que seria um valor bastante elevado.

Analisando os valores de CR e DPA é possível ver que a barragem apresenta uma boa segurança e manutenção, tendo sido ela projetada seguindo critérios muito rígidos de projeto, porém, caso haja uma ruptura, as suas consequências serão enormes uma vez que a cidade de cachoeirinha será impactada pela mancha de inundação. Seguindo a matriz de risco proposto na Resolução nº 91/2012 da ANA temos que o risco é de classe A, mesmo com CR sendo baixo.

Por fim a barragem pedra do cavalo precisa preencher os volumes I, II, III, IV e V e ter uma periodicidade de revisão de no máximo 5 anos.

5.4 CALCULO DA SUSCEPTIBILIDADE

A susceptibilidade de uma barragem pode ser definida como sendo a probabilidade de ruptura da barragem em um determinado cenário. No caso em estudo estaremos calculando a susceptibilidade da barragem Pedra do Cavalo para dois cenários distintos. O primeiro será o cálculo da susceptibilidade com o reservatório no nível d'água máximo maximorum enquanto o segundo cenário será com o reservatório no nível d'água normal.

Para simplificar o cálculo trabalharemos com uma análise 2D da seção da barragem com algumas simplificações. A primeira simplificação foi tornar a altura da fundação constante ao longo da seção, essa simplificação foi adotada uma vez que a fundação é em rocha sã e se espera

que a ruptura não passe próxima do contato barragem-fundação. A segunda simplificação foi a retirada das transições para a modelagem da barragem. Uma vez que as transições têm como principal função servir como transição e não de trabalhar a estabilidade da barragem acredita-se que a retirada delas não altere muito a estabilidade da barragem. Dessa forma a seção de estudo foi modelado conforme a Figura 5.3.

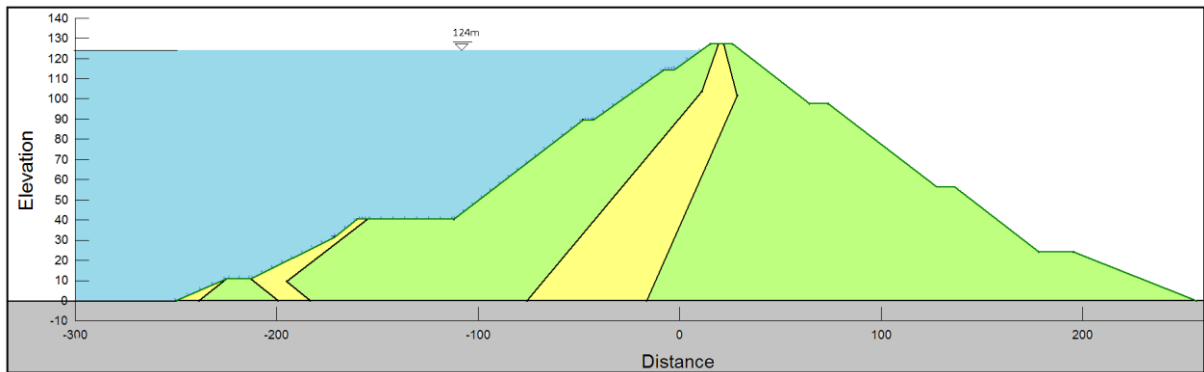


Figura 5.3: Seção da barragem modelada no GeoStudio.

5.4.1 SUSCEPTIBILIDADE DO PRIMEIRO CENÁRIO

Antes de começar a fazer qualquer análise de estabilidade de taludes é necessário primeiro estabelecer a rede de fluxo dentro do corpo da barragem.

No caso em estudo a análise 2D de fluxo permanente foi realizado utilizando o programa SLEEP/W da GeoStudio. Como dito anteriormente foi adotado o nível d'água como sendo o máximo maximum, 124 m. Os valores da permeabilidade foram assumidos como constantes em cada uma das regiões e devido ao fato de não termos nenhum resultado dos ensaios de permeabilidade dos materiais que compõe cada uma das regiões da barragem adotados valores aceitos na literatura.

Tabela 5.3: Valores de permeabilidade adotados.

Material	Permeabilidade (m/s)
Núcleo (Argila arenosa)	10^{-9}
Enrocamento	10^{-3}
Fundação (rocha sã)	10^{-11}

Uma vez que os parâmetros e a condição de contorno, nível d'água a montante e jusante, foram estabelecidos foi obtido a distribuição de poropressões conforme mostra a Figura 5.4. As poropressões apresentam-se em kPa e vale a pena observar que a perda de carga ocorreu praticamente toda no núcleo da barragem, onde se encontra a menor permeabilidade da estrutura. Outro fator a se observar é que o nível freático permanece praticamente constante até atingir o núcleo da barragem, e que dentro do núcleo ele sofre uma queda brusca.

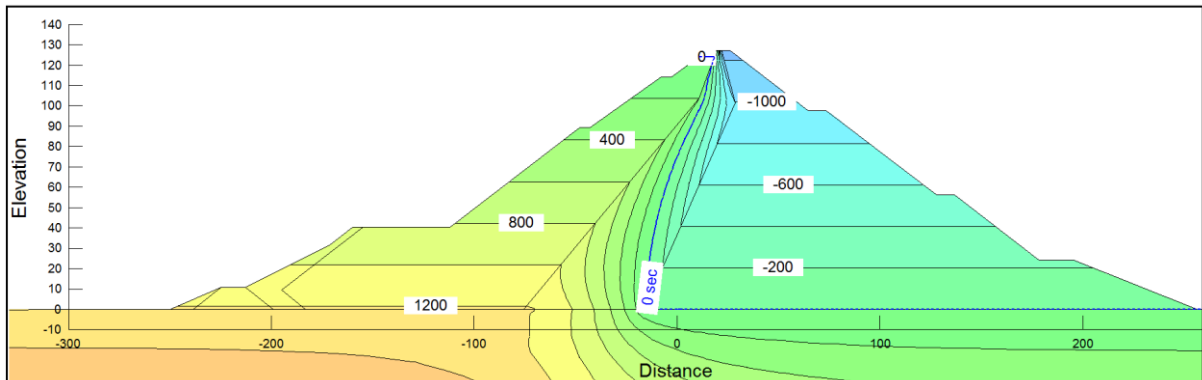


Figura 5.4: Poropressões no interior da barragem, em kPa.

Utilizando as linhas de fluxo como parâmetro de entrada para o SLOPE/W é possível fazer a análise de estabilidade. Para essa análise foi escolhido o método de Morgenstern-Price, o qual necessita de uma superfície de ruptura circular definida, as poropressões das fatias dessa superfície de ruptura e os parâmetros de resistência do solo.

No caso da superfície de ruptura o programa SLOPE/W trabalha com uma malha de raios e uma malha de centros. Ao se definir o tamanho da sua malha de centros e da malha de raios o SLOPE/W criará um círculo de ruptura que se iniciará em cada um dos pontos da malha de centro e tangenciará cada uma das retas criadas na malha de raio. Cada uma dessas combinações criará um círculo de ruptura e o programa calculará o seu respectivo fator de segurança. Uma vez tendo calculado o fator de segurança para todas as combinações de centro e raio o programa pegará aquela que tiver o menor valor de fator de segurança e elegerá ela para ser o círculo de ruptura crítico.

Os parâmetros de resistência necessários no programa são a coesão do solo e o ângulo de atrito. Apesar de não ser um parâmetro de resistência também é necessário entrar com o peso específico do solo. Como não tínhamos os reais valores da coesão e ângulo de atrito foi

necessário estimar valores usando como base as características de cada um dos materiais e valores base encontrados na literatura.

Tabela 5.4: Parametros adotados na análise de estabilidade de talude.

Material	Coesão	Ângulo de Atrito	Peso Específico
Núcleo	20	26	20
Enrocamento	0	45	21

Entrando com todos esses parâmetros obtivemos um FS igual a 1,63. A superfície de ruptura pode ser vista na Figura 5.5.

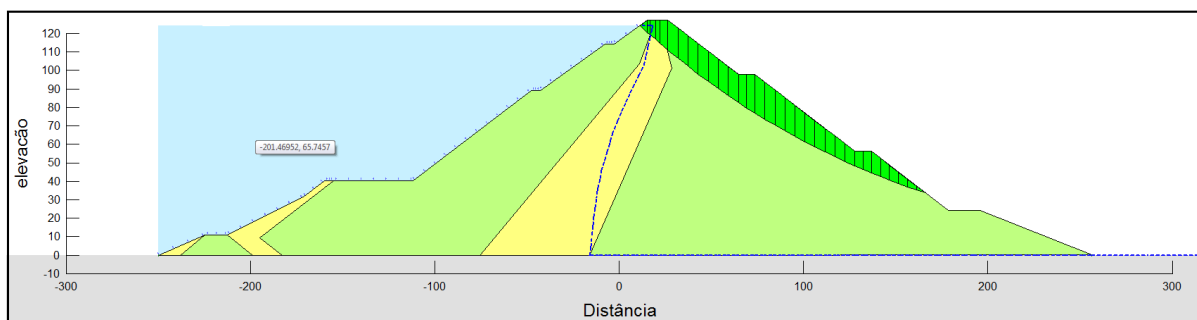


Figura 5.5: Superfície de Ruptura.

Para o cálculo da probabilidade de ruptura foi utilizado o método das estimativas pontuais. Como a barragem tem dois materiais e cada um dele apresenta três parâmetros a serem variados o número de combinações a serem feitas será de 64. Uma forma de diminuir esse número de combinações é verificar quais parâmetros geram uma maior variação do fator de segurança ao sofrerem uma variação.

A forma encontrada de determinar quais parâmetros serão mais relevantes para a análise probabilística foi utilizar o método FOSM e olhar quais parâmetros contribuem mais com o desvio padrão obtido nesse método.

Ambos os métodos a serem utilizados necessitam do desvio padrão dos parâmetros utilizados na análise, para tanto é necessário a realização de uma grande quantidade de ensaios desses parâmetros a fim de criar uma amostra representativa. Não tendo uma amostra dos

parâmetros representativa foi utilizado valores do coeficiente de variação obtidos da literatura e a partir dele calcular o desvio padrão conforme a equação (5.1).

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5.1)$$

Tabela 5.5: Coeficientes de variação adotados, (Baecher e Christian,2010).

Parâmetro	CV (%)	CV utilizado (%)
Peso específico (γ)	1% - 10%	5%
Coesão (argila)	20% - 50%	30%
Coesão (areia)	25% - 30%	30%
Ângulo de Atrito Φ (argila)	12% - 56%	15%
Ângulo de Atrito Φ (areia)	5% - 15%	10%

Para o coeficiente de variação do ângulo de atrito do enrocamento foi adotado o coeficiente de variação do ângulo de atrito apresentado para a areia uma vez que não foi encontrado o valor específico para o enrocamento.

Tabela 5.6: Média e desvio Padrão dos parâmetros.

Material	Parâmetro	Média	Desvio Padrão
Enrocamento	Peso específico	21	1,05
	Coesão	0	0
	Ângulo de Atrito	45	4,50
Argila	Peso específico	20	1,00
	Coesão	20	6,00
	Ângulo de Atrito	26	3,90

Como visto na equação (4.6), para o cálculo da variância é necessário calcular a derivada do fator de segurança em relação a todos os parâmetros. Devido à complexidade da equação do fator de segurança, a derivada, ao invés de ser calculada analiticamente, será aproximada pela

taxa média de variação do FS em relação ao parâmetro. Para isso deve-se modificar manualmente os parâmetros, um por um, no SLOPE/W e para cada um deles calcular o novo fator de segurança. Foi escolhido uma variação de +2% e -2% em relação ao valor inicial do parâmetro de forma que a inclinação da reta secante a esses pontos se aproxime da reta tangente ao ponto de estudo. A equação (5.2) apresenta o cálculo da derivada parcial do fator de segurança com relação ao parâmetro 'x' enquanto a equação (5.3) seria a aproximação dessa derivada utilizando a taxa média de variação no intervalo (1,02x ; 0,98x).

$$\frac{dFS(x)}{dx} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Delta FS}{\Delta x} \quad (5.2)$$

$$\frac{dFS(x)}{dx} \approx \frac{FS(1,02x) - FS(0,98x)}{(1,02x) - (0,98x)} \quad (5.3)$$

Tabela 5.7: Derivadas do Fator de Segurança em relação aos parâmetros.

Material	Parâmetro	Valor	FS	dFS(x)/dx
Enrocamento	Peso específico	21,42	1,63553	0,0019
		20,58	1,63396	
	Ângulo de atrito	45,9	1,68505	0,0553
		44,1	1,58555	
Argila	Peso específico	20,4	1,63387	-0,0022
		19,6	1,63565	
	Ângulo de atrito	26,52	1,63586	0,0021
		25,48	1,63366	
	Coesão	20,4	1,63499	0,00057
		19,6	1,63453	

Utilizando tais valores de derivadas parciais apresentados na Tabela 5.7 mais o desvio padrão dos parâmetros mostrados na Tabela 5.4 foi encontrado o valor de 0,25 para o desvio padrão do fator de segurança. Considerando a distribuição do fator de segurança como sendo uma distribuição normal a probabilidade de ruptura anual é igual a 0,54%.

Como o desvio padrão calculado pelo método FOSM é um somatório da contribuição de cada parâmetro é fácil calcular contribuição individual de cada um dos parâmetros. Essa contribuição é apresentada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Contribuição dos parâmetros no cálculo do desvio padrão.

Material	Parâmetro	Contribuição do parâmetro
Enrocamento	Peso específico	0,00006%
	Ângulo de atrito	99,986%
Argila	Peso específico	0,00008%
	Ângulo de atrito	0,0011%
	Coesão	0,0002%

Tendo a contribuição de cada um dos parâmetros para o desvio padrão fica nítido que o ângulo de atrito do enrocamento e o ângulo de atrito da argila foram os maiores responsáveis pela variância do fator de segurança. Dessa forma, considerando apenas a variação do ângulo de atrito do enrocamento e a variação do ângulo de atrito da argila, o método das estimativas pontuais passa a trabalhar com apenas quatro combinações ao invés das 64 combinações inicialmente necessárias.

Os valores dos novos parâmetros acrescidos e decrescidos dos seus próprios desvios padrões são apresentados na Tabela 5.9. Eles serão combinados conforme mostra a Figura 4.2. O resultado do fator de segurança para cada combinação é mostrado na Tabela 5.10.

Tabela 5.9: Parâmetros acrescidos/decrescidos do seu desvio padrão.

Enrocamento		Argila	
$\Phi_e + \sigma$	$\Phi_e - \sigma$	$\Phi_a + \sigma$	$\Phi_a - \sigma$
49,5	40,5	29,9	21,1

Tabela 5.10: Fatores de Segurança das combinações.

Combinação	Parâmetros	FS
Combinação 1	$\Phi_e + \sigma$	1,91314
	$\Phi_a + \sigma$	
Combinação 2	$\Phi_e + \sigma$	1,89193
	$\Phi_a - \sigma$	

Combinação 3	$\Phi_e - \sigma$ $\Phi_a + \sigma$	1,41046
Combinação 4	$\Phi_e - \sigma$ $\Phi_a - \sigma$	1,39693

Uma vez que não há correlação entre os parâmetros, o cálculo da média e da variância serão obtidos utilizando as equações (4.7) e (4.8) respectivamente. Foi obtido como média um fator de segurança igual a 1,65 e um desvio padrão igual a 0,25.

Considerando que a distribuição do fator de segurança seja uma distribuição normal, a probabilidade de ruptura anual dado que o reservatório se encontre no nível máximo maximorum é de 0,44%.

Para finalizar o cálculo da susceptibilidade nesse primeiro cenário será necessário ainda calcular a probabilidade de ocorrência do nível do reservatório atingir o nível máximo maximorum. Segundo a (ELETBRÁS, 2003) o nível de máxima enchente no reservatório (nível máximo maximorum) é o resultado da propagação da cheia de projeto da barragem. Para a barragem de Pedra do cavalo essa cheia tem um tempo de recorrência igual a 10.000 anos. Uma vez que, o tempo de recorrência é igual ao inverso da probabilidade de ocorrência do evento, temos que a probabilidade de o nível do reservatório atingir o nível máximo maximorum é de 10^{-4} .

Sendo assim, a susceptibilidade da barragem à instabilidade de taludes para o cenário do reservatório no nível d'água máximo maximorum é de $4,4 \times 10^{-7}$.

5.4.2 SUSCEPTIBILIDADE DO SEGUNDO CENÁRIO

A metodologia de cálculo da susceptibilidade para o segundo cenário será a mesma. As grandes diferenças entre os dois cálculos serão o dado de entrada da carga hidráulica a montante da barragem ao se fazer a análise de percolação pelo SEEP/W, que nesse novo cenário terá uma carga de 120 m, e a probabilidade do nível d'água se encontrar no seu nível normal de operação.

Como os parâmetros geotécnicos continuam o mesmo basta alterar a carga hidráulica para 120 m para encontrar a distribuição de poropressão e a nova superfície de ruptura conforme mostram as Figura 5.6 e Figura 5.7.

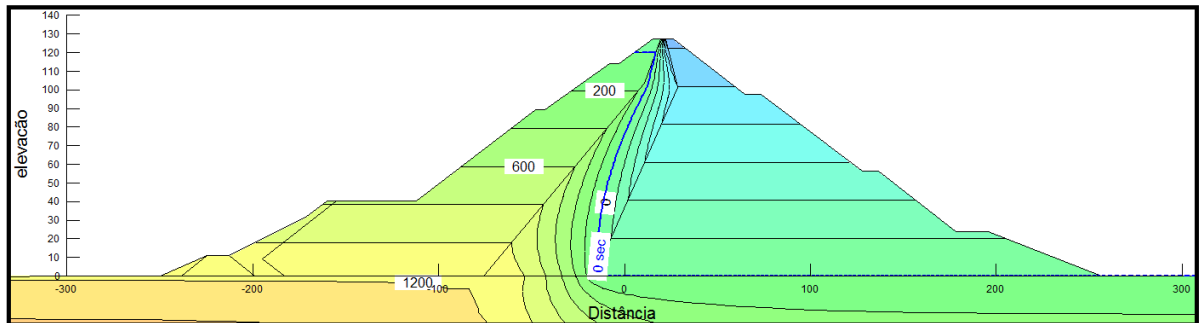


Figura 5.6: Poropressões do cenário 2.

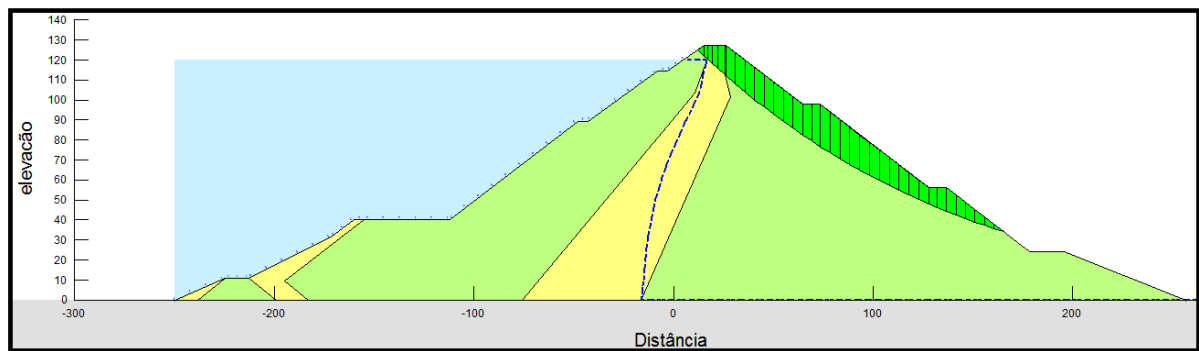


Figura 5.7: Superfície de ruptura do cenário 2.

Para esse novo cenário foi encontrado um fator de segurança igual a 1,64. Comparando os dois cenários já se percebe que não houve grandes alterações devido a variação de 4 m no nível do reservatório, o que por sua vez pode justificar a ínfima alteração no valor do FS. A linha freática sofreu um pequeno deslocamento, porém a cunha de ruptura praticamente não se alterou.

Será adotado a mesma metodologia adotada no cenário 1 para o cálculo da susceptibilidade do cenário 2.

Tabela 5.11: Derivadas parciais do FS, cenário 2.

Material	Parâmetro	Valor	FS	dFS(x)/dx
Enrocamento	Peso específico	21,42	1,64138	0,00196
		20,58	1,64005	
	Ângulo de atrito	45,9	1,69119	0,0553
		44,1	1,59181	
Argila	Peso específico	20,4	1,63983	-0,0022
		19,6	1,64162	
	Ângulo de atrito	26,52	1,64183	0,0021
		25,48	1,63962	
	Coesão	20,4	1,63096	0,00057
		19,6	1,6405	

Tabela 5.12: Contribuição dos parâmetros no cenário 2.

Material	Parâmetro	Contribuição do parâmetro
Enrocamento	Peso específico	0,0045%
	Ângulo de atrito	99,857%
Argila	Peso específico	0,0081%
	Ângulo de atrito	0,11%
	Coesão	0,0193%

O valor da probabilidade de ruptura dada pelo método FOSM foi de 0,5% e da mesma forma que anteriormente os parâmetros que mais contribuíram para a variância do fator de segurança foram o ângulo de atrito do enrocamento e da argila.

Dessa forma as combinações realizadas no método das estimativas pontuais serão desses dois fatores acrescidos ou decrescidos dos seus respectivos desvios padrões.

Tabela 5.13: FS das combinações do cenário 2.

Combinação	Parâmetros	FS
Combinação 1	$\Phi_e + \sigma$	1,91826
	$\Phi_a + \sigma$	

Combinação 2	$\Phi_e + \sigma$ $\Phi_a - \sigma$	1,9027
Combinação 3	$\Phi_e - \sigma$ $\Phi_a + \sigma$	1,41126
Combinação 4	$\Phi_e - \sigma$ $\Phi_a - \sigma$	1,40082

Utilizando o método das estimativas pontuais se encontrou uma probabilidade de ruptura igual a 0,45%. Nesse cenário o reservatório se encontra no seu nível médio então a probabilidade de ocorrência é igual a 1.

Dessa forma a susceptibilidade anual da barragem para o reservatório se encontrando no seu nível médio é de 0,45%.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Percebe-se que a análise de risco proposta pela Lei nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010, é uma forma prática de ter um maior controle e debate sobre os riscos impostos pelas barragens em todo o território nacional.

A metodologia de cálculo do risco utilizando a categoria de risco e o dano potencial associado é de rápida execução e os poucos dados técnicos para o seu cálculo são relativamente fáceis de serem obtidos. O maior problema desta metodologia de análise de risco se encontra no fato dela não conseguir fornecer uma estimativa precisa dos reais valores de susceptibilidade e consequência, além do fato dela não diferenciar quais são os modos de falhas e carregamentos críticos da barragem em estudo.

Com relação a matriz de risco adotada pela Agência Nacional de Águas (ANA) e as suas respectivas imposições, nota-se que a única diferença entre os tratamentos dos riscos das classes “B” a “E” seria com relação a periodicidade das vistorias, e que apenas os riscos classificados como “A” necessitam apresentar o PAE. Essa baixa diferenciação no tratamento do risco evidencia a baixa capacidade de se utilizar os resultados obtidos nessa análise de risco para se tomar decisões gerenciais quanto ao tratamento do risco.

Por fim, considerando que a Lei nº 12.334/2010 precisa apresentar uma metodologia aplicável em todo o território nacional e oferecer uma estimativa das condições das barragens nacionais, a metodologia proposta por esse normativo mostra-se bastante útil e de acordo com os princípios da gestão de risco.

Com relação ao cálculo da susceptibilidade da barragem com o reservatório no nível máximo maximorum e com o reservatório no nível médio, os valores da probabilidade de ruptura estão muito próximos um do outro, sendo que a diferença do valor da susceptibilidade se deve ao fato do primeiro estar relacionado a um evento extremo e o segundo a um evento cotidiano.

Como o valor da susceptibilidade para o reservatório no nível médio foi maior, esse cenário seria considerado o mais crítico. A susceptibilidade calculada ($4,5 \times 10^{-3}$) apresenta-se extremamente alta para os padrões atuais de segurança. Muitos órgãos reguladores, tanto nacionais quanto internacionais, estabelecem uma susceptibilidade limite na ordem de independente das consequências e, no caso em questão, a cidade de cachoeirinha se encontra a jusante da barragem, muito provavelmente dentro da sua mancha de inundação. Sendo assim, a barragem em estudo terá de ser reforçada, afim de aumentar o valor da sua susceptibilidade. É importante ressaltar que a barragem em estudo foi baseada na Barragem de Pedra do Cavalo, mas o valor da susceptibilidade calculado nesse trabalho não representa a susceptibilidade da real Barragem Pedra do Cavalo.

6.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Algumas sugestões para futuros trabalhos complementarem o que foi desenvolvido nessa monografia:

- a) Realização de uma análise da susceptibilidade da barragem ao piping utilizando a análise por árvore de falhas;
- b) Realização de uma análise da susceptibilidade da barragem ao galgamento utilizando a análise por árvore de eventos;
- c) Realização de um estudo de Dam Break, junto com a quantificação das consequências; e

- d) Análise da eficiência das principais medidas de tratamento de risco, tanto as que focam em diminuir a susceptibilidade quanto as que focam em reduzir as consequências da ruptura.

BIBLIOGRAFIA

- ABNT, 2009. NBR ISO: 31000. s.l.:s.n.*
- Almeida, A. B., 2001. Emergência e gestão de risco. Lisboa: INAG.*
- ANA, 2012. Resolução N° 91, 02 de abril de 2012. s.l., s.n.*
- ANA, 2016. RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS 2015, Brasília: s.n.*
- Anderáos, A., Araujo, L. M. d. & Nunes, C. M., 2013. CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGEM QUANTO À CATEGORIA DE RISCO E AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - UM EXERCÍCIO. Bento Gonçalves, XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.*
- Assis, A. P., 2003. Apostila de Barragens. Notas de Aula da Dicipina de Barragens. Brasília: s.n.*
- Carvalho, D., 2011. Apostila de Barragens, uma introdução para graduandos. Campinas: s.n.*
- CBDB, 2000. Main Brazilia Dams Design, Construction and Performance. s.l.:s.n.*
- CBDB, 2001. Guia Básico de Segurança de Barragens. São Paulo: s.n.*
- CBDB, 2011. A história das barragens no Brásil, Séculos XIX, XX e XXI. Rio de Janeiro: Corrado Piasentin.*
- CNPGB, G. d. T. d. A. d. R. e. B. d. P., 2005. 1º Relatório de Progresso. Lisboa, s.n.*
- CNRH, C. N. d. R. H., 2012. Resolução N° 143, de 10 de julho de 2012, Brasilia: D.O.U.*
- Costa, W. D., 2012. Geologia de Barragens. São Paulo: Oficina de Textos.*
- Cruz, P. T., 1996. 100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, materiais de construção, projeto.. São Paulo(SP.): Oficina de textos.*
- Duncan, J., 2000. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p. 10p.*
- ELETOBRÁS, 2003. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. s.l.:s.n.*

Espósito, T., Naghettini, M., Ladeira, J. & Caldeira, L., 2010. ANÁLISE POR ÁRVORE DE EVENTOS: FERRAMENTA PARA GESTÃO DE RISCO EM BARRAGENS DE TERRA. GEOTECNIA Revista Luso-Brasileira de Geotecnia N°120, 10 Novembro, pp. 3-24.

ICOLD, 1995. Dam failures statistical analysis, Paris: s.n.

ICOLD, 2005. Risk assessment in dam safety management: a reconnaissance of benefits, methods and current applications, Paris: s.n.

Jesus, R. D., 2011. Optimização da Forma Estrutural de uma Barragem, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

MAIA, J., 2003. Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha, s.l.: Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

Marques, J. L. S. & Carvalho, R. R. d., 2013. Critérios de Projeto de Barragens de Concreto à Gravidade: Uma Visão de Sustentabilidade, Curitiba: UFPR.

Melo, A. V. d., 2014. ANÁLISES DE RISCO APLICADAS A BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO: ESTUDO DE CASO DE BARRAGENS DA CEMIG GT, Belo Horizonte: UFMG.

Nacional., B. C., 2010. LEI N° 12.334, DE 20 DE SETEMBRO DE 2010., Brasília, DF: Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil.

Perini, D. S., 2009. Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra, Brasília: s.n.

Pimenta, M. d. L. B., 2009. Abordagens de riscos em barragens de aterro, Lisboa: LNEC.

RIOS, A., 2015. Análise Probabilística Aplicada em Barragem de Enrocamento com Núcleo de Argila, s.l.: Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 43 p..

Silveira, J. F. A. & A. Machado, J. A. d., 2005. CONSTRUÇÃO DAS ÁRVORES DE EVENTOS E ANÁLISE DE RISCO DA BARRAGEM JOÃO LEITE DA SANEAGO. Goiânia: XXVI Seminário nacional de grandes barragens.

USACE, 2014. Using HEC-HAS for Dam Break Studies, Davis : s.n.

USACE, U. A. C. o. E., 1995. Gravity Dam Design. s.l.:s.n.

USBR, (. S. B. o. R., 1987. Design of Small Dams. Denver: s.n.

Volkmer, M. V., 2011. Análise de Percolação em Fundações Rochosas e seus Efeitos na Estabilidade de Barragens Tipo Gravidade., Brasília: UnB.

A APÊNDICE

Tabela A.1: Barragens cadastradas por uso principal nas Unidades da Federação (UF) MODIFICADO (ANA, 2016).

ESTADO	Uso Múltiplo da Água	Contenção de Rejeito de Mineração	Geração de Energia Hidrelétrica	Contenção de Resíduos Industriais	Total Geral
AC	15				15
AL	69		1		70
AM	11	14	2		27
AP		10	1		11
BA	333	24	15	3	375
CE	105				105
DF	75		1		76
ES	26		17		43
GO	148	19	32		199
MA	44	2	1	5	52
MG	38	315	136	278	767
MS	368	19	9		396
MT	145	48	54		247
PA	8	69	6		83
PB	457				457
PE	371	1	5		377
PI	36	1	1		38
PR	38	5	38		81
RJ	13	1	26		40
RN	126				126
RO	50	22	20		92
RR			2		2
RS	5575	10	56		5641
SC	7	14	70		91
SS	19	4	1		24
SP	7131	73	80		7284
TO	463	9	13		485
Sem informação			55		55
Total Geral	15671	660	642	286	17259

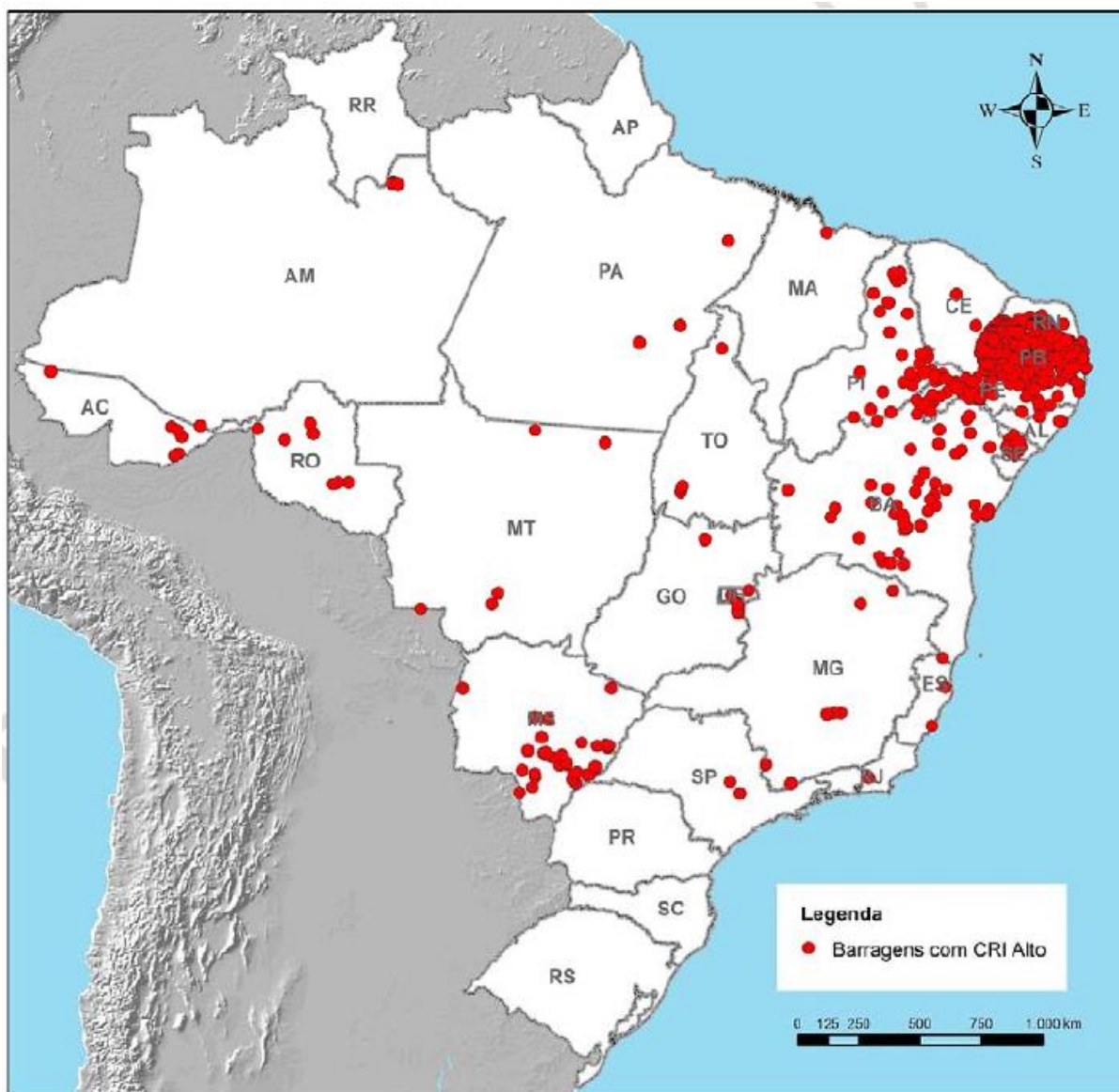


Figura A.1: Barragens com Categoria de Risco (CRI) Alto (*), em 30 de setembro de 2015 (ANA, 2016).

(*) a ausência de barragens com categoria de risco alto em algum Estado em geral significa que não houve classificação de barragens por CRI, não significando que inexistam barragens com CRI alto naquele Estado. No Anexo 5 é informada a quantidade de barragens classificadas de cada um dos órgãos fiscalizadores.

Tabela A.2: Exemplo ilustrativo da aplicação do método HAZOP (CNPGB, 2005).

Sistema principal Barragem (3)
 Sub-sistema Ensecadeira (2)
 Fase Construção (1)

Data: _____
 Folha: _____
 Autor: _____
 Aprovação: _____

Código de identificação	Designação	Grandeza	Desvio (palavra chave)	Causa	Efeitos	Meios			Meios adicionais
						de detecção do desvio	de prevenção do desvio	de mitigação dos efeitos	
3-2-1 (a-b-c) ⁽¹⁾	Ensecadeira	Assentamento	MUITO SUPERIOR (ao valor estimado)	Colapso dos materiais do maciço estabilizador de montante	. Abertura de fendas . Estabelecimento de caminhos de percolação montante/jusante . Erosão interna . Formação de brecha . Liberação de uma onda de cheia para jusante	Marcas de nivelamento para medição dos assentamentos Inspeção visual	Ensaios de caracterização Colocação e compactação dos materiais do maciço estabilizador de montante do lado húmido	Subida expedita do coroamento da ensecadeira Accionamento do Plano de Emergência	Mais do que um meio de comunicação entre a obra e o exterior Sistema de aviso e alerta

(1)-

a - Sistemas principais

- 1 - bacia hidrográfica
- 2 - albufeira
- 3 - barragem
- 4 - vale a jusante

b - Sub-sistemas da barragem

- 1 - galeria de desvio provisório
- 2 - ensecadeira
- 3 - corpo da barragem
- 4 - descarregador de cheias
- 5 - descarga de fundo
- 6 - tomada de água

c - Fase

- 1 - construção
- 2 - 1º enchimento
- 3 - exploração (primeiros 5 anos)
- 4 - exploração (após os primeiros 5 anos)

Tabela A.3: Exemplo ilustrativo da aplicação do método FMEA (CNPGB, 2005).

Código de identificação	Designação	Funcionamento	Modo de falha	Causa (acontecimento iniciador)	Efeitos da falha			Meios			Meios adicionais
					Locais	Noutros sub-sistemas	Terminais	de detecção do modo de falha	de prevenção do modo de falha	de mitigação dos efeitos	
3-1-1 (a-b-c) ⁽¹⁾	Galeria de desvio provisório	Desvio do rio durante a fase de construção. Operação em cheia.	Excedida a capacidade de escoamento da galeria em superfície livre (galeria projectada para funcionar em superfície livre, sem entrar em pressão)	Cheia superior à cheia de projecto	Escoamento em pressão no interior da galeria	Subida do nível da água na albufeira acima dos valores previstos	. Perda de folga . Galgamento da ensecadeira . Onda de cheia no vale a jusante	Medição de caudais na bacia hidrográfica	Consideração de uma folga adequada a operações excepcionais.	Subida expedita do coroamento da ensecadeira	Considerar a possibilidade de executar um descarregador de emergência sobre o corpo da ensecadeira
								Medição do nível da água na albufeira	Subida faseada dos aterros da ensecadeira (acima da cota do coroamento)	Accionamento do Plano de Emergência	Sistema de Aviso e Alerta

a - Sistemas principais

(1) -

- 1 - bacia hidrográfica
- 2 - albufeira
- 3 - barragem
- 4 - vale a jusante

b - Sub-sistemas da barragem

- 1 - galeria de desvio provisório
- 2 - ensecadeira
- 3 - corpo da barragem
- 4 - descarregador de cheias
- 5 - descarga de fundo
- 6 - tomada de água

c - Fase

- 1 - construção
- 2 - 1º enchimento
- 3 - exploração (primeiros 5 anos)
- 4 - exploração (após os primeiros 5 anos)

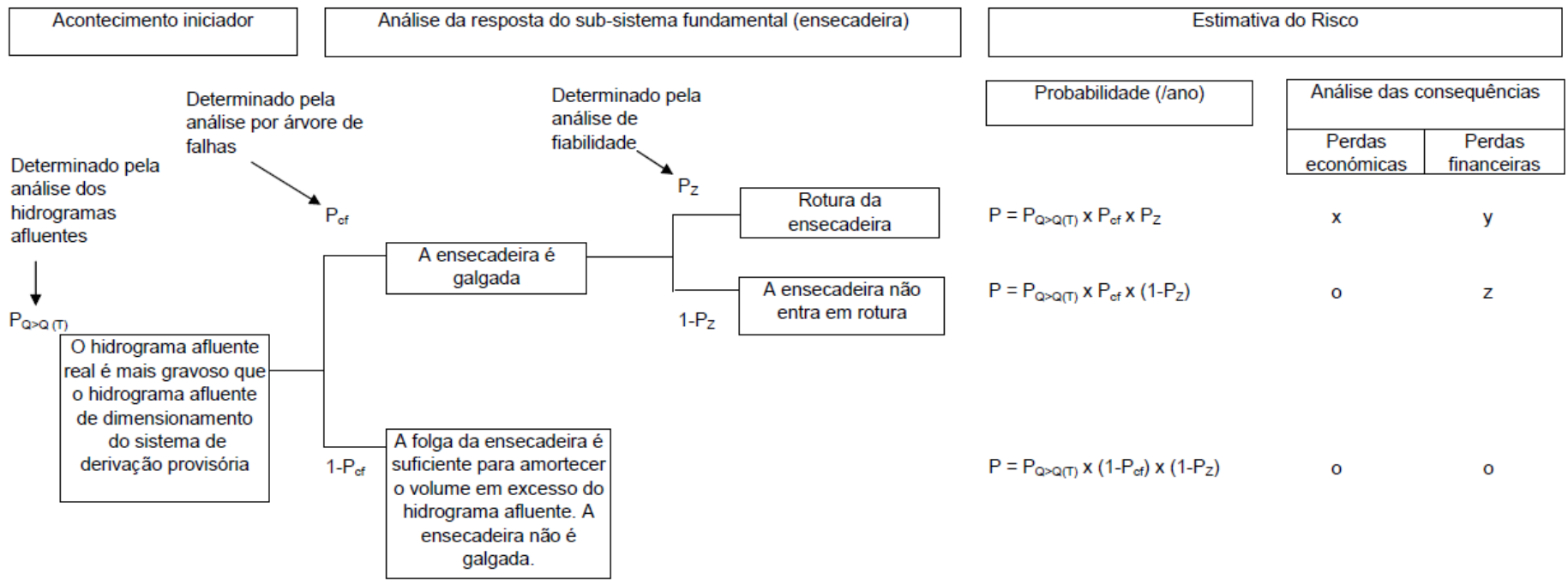


Figura A.2 : Exemplo ilustrativo de aplicação de uma árvore de eventos (CNPGB, 2005).

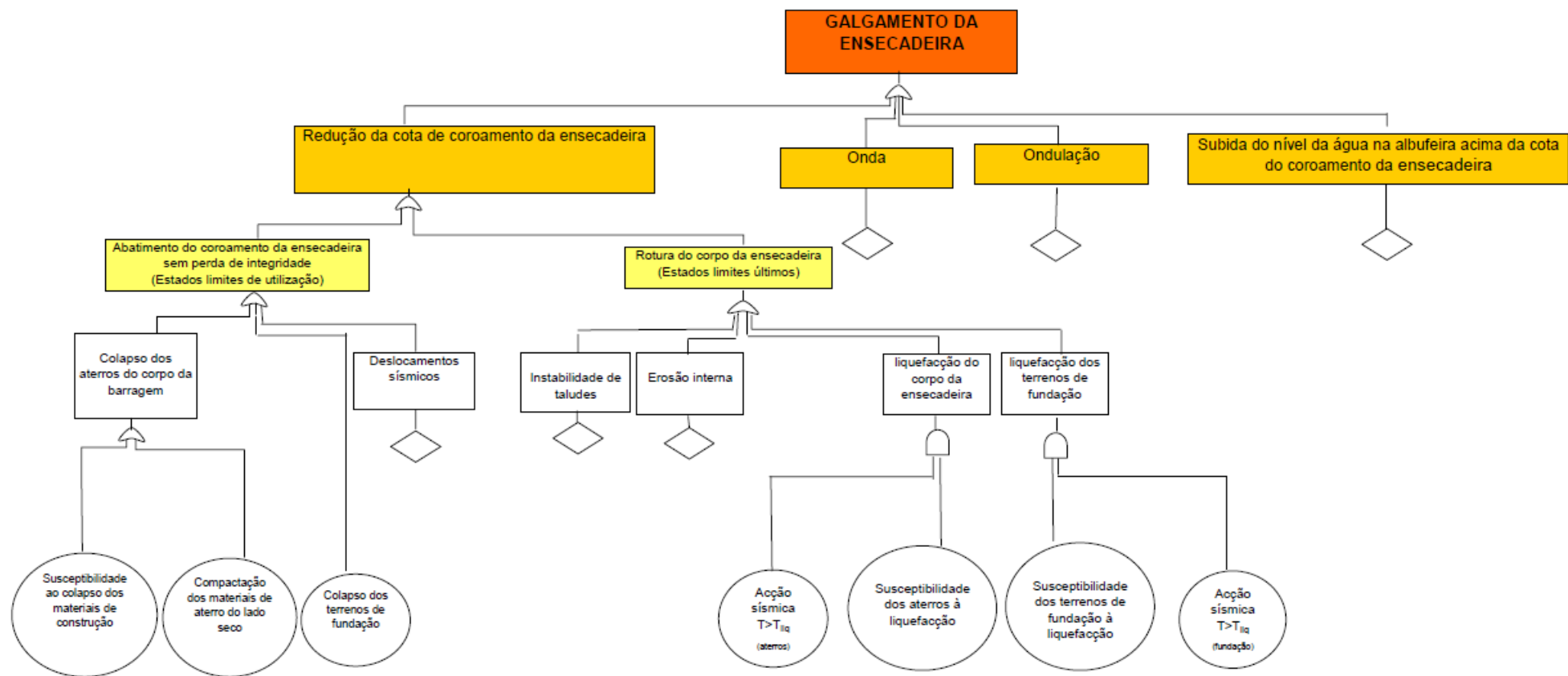





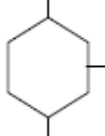






Figura A.3: Exemplo ilustrativo de aplicação de uma árvore de falhas (CNPGB, 2005).

Tabela A.4: Símbolos lógicos utilizados na construção de árvores de falhas (CNPGB, 2005).

SÍMBOLO LÓGICO	DESIGNAÇÃO	OBSERVAÇÕES
	Porta E	O evento de saída ocorre apenas se todos os eventos de entrada ocorrerem
	Porta OU	O evento de saída ocorre se ocorrer pelo menos um dos eventos de entrada
	Porta OU exclusiva	O evento de saída ocorre se um único dos eventos de entrada ocorrer
	Porta E condicional	O evento de saída ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem por ordem, da esquerda para a direita
	Porta m em n	O evento de saída ocorre se m dos n eventos de entrada ocorrerem
	Porta Condicional	O evento de saída é resultado do evento de entrada se o evento condicional ocorrer
	Acontecimento iniciador	Evento elementar com potencial directo ou indirecto para originar a falha em análise
	Evento por desenvolver	Evento cujas causas estão por desenvolver
	Evento	Evento que resulta da associação lógica de outros eventos
	Símbolo de transferência	Evento que resulta de outra árvore de falhas

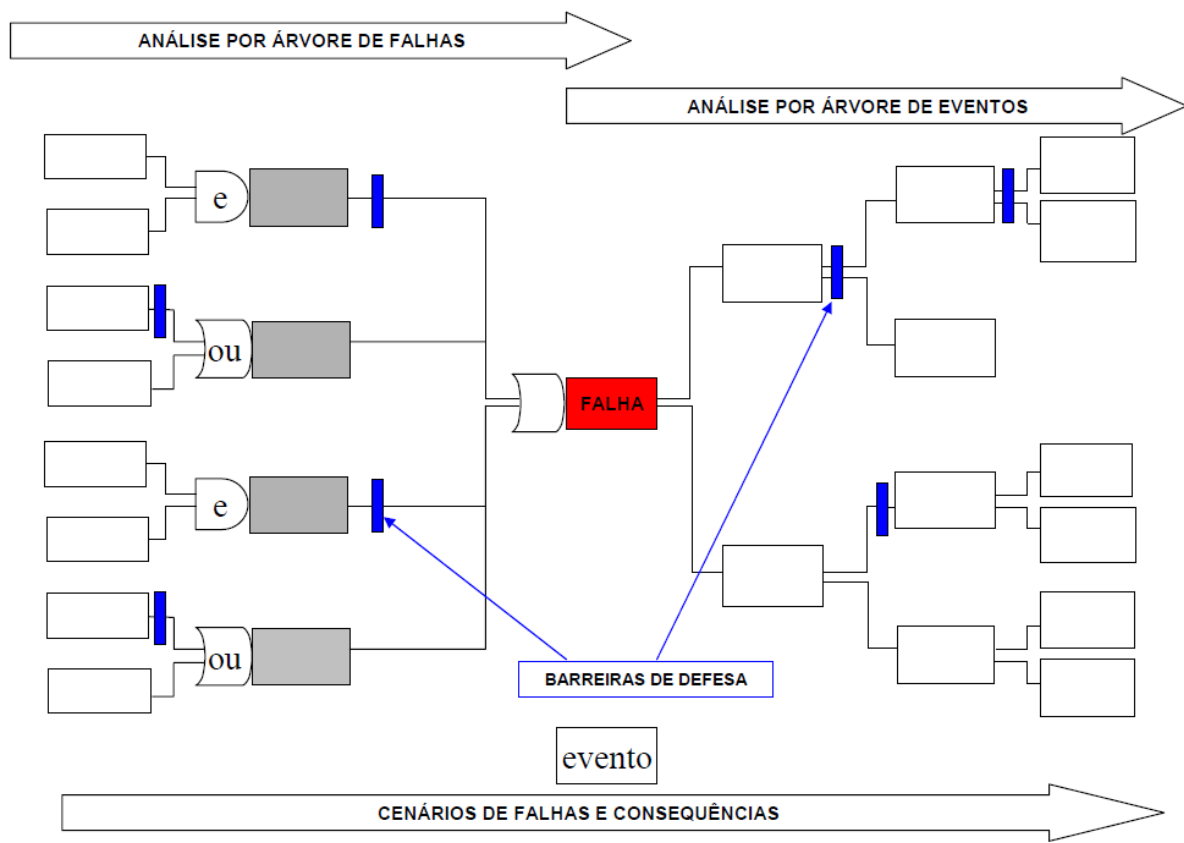


Figura A.4: Representação esquemática do método Nó Borboleta (CNPGB, 2005).

Tabela A.5: Quadro de classificação quanto à categoria de risco-CT ADAPTADO (CNRH, 2012).

ALTURA (H) (a)	COMPRI- MENTO (b)	TIPO DE BARRAGEM QUANTO AO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO (c)	TIPO DE FUNDAÇÃO (d)	IDADE DA BARRAGEM (e)	VAZÃO DE PROJETO (f)
$H \leq 15\text{m}$ (0)	Comprimento $\leq 200\text{m}$ (2)	Concreto convencional (1)	Rocha sã (1)	entre 30 e 50 anos (1)	Decamilar ou CMP (Cheia Máxima Provável) - TR = 10.000 anos (3)
$15\text{m} < H < 30\text{m}$ (1)	Comprimento $> 200\text{m}$ (3)	Alvenaria de pedra / Concreto ciclópico / Concreto rolado-CCR (2)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	entre 10 e 30 anos (2)	Milenar - TR = 1.000 anos (5)
$30\text{m} \leq H \leq 60\text{m}$ (2)	..	Terra homogênea /Enrocamento / Terra enrocamento (3)	Rocha alterada sem tratamento / Rocha alterada fraturada com tratamento (3)	entre 5 e 10 anos (3)	TR = 500 anos (8)
$H > 60\text{m}$ (3)	..	..	Rocha alterada mole / Saprolito / Solo compacto (4)	< 5 anos ou $>$ 50 anos ou sem informação(4)	TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10)
..	..	..	Solo residual / aluvião (5)	..	..

Tabela A.6: Quadro de classificação quanto à categoria de risco-EC ADAPTADO (CNRH, 2012).

CONFIABILIDADE DAS ESTRUTURAS EXTRAVASORAS (g)	CONFIABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE ADUÇÃO (h)	PERCOLAÇÃO (i)	DEFORMAÇÕES E RECALQUES (j)	DETERIORAÇÃO DOS TALUDES / PARAMENTOS (l)	ECLUSA (m)
Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Inexistente (0)	Inexistente (0)	Não possui eclusa (0)
Estruturas civis e eletromecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos à estrutura vertente (4)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e com medidas corretivas em implantação (4)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizada e/ou monitorada (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Estruturas civis e eletromecânicas bem mantidas e funcionando (1)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e com medidas corretivas em implantação / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e sem medidas corretivas (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva (5)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação (2)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e sem medidas corretivas / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas (10)	..	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente (8)	Trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança (8)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e sem medidas corretivas (4)

Tabela A.7: Quadro de classificação quanto à categoria de risco - PS

EXISTÊNCIA DE DOCUMENTAÇÃO DE PROJETO (n)	ESTRUTURA ORGANIZACIONAL E QUALIFICAÇÃO TÉCNICA DOS PROFISSIONAIS DA EQUIPE DE SEGURANÇA DE BARRAGEM (o)	PROCEDIMENTOS DE ROTEIROS DE INSPEÇÕES DE SEGURANÇA E DE MONITORAMENTO (p)	REGRA OPERACIONAL DOS DISPOSITIVOS DE DESCARGA DA BARRAGEM (q)	RELATÓRIOS DE INSPEÇÃO DE SEGURANÇA COM ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO (r)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4)	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3)	Não (6)	Emite os relatórios sem periodicidade (3)
Projeto básico (4)	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8)	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5)	..	Não emite os relatórios (5)
Anteprojeto ou Projeto conceitual (6)	..	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6)	..	..
Inexiste documentação de projeto (8)	..	..	..	..

Tabela A.8: Quadro de classificação quanto ao potencial de dano – DPA
ADAPTADO (CNRH, 2012)

VOLUME TOTAL DO RESERVATÓRIO PARA BARRAGENS DE USO MÚLTIPLO/ APROVEITAMENTO ENERGÉTICO (s)	POTENCIAL DE PERDAS DE VIDAS HUMANAS (t)	IMPACTO AMBIENTAL (u)	IMPACTO SOCIO-ECONÔMICO (v)
PEQUENO < = 5hm ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (quando a área afetada pela barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (quando não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)
MÉDIO 5 a 75hm ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO (quando existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem) (4)
GRANDE 75 a 200hm ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área 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) (8)	..	ALTO (quando existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
MUITO GRANDE > 200hm ³ (5)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, portanto vidas humanas poderão ser atingidas) (12)	..	..

Tabela A.9 Quadro para classificação das barragens de acumulação de água (CNRH, 2012).

NOME DA BARRAGEM:		
NOME DO EMPREENDEDOR:		
DATA:		

II.1 - CATEGORIA DE RISCO:		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		0

Faixas de Classificação	CATEGORIA DE RISCO		CRI
	ALTO		≥ 60 ou $EC^* \geq 8$ (*)
	MÉDIO		35 a 60
	BAIXO		≤ 35

(*) Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

II.2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO:		Pontos	
DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)			
Faixas de Classificação	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		DPA
	ALTO		≥ 16
	MÉDIO		$10 < DPA < 16$
	BAIXO		≤ 10

RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:		
	CATEGORIA DE RISCO	Alto / Médio / Baixo
	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	Alto / Médio / Baixo

Tabela A.10: Estrutura e Conteúdo Mínimo do Plano de Segurança da Barragem

VOLUMES	CONTEUDO MÍNIMO	OBSERVAÇÕES
Volume I – Tomo 1 Informações Gerais e Declaração de Classificação da Barragem quanto ao Risco e Dano Potencial	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificação do Empreendedor; 2. Caracterização do empreendimento; 3. Características técnicas do Projeto e da Construção; 4. Indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes; 5. Estrutura organizacional, contatos dos responsáveis e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem. 6. Quando for o caso, indicação da entidade responsável pela regra operacional do reservatório. 7. Declaração da classificação da barragem quanto à categoria de risco e dano potencial; 8. Formulário constante do Anexo IV preenchido 	
Volume I – Tomo 2 Documentação técnica do Empreendimento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Projetos (básico e/ou executivo) 2. <i>Projeto como construído (As built)</i>; 3. Manuais dos Equipamentos; 4. Licenças ambientais, outorgas e demais requerimentos legais. 	
Volume II Planos e Procedimentos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Plano de operação, incluindo, mas não se limitando, à <ol style="list-style-type: none"> a. regra operacional dos dispositivos de descarga; b. procedimentos para atendimento às regras operacionais definidas pelo Empreendedor ou por entidade responsável, quando for o caso. 2. Planejamento das manutenções; 3. Plano de monitoramento e instrumentação; 4. Planejamento das inspeções de segurança da barragem; e 5. Cronograma de testes de equipamentos hidráulicos, elétricos e mecânicos. 	<ol style="list-style-type: none"> i. Para barragens Classe D e E, somente o item 1 será obrigatório para o Volume II. ii. A frequência mínima de inspeções de segurança regulares de barragens é definida em regulamento específico emitido pela ANA e deverá estar contemplada no Plano de Segurança da Barragem.
Volume III Registros e Controles	<ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de Operação; 2. Registros da Manutenção; 3. Registros de Monitoramento e Instrumentação; 4. Fichas e relatórios de Inspeções de Segurança de Barragens; e 5. Registros dos testes de equipamentos hidráulicos, elétricos e mecânicos. 	O conteúdo mínimo e o nível de detalhamento dos relatórios de inspeções de segurança regulares de barragens são definidos em regulamento específico emitido pela ANA e deverão estar contemplados no Plano de Segurança da Barragem
Volume IV Plano de Ação de Emergência- PAE		O conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência serão tratados em regulamento específico.
Volume V Tomo I Revisão Periódica de Segurança da Barragem	<ol style="list-style-type: none"> 1. Resultado de inspeção detalhada e adequada do local da barragem e de suas estruturas associadas; 2. Reavaliação do projeto existente, de acordo com os critérios de projeto aplicáveis à época da revisão. 3. Reavaliação da categoria de risco e dano potencial associado; 	2. A reavaliação do projeto existente deve englobar, dentre os elementos dispostos abaixo, aqueles que possam ter sofrido alteração desde a revisão periódica anterior, em virtude de alterações de critérios de projeto, de atualização de séries hidrológicas, do resultado da inspeção detalhada ou da ocorrência de eventos

	<ol style="list-style-type: none"> 4. Atualização das séries e estudos hidrológicos e confrontação desses estudos com a capacidade dos dispositivos de descarga existentes. 5. Reavaliação dos procedimentos de operação, manutenção, testes, instrumentação e monitoramento; 6. Reavaliação do Plano de Ação de Emergência-PAE, quando for o caso; 7. Revisão dos relatórios das revisões periódicas de segurança de barragem de anteriores; 8. Relatório Final do estudo. 	<p>extremos:</p> <ol style="list-style-type: none"> i.Registros de construção, para determinar se a barragem foi construída em conformidade com as hipóteses de projeto e verificar a adequabilidade da sua estrutura e dos materiais de fundação. ii.Avaliação da estabilidade e adequação estrutural, resistência à percolação e erosão de todas as partes dos barramentos, incluindo-se suas fundações, bem como quaisquer barreiras naturais sob condições de carregamentos, normais e extremos; iii.Avaliação da capacidade de todos os canais e condutos hidráulicos para descarregar seguramente as vazões de projeto e a adequação desses condutos hidráulicos para suportar a vazão afluente de projeto e de esvaziamento do reservatório, caso necessário, em condições emergenciais; iv.Verificação do projeto de todas as comportas, válvulas, dispositivos de acionamento e controle de fluxo, incluindo-se os controles de fornecimento de energia ou de fluidos hidráulicos para assegurar a operação segura e confiável. v.Avaliação do comportamento da barragem frente a eventos extremos (sismos e cheias), considerando os eventos ocorridos a partir da construção da barragem vi.Verificação da adequação das instalações para enfrentar fenômenos especiais que afetem a segurança, por exemplo, entulhos ou erosão, que podem ter sido insuficientemente avaliados na fase de projeto.
<p>Volume V Tomo 2 Resumo Executivo</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificação da barragem e empreendedor; 2. Identificação do autor do trabalho; 3. Período de realização do trabalho; 4. Listagem dos estudos realizados; 5. Conclusões; 6. Recomendações; 7. Plano de ação de melhoria e cronograma de implantação das ações indicadas no trabalho. 	