

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

**ESTUDO DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DE
RISCOS DE BARRAGENS DE TERRA**

DANIEL SOSTI PERINI

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-180/09

BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2009

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

**ESTUDO DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DE RISCOS
DE BARRAGENS DE TERRA**

DANIEL SOSTI PERINI

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

APROVADA POR:

**André Pacheco de Assis, PhD (UnB)
(Orientador)**

**Márcio Muniz de Farias, PhD (UnB)
(Examinador Interno)**

**Rogério de Abreu Menescal, DSc
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 20 DE AGOSTO DE 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

PERINI, DANIEL SOSTI

Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra [Distrito Federal] 2009.

xxi, 128p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2009).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Barragem de terra

2. Risco

3. Incerteza

4. Quantificação de probabilidade

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PERINI, D. S. (2009). Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM-180/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p.

1.1 CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Daniel Sosti Perini.

TÍTULO: Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

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

Daniel Sosti Perini

Quadra 104, lote 03, Bloco A, apto 401, Residencial Colina.

71.909-180 Águas Claras – DF – Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho especialmente à minha esposa, Juliane, e à minha família por todo apoio, compreensão e paciência que foram fundamentais para a concretização de mais esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus amigos de UnB pela harmoniosa e divertida convivência, à minha família pela tolerância, ao meu orientador pelos valiosos ensinamentos, aos colegas de profissão que compartilharam de suas experiências, aos colegas da CAESB pelo profissionalismo com que me apoiaram e a CAPES pelo auxílio financeiro.

RESUMO

ESTUDO DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DE RISCOS DE BARRAGENS DE TERRA

As barragens não são isentas a falhas, portanto, um empreendimento seguro é aquele cujos riscos são mantidos sob controle e em níveis adequados. A engenharia de barragens é cercada de incertezas e tem exigido dos profissionais constantes tomadas de decisões, as quais são realizadas tradicionalmente com base em julgamentos de engenharia, que, apesar de fundamentais, não permitem que os problemas sejam tratados de maneira transparente e explícita, podendo ocultar erros conceituais e prejudicar o diálogo entre projetistas, construtores, proprietários, financiadores e órgãos de controle. Como complementação aos métodos tradicionais, uma abordagem com base no estudo dos riscos permite inúmeras percepções sobre as dificuldades e oportunidades existentes, que de outra maneira não seriam notados, e pode ser aplicada em todas as fases de uma obra. Seus resultados consideram as incertezas envolvidas nas premissas feitas no decorrer de todo o processo e são utilizados como dados de entrada no processo decisório, o qual passa a considerar o ambiente social, político e financeiro no qual está inserido. Este trabalho aborda a questão da segurança de barragens, as etapas e fases envolvidas no processo de gestão de riscos e o uso de distribuições de probabilidade e de métodos computacionais, como o de Monte Carlo, para a quantificação dos cenários de falhas e determinação das incertezas dos resultados da análise. Para embasar a construção das árvores de eventos, são estudados os principais mecanismos de ruptura envolvidos nos processos de *piping* e galgamento. Uma proposta de quantificação de cenários relacionados ao *piping* é apresentada e os resultados analisados. Por fim, faz-se uma análise crítica sobre a abordagem, suas ferramentas e sua aplicação em engenharia de barragens.

ABSTRACT

STUDY OF THE PROCESSES INVOLVED IN RISK ANALYSIS OF EARTHEN DAMS

Dams are not free from fail. Safe facilities are than the ones in which risks are kept under control in adequate levels. Dam engineering is surrounded by uncertainties, demanding a constant decision making from stakeholders. The traditional process is hardly based on experts' judgments but in a clearer and more transparent one. Although extremely important, those judgments can hide misconceptions and make the understanding among designers, constructors, and owners hardier. To fullfill this gap, a risk-based approach can be used. It permits insights into difficulties and opportunities faced in design, construction or operation of a dam, which otherwise would not be taken into account. The outcomes are accompanied by a clear and understandable explanation of how the uncertainties are considered and used as inputs in the decision making process, which considers the social, political and financial environment. In this work the safety of dams, risk management process, the uses of probabilistic distributions and computational methods as Monte Carlo used for the quantification of the scenarios are discussed, and the uncertainties of the outputs are analyzed. To make possible the conception of realistic event trees, the principals rupture mechanisms observed in dam failures were described. One quantification process of piping events is proposed and its outputs analyzed. A critique of the approach, the available tools and its application on dam engineering is made.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Organização do trabalho.....	3
2. Avaliação de risco em barragens.....	6
2.1. Gestão de riscos.....	7
2.1.1. Avaliação de riscos.....	8
2.1.1.1 - Análise dos riscos	10
2.1.1.2 - Tipos de análise de risco	11
2.1.1.3 - Consideração das incertezas associadas aos riscos	16
2.1.2. Apreciação dos riscos.....	19
2.2. Uso da avaliação de riscos na engenharia de barragens.....	20
3. Ruptura de barragens e seus mecanismos	22
3.1. Frequência histórica de acidentes e rupturas envolvendo barragens.....	22
3.1.1. Estatística global	22
3.1.2. Estatística brasileira.....	25
3.2. Estudo dos processos envolvidos na ruptura de barragens	29
3.2.1. Estudos sobre a abertura da brecha	30
3.2.1.1 - Importância dos parâmetros físicos da brecha.....	30
3.2.1.2 - Importância dos parâmetros temporais da brecha.....	31
3.2.1.3 - Métodos existentes para a previsão dos parâmetros da brecha.....	33
3.2.2. Mecanismo de formação da brecha por ocorrência de <i>piping</i>	35
3.2.3. Mecanismo de formação da brecha por ocorrência do galgamento	37
3.2.4. Hidrograma das vazões efluentes do reservatório.....	41
3.2.5. Rota do fluxo à jusante do reservatório.....	43
3.3. Considerações finais.....	44
4. Descrição do método utilizado para avaliação dos riscos de uma barragem	46

5. Elaboração da árvore de eventos e quantificação das probabilidades dos cenários de <i>piping</i> de uma barragem de terra	49
5.1. Caracterização da barragem de referência	49
5.2. Caracterização do local de implantação e do tratamento da fundação.....	52
5.3. Avaliação preliminar da barragem de referência	54
5.4. Estudo dos fatores de vulnerabilidade para elaboração da árvore de eventos	55
5.4.1. Estudo da vulnerabilidade ao <i>piping</i>	55
5.4.1.1 - Avaliação dos dados de projeto	55
5.4.1.2 - Inspeção de campo.....	60
5.4.1.3 - Premissas adotadas para a elaboração da árvore de eventos.....	63
5.4.2. Estudo da vulnerabilidade ao galgamento.....	63
5.4.2.1 - Inspeção de campo	69
5.4.2.2 - Premissas adotadas para a elaboração da árvore de eventos.....	72
5.4.3. Estudo da vulnerabilidade à instabilidade de taludes.....	73
5.4.3.1 - Inspeção de campo.....	77
5.4.3.2 - Premissas para a elaboração da árvore de eventos.....	78
5.5. Proposta das árvores de eventos.....	78
5.6. Quantificação das probabilidades dos cenários da árvore de eventos para o <i>piping</i>	83
5.6.1. Tratamento dos dados.....	85
5.7. Síntese do procedimento adotado.....	113
5.8. Análise dos resultados.....	115
6. Conclusões	122
6.1. Conclusões sobre o uso da avaliação de riscos em barragens.....	123
6.2. Recomendações para pesquisas futuras.....	125
Referencias Bibliográficas	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fatores de influência na probabilidade de formação de um fluxo concentrado devido à existência de uma camada com alta permeabilidade (modificado Foster & Fell, 2000)	12
Tabela 2.2 – Ligação entre a descrição verbal e a probabilidade (modificado Foster & Fell, 2000).....	12
Tabela 3.1 - Estatística geral para grandes barragens geotécnicas até 1986, excluindo barragens construídas no Japão pré-1930 e na China (Foster <i>et al.</i> , 2000).....	23
Tabela 3.2 - Estatística das rupturas por <i>piping</i> , galgamento e instabilidade de taludes por categoria de zoneamento de barragens (modificado de Foster <i>et al.</i> , 2000)	24
Tabela 3.3 - Estatística geral para grandes barragens geotécnicas construídas antes e depois de 1950 (até 1986) (Foster <i>et al.</i> , 2000).....	25
Tabela 3.4 – Relação dos parâmetros de referência da brecha com base em estudos de caso de rupturas de barragens (modificado de DSO, 1998).....	34
Tabela 3.5 – Frequência média de ruptura por <i>piping</i> no maciço, por categoria de zoneamento de barragens, até 1986.(Foster <i>et al.</i> , 2000)	37
Tabela 5.1 – Ficha técnica da barragem (modificado de Geotécnica, 1971).	50
Tabela 5.2 - Dados básicos: Características do maciço (modificado de Geotécnica, 1971)....	51
Tabela 5.3 - Dados básicos: Tomada d’água e galeria (modificado de Geotécnica, 1971).	51
Tabela 5.4 - Dados básicos: Características do Vertedouro (modificado de Geotécnica, 1971).	51
Tabela 5.5 – Fatores de influência na probabilidade de surgimento de trincas ou de colapso induzido por molhagem – aplicado à Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000).....	56
Tabela 5.6 – Fatores de influência na probabilidade de trincas ou fratura hidráulica – aplicado à Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000a).....	57
Tabela 5.7 – Fatores de influência na probabilidade de formação de fluxo concentrado - aplicado à Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000a).	58

Tabela 5.8 – Fatores de influência na probabilidade de formação de fluxo concentrado associado à presença de condutos através do maciço – aplicado à Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000).	59
Tabela 5.9 – Fatores de influência na probabilidade de formação de fluxo concentrado associado ao muro da galeria – aplicado à barragem de Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000).	59
Tabela 5.10 - Tempo aproximado de rebaixamento do nível d’água do reservatório da barragem de Santa Maria, entre as cotas 1073 a 1072 m, considerando apenas a descarga do vertedouro.....	67
Tabela 5.11 - Descrição dos materiais empregados na modelagem, parâmetros geotécnicos e permeabilidades adotadas.....	75
Tabela 5.12 - Lista dos eventos relacionados à ocorrência de <i>piping</i> da barragem e forma de análise adotada para quantificação.....	83
Tabela 5.13 - Correspondência entre a descrição verbal da chance de ocorrência do evento e o valor de probabilidade adotado.	84
Tabela 5.14 - Quantificação da probabilidade de ocorrência dos eventos de base que independem da cota nível d’água do reservatório e que resultam no surgimento de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria.....	88
Tabela 5.15 – Quantificação da probabilidade de ocorrência dos eventos de base que independem da cota nível d’água do reservatório e que resultam no trincamento do talude de montante.....	91
Tabela 5.16 - Probabilidades adotadas para a chance de ocorrência de ciclos de molhagem e secamento do material e períodos prolongados de secagem.....	92
Tabela 5.17 – Critérios adotados para a escolha das faixas de cotas.....	92
Tabela 5.18 - Probabilidades adotadas para a chance de ocorrência do início de processo erosivo decorrente da formação de fluxo concentrado em função da carga hidráulica atuante.	97
Tabela 5.19 – Procedimento para determinação da carga hidráulica de referência e adoção da probabilidade de inicialização do processo erosivo.	97

Tabela 5.20 - Valores característicos da granulometria dos materiais utilizados nos filtros e maciço da barragem.	102
Tabela 5.21 - Critério para definição do limite de não-erosão (Foster & Fell, 2001).....	102
Tabela 5.22 - Critério para definição do limite de erosão excessiva e erosão contínua (Foster & Fell, 2001).....	103
Tabela 5.23 - Possíveis desempenho de filtro em eventos de fluxo concentrado (Foster & Fell, 2001).....	103
Tabela 5.24 - Resultado da análise da capacidade do dreno vertical impedir a progressão do <i>piping</i> , segundo Foster & Fell (2001), e determinação da probabilidade de ocorrência.....	104
Tabela 5.25 - Quantificação da probabilidade de ocorrência dos eventos de base que independem da cota nível d'água do reservatório e que resultam no alargamento do <i>pipe</i> ..	106
Tabela 5.26 – Gradientes hidráulicos (<i>i</i>) máximos atuantes na barragem	108
Tabela 5.27 - Avaliação dos gradientes obtidos na simulação numérica com os valores críticos	108
Tabela 5.28 - Resultado da análise da capacidade de material resistir a erosão decorrente de gradientes hidráulicos elevados.....	109
Tabela 5.29 - Determinação da probabilidade de ocorrência do colapso do <i>pipe</i> e formação ou não da brecha de ruptura.	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema Integrado de Segurança de Barragens.....	6
Figura 2.2 - Etapas da Gestão de Riscos (modificado - AS/NZS, 2004)	7
Figura 2.3 – Etapas pertencentes à avaliação dentro do processo de Gestão de Riscos.	8
Figura 2.4 - Sub-etapas do processo de avaliação de riscos (modificado - Bowles, 2001)	8
Figura 2.5 - Contribuições das perguntas ao processo (modificado - Stamatelatos, 2002).	9
Figura 2.6 – Exemplo de modelagem lógica de cenário de <i>piping</i> através do maciço. (modificado de Foster & Fell, 2000).....	10
Figura 2.7 – Exemplo de Árvore de Falhas (Modificado Foster & Fell, 2000).....	13
Figura 2.8 – Exemplo de Árvore de Eventos (modificado Foster & Fell, 2000).....	14
Figura 2.9 - Interrelação da ET com a FT (modificado - Bier, 1997).....	15
Figura 2.10 – Incertezas aleatórias, epistêmicas e do modelo de decisão em análises geotécnicas de confiabilidade (Baecher & Christian, 2008).....	17
Figura 2.11 - Algumas incertezas associadas aos dados de entrada necessários para estudo da barragem (modificado – Chauhan & Bowles, 2003).....	17
Figura 2.12 – Exemplos de distribuições de probabilidade	18
Figura 3.1 - Frequência de incidentes com barragens brasileiras reportados pela imprensa escrita entre 2000 a 2008.....	27
Figura 3.2 – Número de reservatórios estimados por estado (espelho d’água superior a 20 ha).	28
Figura 3.3 – Visão frontal da barragem mostrando configuração teórica da brecha de ruptura.	29
Figura 3.4 – Parâmetros normalmente adotados para representação de uma brecha de ruptura.	31
Figura 3.5 – Fases de formação da brecha de ruptura (IMPACT, 2005)	32
Figura 3.6 – Processo de ruptura, formação da onda de cheia e disponibilidade de tempo para alerta e ações remediadoras.....	33
Figura 3.7 - Processo de formação de <i>piping</i> por erosão regressiva.	35

Figura 3.8 - Processo de formação de <i>piping</i> por meio do alargamento das paredes das trincas.	35
Figura 3.9 - Processo de formação de <i>piping</i> por meio do carreamento de finos.	36
Figura 3.10 – Regimes de fluxo e zonas de erosão (Powledge <i>et al.</i> , 1988).....	38
Figura 3.11 – Sequência erosiva devido ao galgamento – barragens de enrocamento com núcleo impermeável (Powledge <i>et al.</i> , 1988).....	39
Figura 3.12 – Sequência erosiva devido ao galgamento – barragens homogêneas com materiais coesivos (Powledge <i>et al.</i> , 1988).....	39
Figura 3.13 – Sequência erosiva devido ao galgamento – barragens de material coesivo com elementos granulares (Powledge <i>et al.</i> , 1988).....	40
Figura 3.14 – Exemplo de hidrograma.....	41
Figura 3.15 – Variação das alturas do nível d’água em função do tempo de ocorrência (Modificado de Bozkus & Kasap, 1998).....	43
Figura 3.16 – Cota do nível d’água de pico para diferentes distâncias a jusante da barragem de Cubuk-1 (Modificado de Bozkus & Kasap, 1998).....	44
Figura 3.17 – Tempo decorrido para o pico de cheia para diferentes distâncias da barragem de Cubuk-1 (Modificado de Bozkus & Kasap, 1998).....	44
Figura 4.1 – Sequência lógica de ações idealizada para a avaliação de riscos de barragem....	46
Figura 4.2 – Sequência lógica das ações utilizadas para o desenvolvimento do trabalho	48
Figura 5.1 - Seção transversal da barragem pela estaca 17 (modificado de Geotécnica, 1971).	49
Figura 5.2 – Arranjo geral da barragem de Santa Maria (modificado - Google, 2009).....	50
Figura 5.3 – Estrutura de captação e adução da barragem de Santa Maria: a) foto da torre de tomada d’água; b) foto do interior da galeria sob a barragem - jusante para montante.	51
Figura 5.4 – Estrutura responsável pela descarga das vazões excedentes da barragem de Santa Maria: a) foto do conjunto: vertedouro, rápido e bacia de dissipação; b) detalhe do vertedouro em leque com seção do tipo Creager.....	52
Figura 5.5 - Perfil longitudinal ao longo do canal de desvio - exagero na escala vertical: 5x (modificado de Geotécnica, 1971).	53

Figura 5.6 – Tratamento de fundação (modificado de Geotécnica, 1971).....	54
Figura 5.7 – Detalhe da estrutura de saída da galeria da tomada d’água: a) poço de acesso à galeria (talude de jusante) com indicações de presença de água; b) detalhe da vegetação a jusante da galeria.....	60
Figura 5.8 – Região a jusante da barragem: a) Vista geral; b) indicativo dos caminhos preferenciais da água percolada através do maciço e fundações.	61
Figura 5.9 - Localização dos filtros, drenos e áreas úmidas à jusante da barragem (modificado - Google, 2009).	61
Figura 5.10 – Poço de inspeção da vazão de saída dos drenos, localizado próximo à ombreira direita (a) e próximo a ombreira esquerda (b).....	62
Figura 5.11 – Detalhe do dreno de pé e poço de inspeção (Geotécnica, 1971).	62
Figura 5.12. Curva de frequência das cotas de nível d’água diárias atingidas no reservatório da barragem de Santa Maria no período de 13 de fevereiro de 1987 a 31 de maio de 2008.	64
Figura 5.13 - Histograma de frequência das cotas de nível d’água diárias atingidas na barragem de Santa Maria no período de 13 de fevereiro de 1987 a 31 de maio de 2008.	65
Figura 5.14 - Curva Cota x Área, Cota x Volume do reservatório da barragem de Santa Maria (CNEC, 1978).....	66
Figura 5.15 – Esquema geral de uma barragem com indicação de alguns fatores que influenciam o NA.	68
Figura 5.16 - Histograma das vazões de alimentação do reservatório de Santa Maria.....	68
Figura 5.17 - Histograma das vazões captadas do reservatório de Santa Maria.....	69
Figura 5.18 – Foto demonstrando o bom estado do conservação do pavimento e perfeito alinhamento do meiofio.....	70
Figura 5.19 - Falhas na proteção do talude de montante e surgimento de buracos de erosão.	70
Figura 5.20 - Talude de jusante: falhas na proteção e constatação de início de erosão.	71
Figura 5.21 - Aterro na região do vertedouro: a) vista de montante; b) vista de jusante.	71
Figura 5.22 - Deslocamento do material do Rip-Rap pela força da água.	72
Figura 5.23 - Distribuição dos materiais de diferentes jazidas pelo maciço da barragem e inclinações dos taludes.	74

Figura 5.24 - Distribuição das regiões e materiais adotados na modelagem utilizada para a verificação da estabilidade de taludes da barragem.	75
Figura 5.25 - Análise de percolação da barragem com o nível do reservatório na cota 1073 m.	76
Figura 5.26 - Análise da estabilidade do talude de jusante da barragem com o nível do reservatório na cota 1073 m.	77
Figura 5.27 - Talude de jusante da barragem de Santa Maria sem indícios de movimentação ou deslocamentos de terra.	77
Figura 5.28 – Árvore de eventos para o <i>piping</i> do caso-estudo da barragem.	80
Figura 5.29 – Árvore de eventos para o galgamento do caso-estudo da barragem.	81
Figura 5.30 - Árvore de eventos para a instabilidade do talude de jusante do caso-estudo da barragem.	82
Figura 5.31 - Distribuição de probabilidade das cotas de NA no reservatório (Weibull).	86
Figura 5.32 - Árvore de falhas que levam à ocorrência de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria.	87
Figura 5.33 - Árvore de falhas contendo a probabilidade de surgimento de caminhos preferenciais de água no contato maciço / galeria.	89
Figura 5.34 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de surgimento de caminhos preferenciais de água no contato maciço / galeria.	89
Figura 5.35 - Árvore de falhas proposta para quantificar a probabilidade de ocorrência de trincas no maciço da barragem (modificado de Foster et al., 2000a).	90
Figura 5.36 - Árvore de falhas contendo a probabilidade de ocorrência de trincas no maciço da barragem em função do NA no reservatório.	93
Figura 5.37 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de ocorrência de trincas no maciço para cotas entre 1060,60 e 1067,60 m.	94
Figura 5.38 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de ocorrência de trincas no maciço para cotas entre 1067,61 e 1072,15 m.	94
Figura 5.39 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de ocorrência de trincas no maciço para cotas entre 1072,16 e 1072,45 m.	94

Figura 5.40 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de ocorrência de trincas no maciço para cotas entre 1072,46 e 1073,00 m.	95
Figura 5.41 - Distribuição de probabilidade adotada para representar as probabilidades de ocorrência de trincas.....	96
Figura 5.42 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado para $h^* < 2$ m.	98
Figura 5.43 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado para h^* compreendidos entre 2 m e 5 m.	98
Figura 5.44 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado para h^* compreendidos entre 5 m e 7m.	99
Figura 5.45 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado para $h^* > 7$ m.	99
Figura 5.46 - Distribuição de probabilidade adotada (maciço-galeria).....	100
Figura 5.47 - Distribuição de probabilidade adotada (maciço).....	101
Figura 5.48 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do dreno vertical não possuir propriedades de filtro e não impedir a progressão da erosão.....	104
Figura 5.49 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do dreno vertical possuir propriedades de filtro, impedir o progresso da erosão, contudo resultar em alguma perda de material.....	105
Figura 5.50 - Árvore das falhas que resultam no alargamento do tubo.	105
Figura 5.51 - Árvore de falhas contendo a probabilidade do processo erosivo progredir e resultar no alargamento do <i>pipe</i> (tubo)	109
Figura 5.52 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do alargamento do <i>pipe</i> para cotas situadas entre a Elev. 1060,60 e 1072,15 m	110

Figura 5.53 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do alargamento do <i>pipe</i> para cotas situadas entre a Elev. 1072,16 e 1073,00 m	110
Figura 5.54 - Distribuição de probabilidade adotada	111
Figura 5.55 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do colapso do <i>pipe</i> , desabamento da crista e abertura da brecha de ruptura para <i>piping</i> no maciço	113
Figura 5.56 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do colapso do <i>pipe</i> , desabamento da crista e abertura da brecha de ruptura para <i>piping</i> na interface maciço / galeria	113
Figura 5.57 - Árvore lógica utilizada para quantificação dos cenários de <i>piping</i>	114
Figura 5.58 – Quantificação da probabilidade dos cenários ocorridos na região de contato do maciço / galeria	116
Figura 5.59 – Quantificação da probabilidade dos cenários ocorridos na região do maciço.	117
Figura 5.60 – Quantificação da probabilidade de não ocorrer nenhuma falha na barragem..	118
Figura 5.61 – Combinação necessária para determinação da probabilidade global de ruptura da barragem.	119
Figura 5.62 – Resultados globais da quantificação da probabilidade de eventos relacionados ao <i>piping</i>	120

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

	Condição “e” da árvore de falhas
	Condição “ou” da árvore de falhas
ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i>
AS/NZS	<i>Australia Standards / New Zealand Standards</i>
B	Largura da brecha
b_{base}	Largura do fundo da brecha
BC HYDRO	<i>British Columbia Hydroelectric and Power Corporation</i>
b_m	Largura média da brecha de ruptura
b_{topo}	Largura do topo da brecha
c	Coesão
C	Variável função do NA do reservatório
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CE	Erosão Continuada (<i>continued erosion</i>)
CNEC	Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores
CNPGB	Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens
DB(x)	Diâmetro das partículas do solo base onde x% do peso é composto de finos
Desv. Pad.	Desvio padrão
DF(x)	Diâmetro das partículas do filtro onde x% do peso é composto de finos
d_{ovtop}	Profundidade da lâmina d’água do galgamento na ruptura
DSO	<i>Dam Safety Office</i>
e	Número neperiano
EE	Erosão excessiva (<i>excessive erosion</i>)
Elev.	Cota de elevação em relação ao nível do mar
Eq.	Equação
ET	Árvore de eventos (<i>event tree</i>)
$f(A/B)$	Probabilidade do evento A ocorrer dado a ocorrência de B
FMI	Identificação dos Modos de Falha (<i>Failure Mode Identification</i>)
FOSM	<i>First-Order-Second-Moment</i>
f_{Pr}	Força resistiva à força de percolação da água

FT	Árvore de falhas (<i>fault tree</i>)
G-E	Pilar Gestão de Risco -Emergência
H	Referência horizontal da inclinação de taludes
h	Altura da lâmina d'água sobre a crista
h*	Carga hidráulica de referência
h _b	Altura da brecha de ruptura
h _d	Altura da barragem
HR BREACH	<i>HR Wallingford Breach Model</i>
h _w	Altura do nível d'água em relação ao fundo da brecha
i	Gradiente hidráulico
i _c	Gradiente hidráulico crítico
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
i _{cya}	Gradiente hidráulico na direção vertical ascendente
i _{cyd}	Gradiente hidráulico na direção vertical descendente
IMPACT	<i>Investigation of Extreme Flood Processes & Uncertainty</i>
Incl.	Inclinação
IP	Lista de Priorização (<i>Index Priorization</i>)
I _p	Índice de plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
i _x	Gradiente hidráulico na direção horizontal
i _y	Gradiente hidráulico na direção vertical
k	Coefficiente de permeabilidade na direção horizontal
k _o	Coefficiente utilizado na determinação de parâmetro da brecha
k _v	Coefficiente de permeabilidade na direção vertical
L	Largura do núcleo da barragem
Máx.	Máximo
MI	Ministério da Integração Nacional
M-V	Pilar Monitoramento - vigilância
NA	Nível d'água
NE	Não erosão (<i>no erosion</i>)
Nº	Número
NWS BREACH	<i>National Weather Service Erosion Model for Earth Dam Failures</i>

NWS DAMBRK	<i>National Weather Service Dam-Break Flood Forecasting Model</i>
ϕ	Ângulo de atrito
Oper.	Operacional
P(x)	Probabilidade de ocorrência do evento x
PROB.x	Probabilidade do evento x, dado na forma de uma distribuição de probabilidade
pp% $x\mu$ m	Porcentagem de finos menores que x μ m
PRA	Avaliação de Riscos em Portfólio (<i>Portfolio Risk Assessment</i>)
Q	Vazão
Q _p	Vazão de pico
QRA	Avaliação de Risco Qualitativa (<i>Qualitative Risk Assessment</i>)
Q _v	Vazão de descarga do vertedouro
t	Tempo
t _f	Tempo de formação da brecha
T-O	Pilar Técnico - Operacional
t _p	Tempo no qual ocorre a vazão de pico
UK HSE	<i>United Kingdom Health and Safety Executive</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
V	Referência vertical da inclinação de taludes
V _{er}	Volume de material erodido no maciço
V _{out}	Volume inicial de água que passa pela brecha
V _w	Volume de água no reservatório acima da cota de fundo da brecha
Y _c	Altura crítica de escoamento
Z	Referência horizontal da inclinação do talude da brecha
α	Parâmetro de forma da distribuição Weibull
β	Parâmetro de escala da distribuição Weibull
γ	Peso específico
Δh	Incremento de altura da lâmina d'água sobre a crista
ΔV	Incremento de volume de água acumulada no reservatório
$\theta(A)$	Frequência de ocorrência do evento A

1. INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas que se destinam a reter líquidos ou misturas de líquidos e sólidos de maneira controlável e segura, propiciando benefícios para toda a sociedade. Por meio de seu uso é possível dispor de água para o abastecimento humano e industrial, gerar energia elétrica, irrigar áreas agricultáveis, além de viabilizar inúmeras outras atividades relevantes. Entretanto, como qualquer obra de engenharia, as barragens não são à prova de falhas, portanto, acidentes ou até rupturas podem ocorrer. Destes incidentes pode resultar a liberação descontrolada do volume armazenado, com consequências que podem variar da simples perda deste volume até catástrofes envolvendo perda de vidas humanas e o comprometimento total da região atingida. A combinação entre a chance de ocorrência de falhas e a gravidade de suas consequências denomina-se risco.

Apesar do estado da arte da engenharia atual permitir que o projeto, construção, manutenção e operação de barragens sejam realizados de forma eficaz e garantir que os níveis de segurança previstos para o empreendimento sejam atingidos, pode-se afirmar que sempre haverá a possibilidade, mesmo que remota, de que uma determinada combinação de fatores adversos ocorra e que o desempenho da estrutura frente a esta seja insatisfatório. A sociedade moderna reconhece a existência de riscos e a impossibilidade de se eliminar todas as ameaças existentes e, diante da necessidade de certos benefícios, acaba por tolerá-los, porém, não mais aceita que estes não recebam o tratamento adequado. Isso é percebido nos ambientes regulatórios cada vez mais severos, aplicação de multas mais pesadas, indenizações mais significativas, imposição de restrições financeiras, cancelamento de concessões de uso, perda no prestígio da marca, dentre outros fatores.

Esta mudança de ambiente tem impactado diretamente o meio empresarial que, diante da necessidade de viabilizar financeiramente suas atividades e se manter competitivo no mercado, tem exigido que os profissionais extrapolem suas aptidões puramente técnicas e se insiram num campo muito mais subjetivo, o dos valores. Assim, nos constantes processos de tomada de decisão, inerentes a qualquer fase de uma obra de engenharia (projeto, construção, operação, intervenção ou descomissionamento), não basta mais apenas a busca pelo atendimento aos critérios normatizados, como valores mínimos de resistência e de fator de segurança etc., mas cabe ao engenheiro considerar outros métodos de avaliação que consigam

mensurar as aversões da sociedade, os quais variam em função da percepção que esta tem de um determinado risco num determinado momento da história. Os motivos que levam a considerá-los é que eles impactam diretamente a atividade barrageira.

A abordagem implícita na Avaliação de Riscos vem ao encontro desta nova realidade, fornecendo aos engenheiros mais uma ferramenta de trabalho, complementando aquelas já existentes na abordagem tradicional. Ela permite que as incertezas inerentes à engenharia sejam tratadas de maneira mais transparente e explícita, por meio de análises probabilísticas e de confiabilidade, ao invés das análises determinísticas e dos “julgamentos de engenharia”, cujas incertezas ficam implícitas nos valores dos Fatores de Segurança adotados e na experiência do profissional. Por ser sistemática, permite que o comportamento e o desempenho da barragem sejam mais bem compreendidos, uma vez que procura focar na origem das incertezas. Além disso, as possíveis consequências são estudadas e seus impactos considerados na avaliação. Os resultados, então, são utilizados como dados de entrada no processo decisório, os quais passam a ser influenciados pelo ambiente social, político, financeiro e outros, conforme já comentado.

A avaliação de riscos ainda se encontra em fase de aperfeiçoamento para aplicação em segurança de barragens, necessitando maiores estudos. Entretanto, abordagens com base nos riscos já vêm sendo consideradas por várias organizações como o Comitê Australiano de Grandes Barragens (ANCOLD), o Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), o US Bureau of Reclamation (USBR), o British Columbia Hydro (BC Hydro) e até mesmo em legislações de países como as da Holanda e África do Sul (Bowles *et al.*, 1997). No Brasil, sua utilização ainda é muito incipiente, mas seu campo de aplicação muito vasto, podendo ser utilizada para a avaliação das inúmeras barragens existentes.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é abordar os princípios nos quais se fundamenta a Gestão de Riscos, com enfoque na etapa de análise dos riscos e sua aplicação na engenharia geotécnica de barragens. Como forma de complementar o trabalho, será realizado um estudo de caso, no qual serão utilizadas informações oriundas de uma barragem de terra em operação, para simular uma situação hipotética por meio da qual se pretende avaliar as dificuldades na aplicação da abordagem com base nos riscos e os benefícios advindos de seus resultados.

Já os objetivos específicos incluem:

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente que permita o entendimento das etapas inerentes à Gestão de Riscos, das ferramentas utilizadas na fase de análise dos riscos e da importância de se considerar as incertezas do processo em tomada de decisões em engenharia, além da compreensão das principais causas de ruptura de barragens e dos seus mecanismos de ocorrência, de forma a subsidiar a análise de risco.
- Elaborar e quantificar cenários compostos de uma sequência de eventos que resultam em falhas para a barragem, visando avaliar as dificuldades e benefícios do processo desta importante etapa da análise de riscos.

1.2. Organização do trabalho

Este trabalho foi dividido em seis capítulos. No primeiro, a motivação, os objetivos e a forma como foi estruturado são descritos. Após essa parte introdutória, faz-se uma abordagem da questão de segurança de barragens, onde se descreve o entendimento do risco e de suas implicações como norteadores das tomadas de decisões, pois nos capítulos seguintes encontrar-se-á uma ampla revisão bibliográfica sobre o assunto, um estudo de caso, onde se realiza uma análise de riscos com base em dados de uma barragem real, e as principais conclusões e recomendações sobre o assunto.

No segundo capítulo, a Gestão de Riscos é inserida como um dos pilares de sustentação da segurança de uma barragem. Suas etapas são apresentadas para permitir o entendimento de cada uma no processo global e também para familiarizar o leitor com a nomenclatura que vem sendo utilizada no meio técnico. Dentre estas etapas, aquela referente à Avaliação dos Riscos é particularmente detalhada em suas sub-etapas e uma ênfase é dada à fase da quantificação

da probabilidade de ocorrência de eventos indesejados e de suas consequências. A utilização da árvore de eventos e da árvore de falhas é comentada.

Ainda neste capítulo, é discutida a importância de considerar e informar os tomadores de decisão sobre as incertezas envolvidas no processo de Análise dos Riscos, o uso de distribuições de probabilidade e o uso de métodos numéricos, como o de Monte Carlo, para a determinação das incertezas dos resultados da análise. Por fim, são abordados os princípios básicos de onde se originam os critérios de apreciação, utilizados para avaliar os resultados obtidos, e são elencadas as diversas formas com que as Avaliações de Risco vêm sendo realizadas na atividade barrageira.

No terceiro capítulo, aborda-se um estudo sobre a ocorrência de incidentes (eventos que podem ser tanto acidentes localizados, quanto rupturas) envolvendo barragens, onde as principais causas são identificadas e comentadas; traça-se um panorama sobre a situação atual das barragens brasileiras, no qual se procura identificar os maiores problemas enfrentados para a garantia da segurança do empreendimento. Detalha-se os mecanismos de ruptura de barragens, decorrentes do *piping* e do galgamento, a formação e trajetória da onda de cheia e sua influência nas consequências da ruptura. O objetivo deste capítulo é subsidiar o analista de riscos em sua árdua tarefa de identificação dos diversos cenários possíveis que resultariam na falha de uma barragem.

No quarto capítulo é descrito o método proposto para a avaliação de riscos para uma barragem hipotética, onde todas as fases, etapas, sub-etapas, com suas seqüências de interligações lógicas, encontram-se representadas por meio de um fluxograma. Com o auxílio desta ferramenta gráfica, o escopo e a abrangência do presente trabalho é situado dentro do universo de atividades idealizadas e são estabelecidos os passos e os procedimentos que devem ser seguidos para o estudo de caso, que são descritos no capítulo seguinte.

No quinto, os estudos que foram realizados, tanto de projeto, quanto provenientes das inspeções de campo realizadas, e que permitiram estabelecer o diagnóstico da situação atual da barragem de referência, estão descritos em detalhes. A forma com que estas informações foram assimiladas e compreendidas pelo autor resultaram em árvores de eventos para situações hipotéticas de *piping*, galgamento e instabilidade de taludes. Estas árvores também são encontradas neste capítulo. As suposições e tratamentos dados às incógnitas do problema

encontram-se descritos e o resultado da quantificação para os cenários de *piping* é apresentado. Por fim, é feita uma análise destes resultados.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho e as recomendações para futuros estudos.

2. AVALIAÇÃO DE RISCO EM BARRAGENS

Um conceito que vem sendo considerado como o mais completo para o controle da segurança de barragens é o chamado Sistema Integrado de Segurança (Almeida, 2001), que vê a questão sobre três pilares: o Técnico-Operacional (T-O), o de Monitoramento-Vigilância (M-V) e o de Gestão de Riscos / Emergência (G-E). Cada um desses pilares deve ser entendido como um apoio que, em conjunto, mantém a barragem segura durante as diversas fases de vida (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Sistema Integrado de Segurança de Barragens

O pilar Técnico-Operacional é entendido como sendo as medidas tradicionais de controle de segurança estrutural, hidráulica e operacional, aplicadas nas fases de projeto, construção, operação e descomissionamento, de acordo com critérios e normas técnicas vigentes; o de Monitoramento-Vigilância compreende as medidas de observação ou monitoramento, estrutural e hidráulico, e as medidas especiais de vigilância, incluindo os sistemas de inspeção, detecção, previsão e análise, orientados para a prevenção a curto / médio prazo de emergências e de controle de eventuais situações de crise. Já o de Gestão de Riscos / Emergência compreende a implementação e preparação de todas as medidas e procedimentos necessários para o controle dos riscos e para dar uma resposta aos eventuais acidentes que possam ocorrer numa barragem (Almeida, 2001).

O papel que cada um dos três pilares desempenha tem sua importância na segurança global da barragem e, por isso, devem ser encarados pelos profissionais como complementares e nunca como excludentes. Cada pilar, portanto, deve ser entendido como condição necessária para a segurança, mas não suficiente.

2.1. Gestão de riscos

A Gestão de Riscos é essencialmente uma prática gerencial. Envolve a cultura, os processos e as estruturas voltadas para a concretização de oportunidades potenciais, ao mesmo tempo em que se gerenciam os efeitos adversos que venham a surgir. No contexto da gestão, o risco é entendido como sendo a exposição às consequências das incertezas existentes ou aos potenciais desvios daquilo que foi planejado ou que era esperado (AS/NZS, 2004).

A Gestão de Riscos se concretiza por meio de um procedimento iterativo constituído de etapas, conforme ilustrado na Figura 2.2. A realização destas etapas, como uma sequência de passos, resulta num ciclo que proporciona um aprimoramento contínuo das tomadas de decisões e um incremento permanente de desempenho (AS/NZS, 2004). Para cada nova informação adquirida, o ciclo pode ser realimentado, proporcionando respostas cada vez mais precisas.

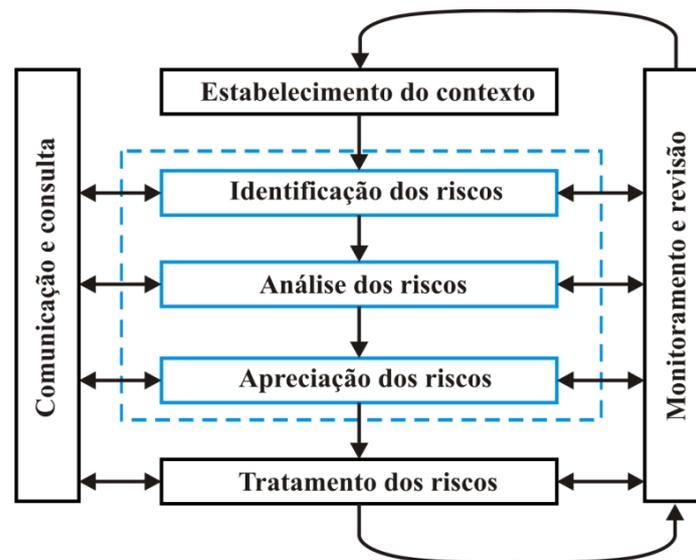


Figura 2.2 - Etapas da Gestão de Riscos (modificado - AS/NZS, 2004)

Dentre as etapas, o correto estabelecimento do contexto do gerenciamento é peça fundamental para o sucesso e a eficiência da gestão, pois é nela que os parâmetros básicos, dentro dos quais os riscos devem ser gerenciados, são definidos e que se norteia todo o escopo do resto do processo. Além disso, é nesta etapa que se definem os critérios contra os quais os riscos serão confrontados e as decisões que serão tomadas (AS/NZS, 2004).

2.1.1. Avaliação de riscos

Uma vez definido o contexto em que se dará a gestão e os critérios de referência, o próximo passo é a avaliação dos riscos. Trata-se do processo de verificar se os riscos existentes são toleráveis e se as medidas atuais de controle são adequadas e, caso não forem, verifica-se se as medidas alternativas de controle do risco se justificam a ponto de serem implementadas (CNPGB, 2005). Dentro do processo de gestão, a etapa de avaliação se subdivide em identificação, análise e apreciação dos riscos, conforme Figura 2.3 e Figura 2.4.

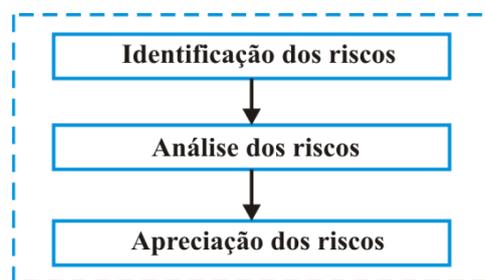


Figura 2.3 – Etapas pertencentes à avaliação dentro do processo de Gestão de Riscos.

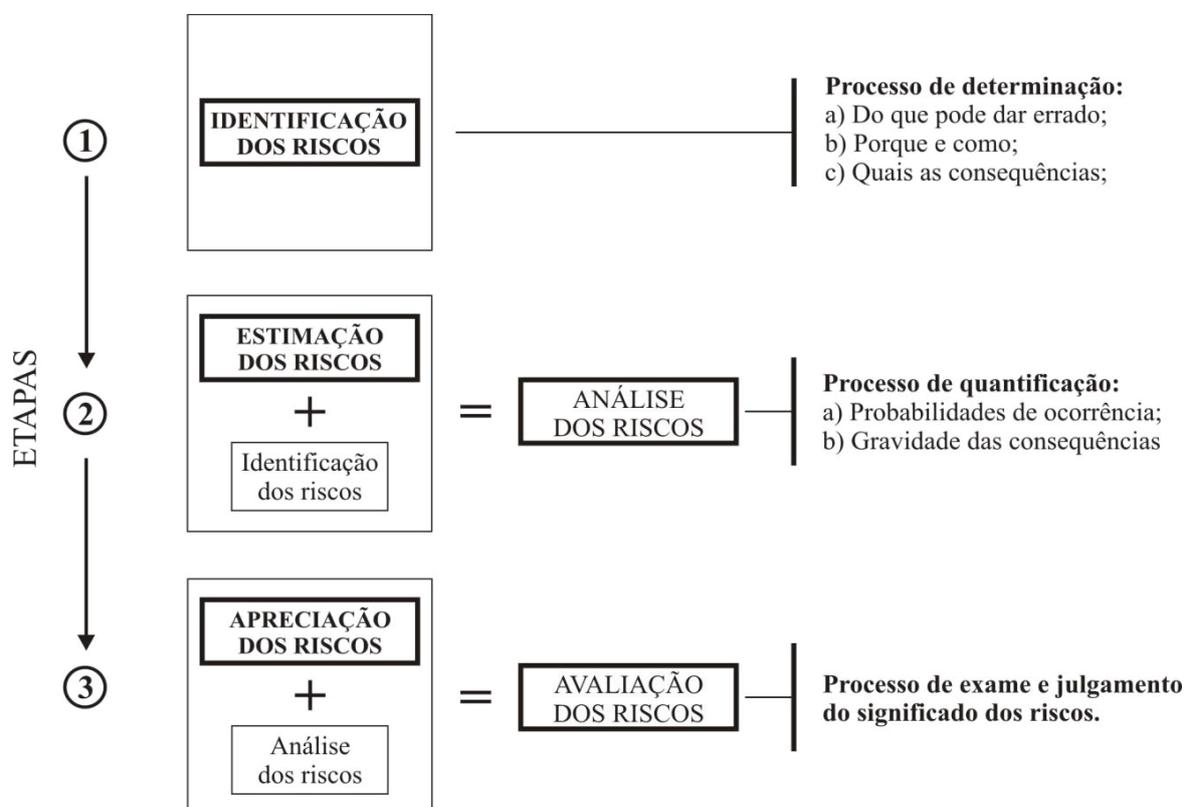


Figura 2.4 - Sub-etapas do processo de avaliação de riscos (modificado - Bowles, 2001)

As duas primeiras etapas de uma avaliação de riscos podem ser entendidas como sendo aquelas que permitirão responder às seguintes perguntas (Bier, 1997):

- i) O que pode dar errado?
- ii) Qual é a probabilidade de ocorrência ?
- iii) Quais são as consequências?

Na terceira etapa, os resultados obtidos são julgados com base nos critérios pré-estabelecidos na etapa na qual o contexto em que se dará a gestão foi definido. Esses critérios podem ter origem normativa, ser baseados em valores sociais, objetivos da empresa etc., contanto que permitam uma correta interpretação dos resultados obtidos nas duas etapas anteriores.

Respondendo à primeira das perguntas, obtém-se a identificação dos possíveis cenários de eventos de ameaça ou perigo na forma de uma lista estruturada. À segunda, obtém-se a quantificação das probabilidades de cada um destes cenários, incluindo o cálculo das incertezas, que será discutido mais adiante. A resposta à terceira pergunta resulta numa estimativa das consequências, resultantes da ocorrência do evento indesejado (Bier, 1997).

O fluxograma da Figura 2.5 busca esclarecer a contribuição das perguntas no processo de identificação e análise dos riscos.

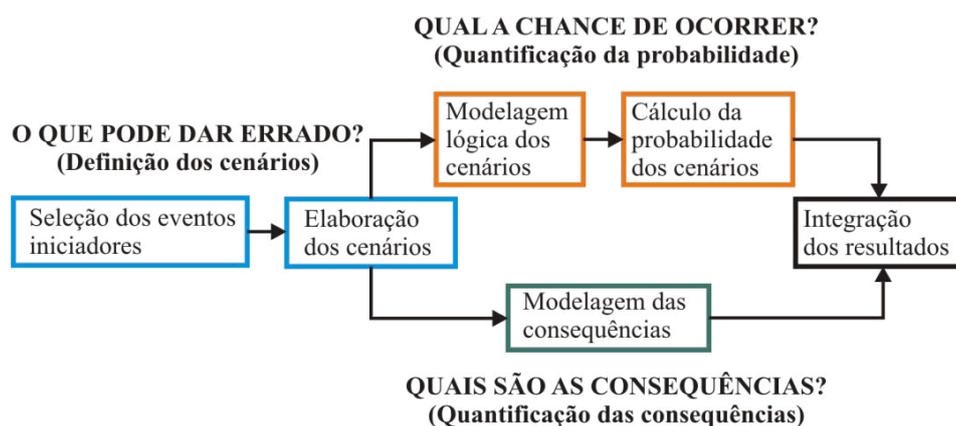


Figura 2.5 - Contribuições das perguntas ao processo (modificado - Stamatelatos, 2002).

Um exemplo de cenário, que afeta a segurança de uma barragem, pode ser aquele que resulte na ruptura da mesma devido ao processo de *piping* através do maciço. Neste exemplo, um dos vários eventos iniciadores prováveis poderia ser a existência de um fluxo concentrado de água, causado pela alta permeabilidade de uma camada mal compactada, numa determinada

cota de elevação da barragem. Para esta situação, uma proposta de modelagem é apresentada na Figura 2.6, na qual o cenário descrito é representado no tramo superior da árvore lógica.

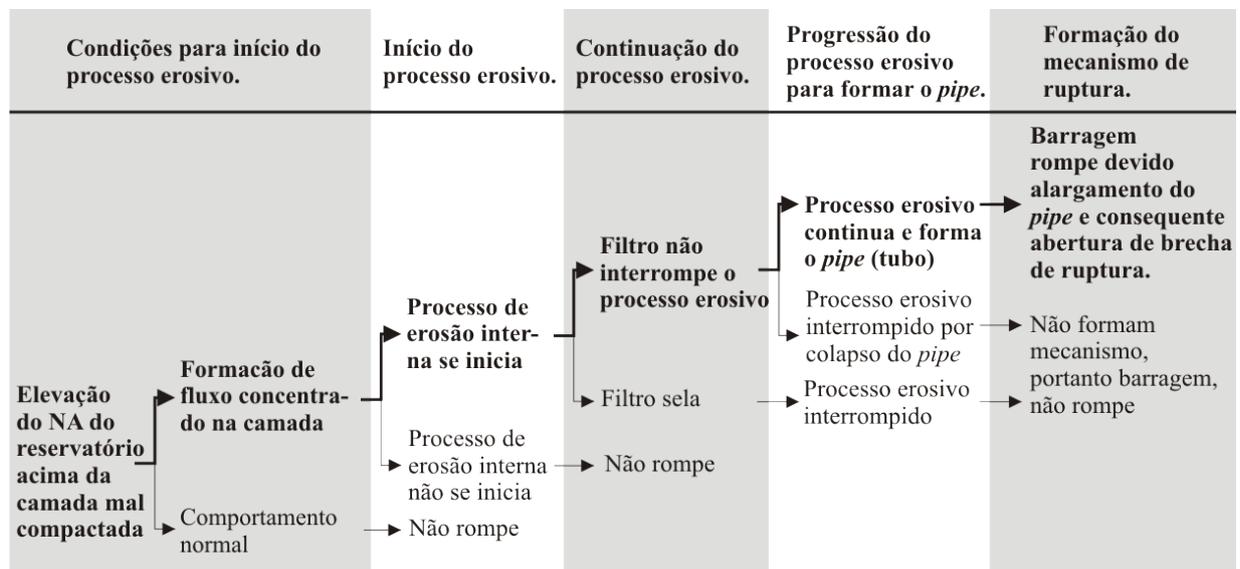


Figura 2.6 – Exemplo de modelagem lógica de cenário de *piping* através do maciço. (modificado de Foster & Fell, 2000).

Na árvore lógica, cada cenário de falha corresponderá a uma consequência distinta. Estas consequências, por sua vez, também poderão ser igualmente modeladas, representando seus diferentes cenários. Para Fell *et al.* (2000), a parte mais crítica de qualquer avaliação de riscos é a identificação completa dos cenários que resultam nas falhas. Para isso, recomenda-se a participação de um grupo experiente de engenheiros, de profissionais com um longo envolvimento com a barragem, do responsável pelo monitoramento / vigilância e operação e de um profissional experiente em avaliações de risco, preferencialmente sem envolvimento anterior com a barragem.

2.1.1.1 - Análise dos riscos

Uma vez estabelecidos os cenários, parte-se para a estimativa de seus riscos com a quantificação, de cada um dos eventos que os constituem, em termos de chances de ocorrência, tanto do evento indesejado quanto das suas consequências e gravidade. As probabilidades podem ser estimadas por meio de análises e cálculos estatísticos, para tanto, é necessário que existam dados em número suficiente. Quando não existirem dados confiáveis ou informações anteriores relevantes, estimativas podem ser feitas para tal finalidade.

Segundo a norma australiana (AS/NZS, 2004), as fontes de informação para estas estimativas podem ser:

- Registros anteriores;
- Prática e experiência relevante;
- Literatura publicada;
- Pesquisa de mercado;
- Resultados de consulta pública;
- Experimentos e protótipos;
- Modelos econômicos, de engenharia etc.;
- Julgamentos de especialistas e experts

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

2.1.1.2 - Tipos de análise de risco

Uma análise de riscos pode ser realizada de forma qualitativa, quantitativa, ou como variações destas. Tal escolha dependerá do detalhamento desejado, dos tipos de risco estudados, do propósito da análise e, principalmente, das informações, dados e recursos disponíveis. Na análise qualitativa utiliza-se de palavras para descrever a magnitude das potenciais consequências e também das probabilidades de elas ocorrerem. Nas semiquantitativas, valores numéricos são associados a essas descrições. Por fim, nas quantitativas, dados existentes permitem que todo o estudo seja realizado com valores numéricos (AS/NZS, 2004).

A Tabela 2.1 traz um exemplo de descrição que pode ser utilizada para avaliar qualitativamente a probabilidade de ocorrência de fluxo concentrado em camadas com alta permeabilidade em maciço de barragem. Caso valores fossem agregados a estas descrições, utilizando como referência a Tabela 2.2, essa análise passaria a ser considerada como semiquantitativa.

Tabela 2.1 – Fatores de influência na probabilidade de formação de um fluxo concentrado devido à existência de uma camada com alta permeabilidade (modificado Foster & Fell, 2000)

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco provável
Grau de compactação	Mal compactado, < 95% do grau de compactação normal	95-98% do grau de compactação normal	Bem compactado, ≥ 98% do grau de compactação normal
Umidade de compactação	Mais seco do que a umidade ótima de compactação (-3%)	Umidade de compactação entre -1 e -2 %	Umidade de compactação ótima ou mais úmida
Qualidade da construção	Sem supervisão de engenharia durante a construção; Limpeza ruim após períodos úmidos, secos ou congelados durante a construção.		Bom acompanhamento da obra. Retirada de camadas ressecadas, úmidas ou congeladas antes da retomada da construção.
Detalhes da instrumentação	Compactação ruim próximo à instrumentação, principalmente se esta passar pelo núcleo da barragem		Sem instrumentação no núcleo.
Características do material do núcleo	Grande variabilidade de materiais na área de empréstimo, conteúdo da mistura, acondicionamento e tamanho das partículas. Material do núcleo suscetível a trincamento devido ao ressecamento. Materiais amplamente graduados suscetíveis à segregação		Baixa variabilidade de materiais nas áreas de empréstimo. Baixo potencial de retração por ressecamento. Graduação estreita.

Tabela 2.2 – Ligação entre a descrição verbal e a probabilidade (modificado Foster & Fell, 2000)

Descrição verbal	Probabilidade
Evento é quase certo	0,99
Evento é muito provável	0,90
Evento não é provável	0,50
Evento é muito improvável	0,10
Evento é quase improvável, mas fisicamente não pode ser descartado	0,01

O uso da análise qualitativa pode ser bastante interessante para obter a identificação de riscos que requerem um estudo mais detalhado, ou seja, pode ser utilizada como uma análise preliminar. Muitas vezes também é suficiente para determinados tipos de decisões, mas também pode ser a única possível, como nos casos em que os dados numéricos são

inadequados para uma análise quantitativa. Já na análise semiquantitativa, o objetivo é somente produzir uma escala mais ampla de classificação e não o de sugerir valores realísticos de risco como os obtidos em uma análise quantitativa. Assim, deve-se ter cuidado ao interpretar seus resultados. As análises quantitativas usam valores numéricos, oriundos de várias fontes, assim, a qualidade da análise dependerá da precisão e qualidade desses valores e da validade do modelo adotado (AS/NZS, 2004).

Segundo Bowles *et al.* (1997), a análise quantitativa permite aos engenheiros abastecer os tomadores de decisão com valores das probabilidades de ocorrência dos riscos, além do valor das incertezas associadas a estas probabilidades. Juntos, estes valores caracterizam o desempenho da barragem e, se estimados também para os modelos que incorporam alternativas de mitigação dos riscos, proporcionam uma importante ferramenta de análise comparativa que resulta na escolha da solução mais eficaz. Ainda segundo os autores, é importante perceber que o processo de condução de uma análise quantitativa resulta também em benefícios qualitativos, tais como percepções sobre a importância relativa dos vários modos de falhas, tipos e faixas de carregamento, além do potencial valor que será agregado ao se realizar determinadas análises adicionais ou novas investigações de campo.

Em uma análise quantitativa, duas técnicas de análise são comumente utilizadas para auxiliar a quantificação da probabilidade de ocorrência de um acidente: a *Árvore de Falhas (Fault Tree - FT)* e a *Árvore de Eventos (Event Tree - ET)*. A FT é um modelo construído usando a lógica indutiva ou “de trás para frente”. O processo se inicia com a hipotética falha do sistema (ou subsistema), que é chamado Evento de Topo, e trabalha de trás para frente identificando quais combinações de falhas podem dar origem à falha superior (Bier, 1997). Um exemplo de árvore de falhas é ilustrado na Figura 2.7.

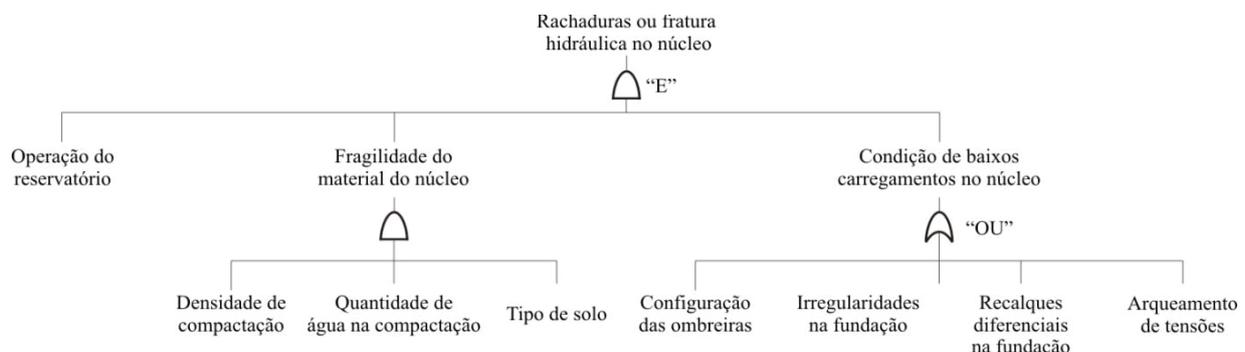


Figura 2.7 – Exemplo de Árvore de Falhas (Modificado Foster & Fell, 2000)

Em contraste, a ET é construída utilizando a lógica dedutiva ou “para frente”, assim, em vez de fazer a hipótese da falha do sistema, o processo se inicia com a hipótese do evento iniciador e, desta forma, caminha para frente identificando todas as possíveis combinações de eventos subsequentes e determinando quais sequências de eventos podem culminar na falha do sistema como um todo (Bier, 1997). Um exemplo de árvore de eventos é mostrado na Figura 2.8.

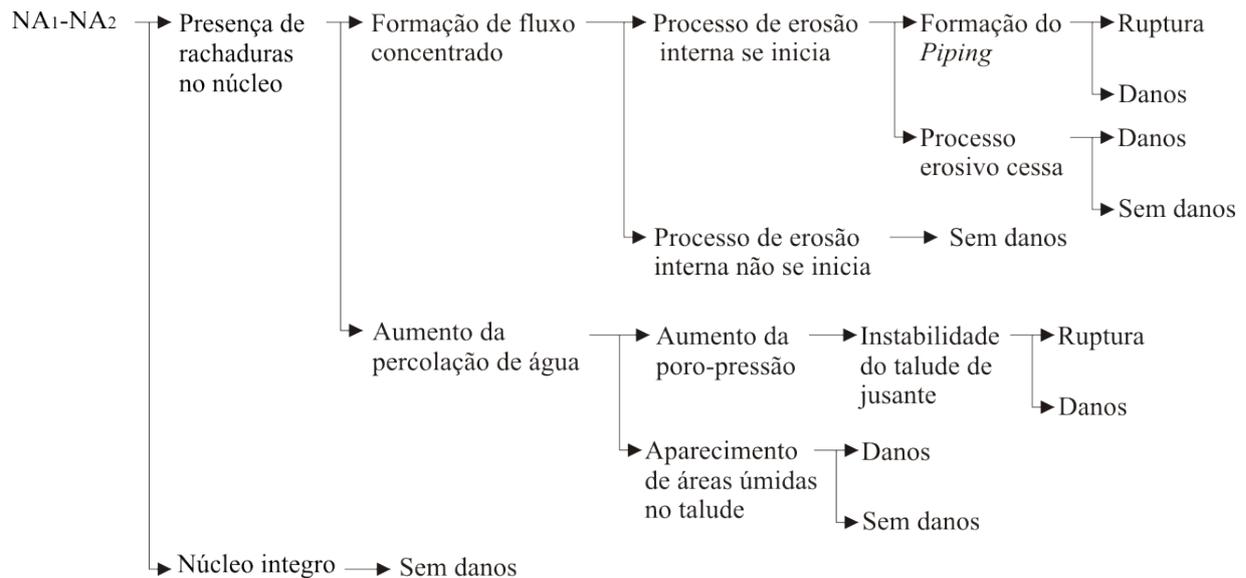


Figura 2.8 – Exemplo de Árvore de Eventos (modificado Foster & Fell, 2000)

Bier (1997) ressalta que a ET desempenha melhor o papel de mostrar a ordem dos eventos, bem como as dependências entre eles. É considerada uma forma muito útil que facilita a comunicação sobre as hipóteses feitas no modelo de risco. Contudo, em função de apresentar as várias combinações dos sucessos e das falhas de seus subsistemas, os modelos rapidamente se tornam muito grandes, com inúmeras sequências. Já a FT é uma forma mais compacta de representar as combinações entre os eventos, porém pode mascarar suas dependências e ordem cronológica. Desta forma, para sistemas muito complexos, geralmente a ET é utilizada para modelar os cenários e a FT para quantificar as probabilidades de falhas dos vários cenários, ou seja, cada falha definida numa ET pode ser desmembrada em uma FT, conforme ilustrado na Figura 2.9.

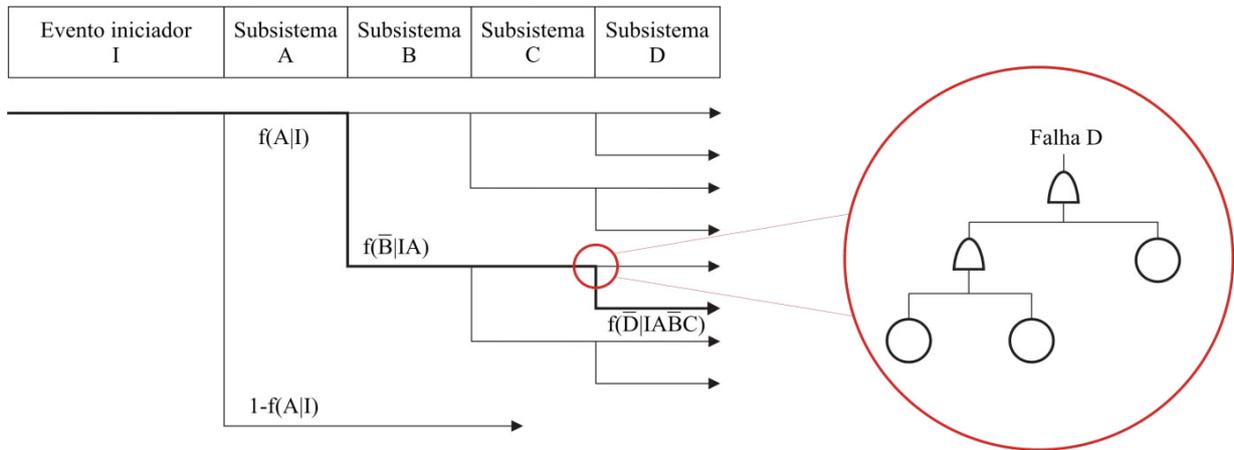


Figura 2.9 - Interrelação da ET com a FT (modificado - Bier, 1997).

A árvore de eventos simplificada, representada na Figura 2.9, foi desenhada de forma que após uma ramificação, o ramo superior representasse um sucesso e o ramo inferior representasse uma falha de um evento qualquer. Sua utilidade é demonstrar como a árvore de eventos pode ser utilizada para a quantificação da probabilidade de ocorrência de um determinado cenário (sequência de acontecimentos). Seguindo o caminho grifado (nomeado de Cenário 6) observa-se que o evento inicial I é seguido pelo sucesso do subsistema A, falha do B, sucesso do C e falha do D, desta forma, este cenário seria quantificado da seguinte forma (Bier, 1997):

$$\theta(6) = \theta(I) f(A|I) f(\bar{B}|IA) f(C|IAB) f(\bar{D}|IABC) \quad (2.1)$$

Onde:

$\theta(6)$ é a frequência do cenário 6;

$\theta(I)$ é a frequência do evento inicial I;

$f(A|I)$ é a probabilidade condicional do subsistema A ser bem sucedido, dado que I ocorreu;

$f(\bar{B}|IA)$ é a probabilidade condicional do subsistema B falhar, dado que I ocorreu e que A foi bem sucedido;

$f(C|IAB)$ é a probabilidade condicional do subsistema C ser bem sucedido, dado que I ocorreu, A foi bem sucedido e B falhou;

$f(\bar{D}|IABC)$ é a probabilidade condicional do subsistema D falhar, dado que I ocorreu, A foi bem sucedido, B falhou e C foi bem sucedido.

2.1.1.3 - Consideração das incertezas associadas aos riscos

Wilson & Shlyakhter (1997) recordam que a palavra risco remete a incertezas, portanto, a tarefa de um avaliador de riscos é a de se utilizar de qualquer informação disponível para obter um número compreendido entre zero e um para estimar o risco, com a maior precisão possível, contudo, junto com uma estimativa da imprecisão, ou seja, da incerteza.

Chauhan & Bowles. (2003) comentam que a maioria das análises de risco voltadas para a segurança de barragens vem sendo conduzida somente com a utilização de melhores estimativas como dados de entrada. Em alguns casos, análises de sensibilidade têm sido realizadas. Nestas, uma faixa de valores estimados são utilizados para verificar a robustez das justificativas para as decisões resultantes de avaliações de risco. Entretanto, ressaltam que estas práticas são limitadas, pois delas não se obtém a distribuição de incertezas dos resultados.

Segundo Bowles *et al.* (1997), a gestão de segurança de barragens é intrinsecamente um problema de controle de riscos e de tomada de decisões sob condições de incertezas. Bowles (2003) ressalta que, apesar da abordagem tradicional também considerar riscos e incertezas, é somente no processo de gestão de riscos que estes são considerados de forma explícita e, por isso, embasam o tomador de decisões com um melhor entendimento das implicações que resultam da aceitação ou não de um determinado risco. Almeida (2001) lembra ainda que do ponto de vista lexical, a palavra segurança traduz não só o grau de firmeza ou de certeza na concretização da capacidade estrutural da barragem, mas, também, o grau de confiança ou de tranquilidade em relação ao comportamento da mesma.

As incertezas são intrínsecas aos vários dados de entrada e também aos vários processos adotados em engenharia. Não reconhecê-las explicitamente reflete na confiabilidade dos resultados obtidos. A Figura 2.10 ilustra algumas fontes de incertezas embutidas numa análise de riscos e a Figura 2.11 resume algumas incertezas referentes aos dados de entrada usualmente considerados nas fases de projeto, construção e operação de barragens.

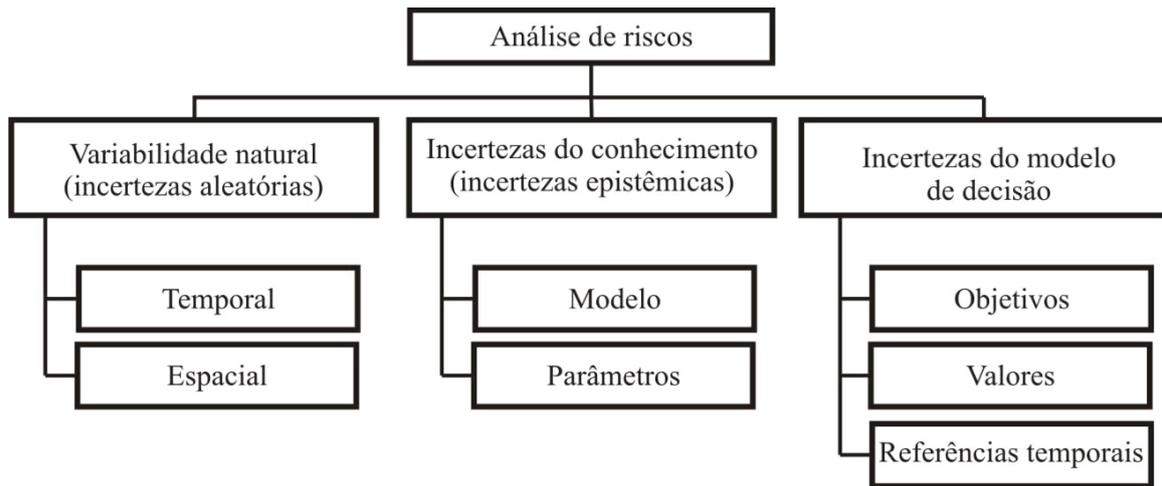


Figura 2.10 – Incertezas aleatórias, epistêmicas e do modelo de decisão em análises geotécnicas de confiabilidade (Baecher & Christian, 2008).

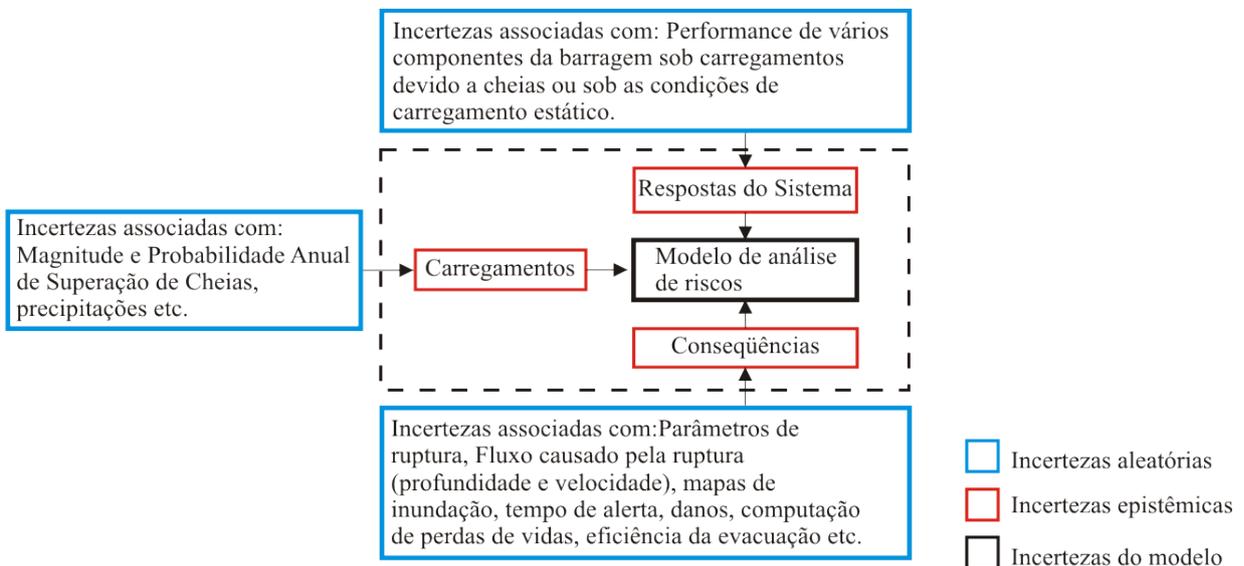


Figura 2.11 - Algumas incertezas associadas aos dados de entrada necessários para estudo da barragem (modificado – Chauhan & Bowles, 2003).

Numa análise de riscos, os dados de entrada são caracterizados por meio de distribuições de probabilidade que, quando combinadas, resultarão em distribuições de probabilidade dos resultados e sua respectiva confiabilidade. Assim, nos modelos, cada parâmetro de incerteza pode ser representado por uma distribuição de probabilidade. O tamanho e a forma da distribuição definem o alcance dos valores que os parâmetros podem assumir e sua probabilidade relativa (Vose, 1997). Para representar as incertezas dos dados de entrada, as quais darão origem às distribuições de probabilidade dos resultados, podem ser utilizadas distribuições pré-definidas, que melhor se ajustem aos dados existentes ou que já sejam

conhecidas como a que melhor represente a variável (Normal, Log-Normal, BetaPERT etc.), distribuições modeladas a partir da opinião de especialistas (Uniforme, Triangular, Cumulativa, Discreta, BetaPERT) ou distribuições que são moldadas a partir de dados disponíveis (Geral).

A Figura 2.12 apresenta alguns exemplos de distribuições e suas variações, resultantes de uma maior ou menor precisão da variável em questão (x).

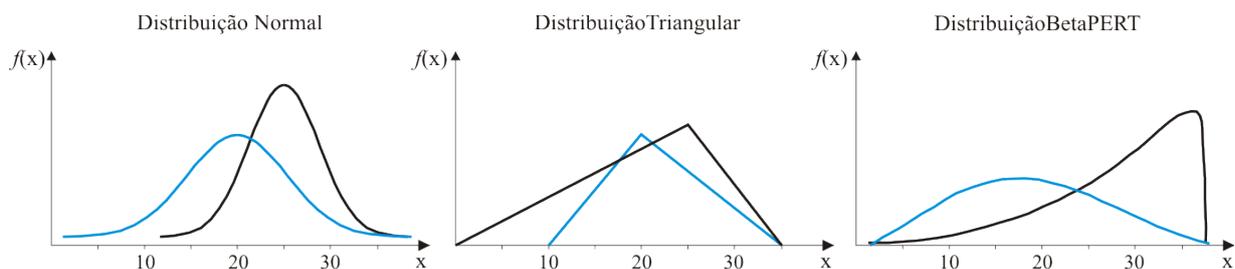


Figura 2.12 – Exemplos de distribuições de probabilidade

A análise das incertezas dos dados de entrada gera estimativas das distribuições das incertezas para os resultados da análise dos riscos (probabilidade de ruptura, probabilidade de perda de vidas e custo dos riscos etc.). Assim, dispondo das distribuições dos dados de entrada, técnicas numéricas podem ser utilizadas para avaliar os riscos e as incertezas dos resultados.

Um exemplo de técnica numérica que vem sendo bastante utilizada é a simulação de Monte Carlo, contudo outras podem ser utilizadas como, por exemplo, as de FOSM e Rosenblueth. A utilização destas técnicas permite ao analista atribuir distribuições probabilísticas para todos os componentes (incertos) de um modelo matemático e determinar, por meio de uma amostragem aleatória de valores (oriundos destas distribuições), a distribuição dos potenciais resultados que podem ocorrer.

Método de Monte Carlo

Uma das aplicações do método de Monte Carlo consiste no estudo do comportamento de processos randômicos. Nestes, os dados de entrada são estocásticos, ou seja, determinados pelas leis da probabilidade (aleatórios), e os resultados são incertos. O método de Monte Carlo é particularmente efetivo quando o processo é fortemente não-linear ou quando envolve

muitos dados de entrada incertos, os quais podem ter distribuições distintas (Baecher & Christian, 2008).

Para desenvolver um estudo destes, o analista gera um valor aleatório de cada variável incerta e faz os cálculos necessários para obter uma solução com este conjunto de valores. Isso gerará uma amostra do processo. Este procedimento é repetido várias vezes, resultando em várias amostras do processo. Uma vez que um grande número de rodadas é completado torna-se possível estudar os resultados estatisticamente para obter os valores de média, variância, probabilidades de vários percentis e outros parâmetros estatísticos (Baecher & Christian, 2008). Os autores ressaltam que independentemente do número de variáveis aleatórias utilizadas, a cada rodada apenas um resultado é obtido do processo, que é a amostra desta rodada. Desta forma, o aumento do número de variáveis aleatórias como dado de entrada não aumenta o número de rodadas, para um mesmo nível de precisão.

2.1.2. Apreciação dos riscos

Independente da categoria utilizada, os resultados desta Análise de Riscos são, por fim, confrontados com os critérios pré-estabelecidos e, dependendo do atendimento ou não destes critérios, as decisões são tomadas. É importante mencionar, contudo, que estes critérios de Apreciação dos Riscos são na verdade julgamentos de valor e, portanto, de caráter não técnico.

Essa característica, segundo Bowles (2007), reside no fato de que as barragens representam ameaças não só para pessoas, mas também para a economia, para a estrutura social, bem como para a sobrevivência de organizações públicas ou privadas, proprietárias do empreendimento. As consequências, portanto, dizem respeito à sociedade como um todo, e, desta forma, é completamente compreensível que os critérios de riscos toleráveis ou aceitáveis retratem os interesses da comunidade e assim deve ser determinado por meio de um processo político baseado em valores sociais.

Existem hoje diversas diretrizes que apresentam limites de tolerabilidade de riscos, dentre elas, três são identificadas por Bowles (2007) como sendo aquelas que vêm sendo aplicadas em segurança de barragens: *UK HSE Tolerability of Risk Guidelines*, *ANCOLD Guidelines on Risk Assessment* e *USBR Public Protection Guideline*. Apesar de as diretrizes diferirem entre

si em alguns valores ou na ênfase dada a alguns dos critérios, todas têm como fundamento os chamados critérios puros de apreciação, que são a Equidade (premissa de que todos os indivíduos têm direitos incondicionais a certos níveis de proteção), a Utilidade (comparação entre o benefício incremental das medidas adotadas para prevenir o risco e o custo da medida) e Tecnologia (idéia de que um nível satisfatório de prevenção do risco é atingido quando o estado da arte das medidas de controle corresponde efetivamente àquelas aplicadas para controlar os riscos, quaisquer que sejam as circunstâncias).

2.2. Uso da avaliação de riscos na engenharia de barragens

Em Segurança de Barragens, a aplicação da Avaliação de Riscos tem variado em função dos esforços necessários e dos resultados almejados. As categorias de aplicações que vem sendo utilizadas, elencadas por Bowles (2003), são descritas e brevemente comentadas:

- Identificação dos modos de falhas (*Failure modes identification*) – Considerado como uma etapa preliminar na realização de uma Avaliação de Riscos. Poderia ser utilizada como uma prática padrão para as abordagens tradicionais voltadas para a apreciação de projetos de segurança de barragens. Permite uma apreciação mais ampla da segurança da barragem e uma base para fortalecer muitos aspectos do programa de segurança (monitoramento visual e por instrumentos, planos de operação e manutenção etc.). Consistem em uma abordagem de diagnóstico qualitativo e não uma ferramenta para tomada de decisões;
- Lista de Priorização (*Index prioritization*) – Esta abordagem é útil e vem sendo muito utilizada para priorizar temas e investigações relacionados à segurança de barragens, mas deve ser calibrada e incorporar uma medida de risco (*risk metric*) para ser considerada baseada em risco (*risk-based*);
- Avaliação de Riscos em portfólio (*Portfolio risk assessment*) – Esta abordagem é útil e muito aceita para priorizações baseadas na relação custo-eficiência de medidas mitigadoras voltadas para a segurança e futuras investigações de um grupo de barragens. Proporciona percepções as quais podem melhor informar os proprietários sobre as implicações tanto nos aspectos legais como nos dos negócios, decorrentes desta posse;
- Avaliações de Riscos Quantitativas (*Quantitative risk assessment*) – Esta abordagem é útil para promover percepções e compreensão sobre os modos de falha e, com isso, os riscos que os investidores correm (probabilidade e conseqüências). Incertezas nos dados de entrada e nos resultados devem ser consideradas. Ferramentas desenvolvidas para a estimação das

probabilidades e das consequências são necessárias e critérios de riscos aceitáveis / toleráveis necessitam ainda de aprimoramento e de aceitação global.

3. RUPTURA DE BARRAGENS E SEUS MECANISMOS

Para embasar a elaboração da árvore de eventos, torna-se premente a compreensão dos principais mecanismos físicos envolvidos nos casos de acidentes e / ou rupturas envolvendo barragens. Uma maneira de se fazer isso é por meio do estudo de casos históricos e da literatura técnica. Neste capítulo são abordados dados estatísticos sobre incidentes ocorridos com barragens e os processos envolvidos em rupturas.

3.1. Frequência histórica de acidentes e rupturas envolvendo barragens

A frequência histórica de acidentes e rupturas pode ser avaliada de maneira global, envolvendo casos ocorridos em qualquer país, ou regionalizada, de onde se pode extrair singularidades decorrentes de características locais. Entretanto, ambas as abordagens agregam informações valiosas aos estudiosos e, portanto, devem, sempre que possível, ser consideradas.

3.1.1. Estatística global

Como parte de um projeto de pesquisa que engloba o estudo de métodos para a estimação da probabilidade de ruptura de barragens geotécnicas para uso em Avaliações de Risco Qualitativas, Foster *et al.* (2000) trataram estatisticamente dados de incidentes ocorridos em grandes barragens e em barragens de menor porte, desde que tivessem rompido especificamente por *piping* ou instabilidade de taludes. Este trabalho teve dois componentes principais: aumentar o detalhamento dos estudos existentes sobre o assunto, agregando novas informações como zoneamento da barragem, geologia de fundação e características dos materiais que compunham o maciço, e o de estimar uma frequência histórica de ruptura.

Foi analisado um total de 11.192 barragens, representando cerca 300400 anos de operação (até 1986). Nesta amostragem, foram registrados 136 casos de ruptura, assim, as frequências de ruptura média e anualizada foram calculadas utilizando as seguintes equações:

$$\text{Frequência_Média} = \frac{\text{Número_de_rupturas}}{\text{Número_total_de_barragens}} \quad (3.1)$$

$$\text{Frequência Anual} = \frac{\text{Número de rupturas}}{\text{Número barragem ano}} \quad (3.2)$$

A frequência média de ruptura obtida foi de 0,012, valor este que se reduz para 0,011 quando considerado apenas rupturas envolvendo barragens que se encontravam em operação. Isso significa que de cada grupo composto de 100 barragens construídas, uma se rompe. Já a frequência anual de ruptura foi de $4,5 \times 10^{-4}$ e de $4,1 \times 10^{-4}$, respectivamente. Diferentemente da frequência média, a frequência anual insere o fator tempo na análise. Assim, para o mesmo grupo de 100 barragens, a probabilidade de ruptura anual é de 0,045, portanto, a cada 22 anos (tempo de operação médio do grupo), uma barragem se romperia.

Em seus estudos, Foster *et al.* (2000) investigaram os modos pelos quais as barragens se romperam, para isso, trabalharam com os 128 casos que continham informações detalhadas que permitiam a classificação pelo modo de ruptura. Os resultados estão transcritos na Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Estatística geral para grandes barragens geotécnicas até 1986, excluindo barragens construídas no Japão pré-1930 e na China (Foster *et al.*, 2000)

Modo de ruptura	Nº de casos		% de rupturas (onde modo é conhecido)		Frequência média de ruptura ($\times 10^{-3}$)	
	Rupturas (total)	Ruptura em Operação	Rupturas (total)	Rupturas em operação	Rupturas (total)	Rupturas em operação
Galgamento e estrut. auxiliares						
Galgamento	46	40	35,9	34,2	4,1	3,6
Vertedouro-comporta	16	15	12,5	12,8	1,4	1,3
Subtotal	62	55	48,4	47,0	5,5	4,9
Piping						
Através do maciço	39	38	30,5	32,5	3,5	3,4
Através da fundação	19	18	14,8	15,4	1,7	1,6
Do maciço para a fundação	2	2	1,6	1,7	0,18	0,18
Subtotal	60	57	46,1	48,7	5,3	5,1
Escorregamento (taludes)						
Montante	6	4	4,7	3,4	0,54	0,36
Jusante	1	1	0,8	0,9	0,09	0,09
Subtotal	7	5	5,5	4,3	0,63	0,45
Terremoto-liquefação						
Terremoto-liquefação	2	2	1,6	1,7	0,18	0,18
Modo desconhecido	8	7				
Nº total de rupturas	136	124			12,2 (1,2%)	11,1 (1,1%)
Nº total de falhas (modo de ruptura é conhecido)	128	117				
Nº de barragens de terra	11.192	11.192				

Nota: Os subtotaís e os totais não somam necessariamente 100%, pois em alguns casos foram atribuídos mais de um modo de ruptura.

Observa-se nos dados tabelados que as rupturas por galgamento, *piping* e instabilidade de taludes abrangem quase a totalidade dos casos registrados e que os dois primeiros modos representam cerca de 95% dos casos. Uma das explicações para esta característica é o fato de as técnicas de análise e das ferramentas disponíveis para a avaliação da estabilidade de taludes estarem bem desenvolvidas enquanto os mecanismos erosivos envolvidos nos demais casos ainda não são bem compreendidos (Foster *et al.*, 2000).

Outro resultado do trabalho é a estatística de ruptura por categoria de zoneamento de barragens, resumido na Tabela 3.2. Pode-se observar um grande número de rupturas por *piping* ocorrendo em barragens de terra homogênea. Isso se deve ao fato de que, nessas, quase não se tem controle sobre a percolação, o que fica evidente quando se compara com a queda no número de rupturas daquelas em que se utilizam do filtro.

Tabela 3.2 - Estatística das rupturas por *piping*, galgamento e instabilidade de taludes por categoria de zoneamento de barragens (modificado de Foster *et al.*, 2000)

Categoria de zoneamento da barragem	% da população	Rupturas			
		Número de casos	<i>Piping</i>	Galgamento	Instabilidade de taludes
Terra homogênea (sem filtro)	9,5	23	16	6	1
Terra homogênea com filtro	15	4	2	2	0
Terra homogênea c/ enrocamento de pé	6,1	9	9	0	0
Terra zoneada	35,9	7	5	2	0
Terra e enrocamento	9,3	4	2	1	1
Enrocamento com núcleo de argila	8,4	4	0	3	1
Terra com face de concreto	4,1	5	5	0	0
Enrocamento com face de concreto	2,8	1	0	1	0
Terra com núcleo de argila compactada	4,7	4	4	0	0
Terra com núcleo de concreto	2,4	7	2	4	1
Enrocamento com núcleo de concreto	0,9	0	0	0	0
Aterro hidráulico	0,9	3	1	0	2
Outros	-	4	3	1	0
Desconhecido	-	38	11	26	1
Total	100	113	60	46	7

Notas: 1) Os subtotais e os totais não somam necessariamente 100%, pois em alguns casos foram atribuídos mais de um modo de ruptura. 2) No número total de casos não estão computados as rupturas ocorridas por outros modos.

Outra constatação foi a importância que a evolução da mecânica dos solos e da engenharia geotécnica teve após 1940, uma vez que repercutiu positivamente na redução do número de incidentes, como pode ser observado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Estatística geral para grandes barragens geotécnicas construídas antes e depois de 1950 (até 1986) (Foster *et al.*, 2000).

Classes de barragens	Construídas antes de 50	Construídas depois de 50	Todas as barragens
Nº de barragens construídas	2356	8836	11 192
Nº de rupturas (todos os modos de ruptura)	88	48	136
Nº de rupturas (modo de ruptura estruturais)	41	25	66
Frequência média de ruptura (todos os modos de ruptura)	$3,8 \times 10^{-2}$	$0,5 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$
Frequência média de ruptura (modo de ruptura estruturais)	$1,7 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,6 \times 10^{-2}$
Frequência média anual de ruptura (todos os modos de ruptura)	$8,6 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-4}$
Frequência média anual de ruptura (modo de ruptura estruturais)	$3,6 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$

Nota: modos de ruptura estruturais englobam *piping*, instabilidade de taludes e terremotos.

3.1.2. Estatística brasileira

No Brasil, a construção de barragens foi ditada principalmente pela necessidade de açudes destinados à acumulação de água para abastecimento humano e, posteriormente, foi impulsionada pela necessidade de geração de energia elétrica. Contudo, muitas barragens também foram construídas para fins de irrigação, mineração e controle de cheias. A engenharia de barragens brasileira passou a ser reconhecida internacionalmente como sinônimo de qualidade, empreendedorismo e técnica, apesar de incidentes envolvendo barragens não serem raros no país.

Uma grande parte das barragens brasileiras é composta de obras antigas com mais de 30 anos, muitas das quais foram projetadas e construídas segundo critérios que não mais atendem aos requisitos mínimos atuais. Questões como as técnicas de compactação pouco eficientes e a inexistência de drenagens, são observadas em várias barragens antigas. Outra constatação é a existência de obras que geralmente não são corretamente mantidas e operadas ao longo do tempo, assim, algumas já estão com sua capacidade operacional limitada e, dependendo do nível de degradação sofrido, representam verdadeiras ameaças à segurança de pessoas e bens.

Outra questão que envolve as barragens antigas refere-se à capacidade de vertimento de suas estruturas extravazoras. Com a inclusão de novos dados na série histórica de vazões do rio barrado, o que se dá ao longo do tempo, a capacidade de vertimento deveria ser reavaliada em função do novo valor da vazão de cheia, pois, geralmente, nestes casos, a vazão de projeto resultante de novos estudos passa a ser maior que a anterior, principalmente devido à ação antrópica, que resulta no aumento do escoamento superficial. Isso significa que muitos

vertedouros podem não ter mais a capacidade para suportar a passagem da vazão de cheia de forma segura.

Entretanto, o custo de adequação dessas obras buscando atingir os critérios atuais de dimensionamento, é, na maioria das vezes, muito elevado e em alguns casos tecnicamente muito complexo. Desta forma, não raro, as barragens brasileiras são simplesmente mantidas em operação da forma como se encontram e, dependendo da importância da barragem e da gravidade de sua situação, apenas intervenções emergenciais são executadas. O descomissionamento dificilmente é considerado como uma opção e o abandono uma prática comum.

Já para as barragens mais recentes, os incidentes que ocorrem geralmente estão associados à baixa qualidade tanto de projetos quanto de construções, apesar de, com as ferramentas e equipamentos disponíveis, facilidade e viabilidade de realização de ensaios de campo e laboratório, estado do conhecimento etc., ser perfeitamente possível projetar, construir, manter, operar e descomissionar obras de médio e grande porte com alto grau de confiabilidade e segurança.

IPT (2007) constata que, com as grandes obras migrando do domínio público para o privado, visando à celeridade na realização das obras e um menor preço de mercado, houve um rearranjo das formas até então tradicionais de parceria na construção, operação e exploração das grandes obras. Assim, “os diferentes tipos de obras, projetos e serviços especializados associados aos novos empreendimentos passaram a ser desmembrados em várias partes articuladas, naturalmente sob a liderança competente, alocadas a grupos *ad hoc*, atuando em regime de estreita cooperação e interdependência, perfeitamente adequada às novas circunstâncias”.

Entretanto, ainda segundo IPT (2007), “uma das consequências mais significativas dessas novas modalidades contratuais foi um aumento significativo da frequência de insucessos parciais durante a implementação e operação dos novos empreendimentos”, diante disso, continua o autor, “dificuldades construtivas e operacionais, não antevistas e não devidamente equacionadas, capazes de comprometer a funcionalidade e rentabilidade das novas concessões, passaram a constituir riscos a serem, em princípio, quase exclusivamente assumidos pelas Concessionárias. Suas consequências negativas, tais como custo final acima

do previsto, comprometimento do desempenho operacional, atrasos na exploração comercial, penalidades diversas etc. passaram a poder afetar severamente a reputação e o equilíbrio financeiro dos investidores”.

As empresas foram, portanto, forçadas a economizar recursos, contudo, nem sempre esta economia foi atingida por meio de um aumento de eficiência, como com a adoção de práticas de gerenciamento modernas, mas, muitas vezes, foi obtida com a redução de quadros técnicos qualificados, bem como da qualidade de materiais e dos serviços realizados. Apesar de este fato não poder ser generalizado para todas as empresas, é inegável que muitas das decisões de engenharia passaram a ser afetadas por esse ambiente, o que pode repercutir de forma negativa na questão da segurança das barragens.

Todos os anos são registrados no Brasil casos de acidentes e rupturas envolvendo barragens, geralmente associados a eventos meteorológicos extremos que resultam em aumento de vazões. Não existe registro oficial sobre o número e tipo de incidentes, causas prováveis ou dos danos causados, entretanto estudo realizado por Menescal (2009) mostra que só nos últimos nove anos cerca de 140 casos foram noticiados pela imprensa local, dos quais metade são casos de ruptura. A Figura 3.1 apresenta de forma gráfica a frequência de ruptura e acidentes de barragens brasileiras resultante da interpretação do compendio de incidentes coletados pelo autor, limitado ao período compreendido entre 2000 e 2008. Ressalta-se que estes dados têm como fonte principal reportagens noticiadas pela imprensa.

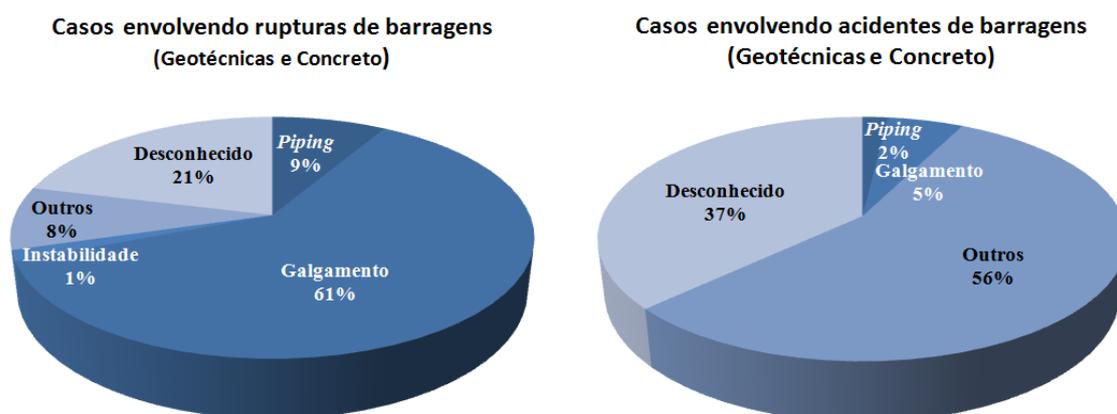


Figura 3.1 - Frequência de incidentes com barragens brasileiras reportados pela imprensa escrita entre 2000 a 2008.

Entretanto, um dos problemas enfrentados por Menescal (2009) reside no fato de que este tipo de informação contém uma grande imprecisão, uma vez que a categorização do tipo de incidente ocorrido depende muitas vezes da interpretação do fato noticiado, o qual, geralmente, não possui detalhes técnicos suficientes. Assim, no gráfico da Figura 3.1, optou-se categorizar como Desconhecido, os modos de ruptura ou tipos de acidentes nos quais não se tinha detalhamento suficiente na lista que permitisse sua identificação e, como Outros, quando outras formas, que não as três principais, eram informadas.

Outro importante fator que impede a determinação da frequência média de rupturas e acidentes envolvendo barragens brasileiras é que o número total de barragens construídas no país também é desconhecido. Entretanto, um levantamento, realizado por meio da análise de imagens de satélite, classificou cerca de 7.000 espelhos d'água, com área superficial igual ou superior a 20 hectares como barragens localizadas dentro do Brasil. Na região nordeste, onde também foram estudadas aquelas com área igual ou superior a 5 hectares, obteve-se cerca de 11.000 barragens (MI, 2008). A distribuição dessas supostas barragens pelo território nacional encontra-se ilustrado na Figura 3.2.

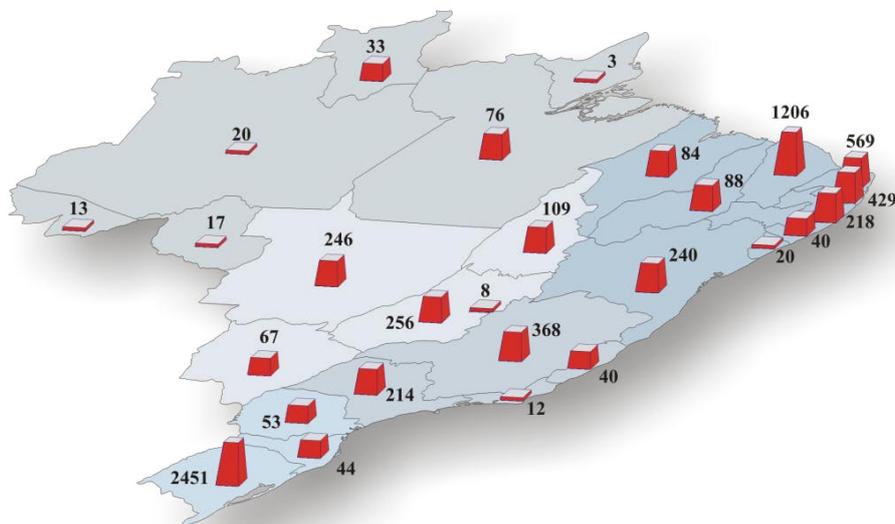


Figura 3.2 – Número de reservatórios estimados por estado (espelho d'água superior a 20 ha).

3.2. Estudo dos processos envolvidos na ruptura de barragens

Como resultado de uma ruptura, certo volume do líquido armazenado pela barragem se perde e, dependendo de sua quantidade e da velocidade com que atinge áreas habitadas ou infraestruturas, dita o grau do dano e a gravidade das consequências. Quando uma barragem se rompe, danos às propriedades também são certos, mas as perdas de vidas humanas podem variar drasticamente com a extensão da área de inundação, o tamanho da população em risco e a quantidade de tempo disponível para o alerta (DSO, 1998). O tempo total de uma ruptura pode se situar num intervalo de poucos minutos a poucas horas, dependendo da altura da barragem, tipos de materiais utilizados na construção, grau de compactação dos materiais e magnitude e duração do fluxo que escoar do reservatório (Fread, 1984).

No entanto, o volume liberado e a dimensão da onda de cheia são função do tamanho da brecha que se forma na barragem como resultado de processos erosivos resultantes da passagem de água com alta energia pelo maciço (Figura 3.3). DSO (1998) declara que “A análise de ruptura de uma barragem de terra pode ser vista (tratada) como um processo de duas etapas: primeiramente, a brecha na barragem deve ser analisada, depois, o fluxo que sai da brecha deve ter sua rota vale abaixo conhecida para se determinar a enchente resultante nos centros populacionais.

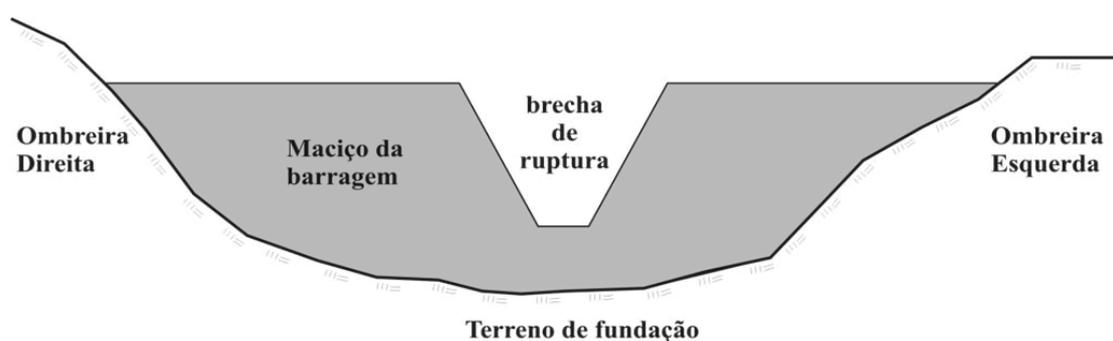


Figura 3.3 – Visão frontal da barragem mostrando configuração teórica da brecha de ruptura.

Para populações localizadas bem à jusante da barragem, o detalhe do processo da formação da brecha tem poucos efeitos no resultado do estudo, uma vez que o tempo de viagem, a atenuação e outros efeitos da rota é que predominaram. Entretanto, nos casos em que as populações se localizam próximas às barragens, a previsão acurada dos parâmetros da brecha torna-se crucial para a análise das consequências. Nestes casos, se os parâmetros da brecha

não puderem ser antevistos com uma razoável precisão, pode ser necessário o aumento do conservadorismo com o respectivo aumento dos custos (DSO, 1998).

3.2.1. Estudos sobre a abertura da brecha

Ainda segundo (DSO, 1998), a grande maioria das abordagens recai ou em dados oriundos de estudos de caso de rupturas ocorridas no passado ou em modelos numéricos que não simulam os mecanismos erosivos e os regimes de fluxo relevantes para a formação de brecha na barragem. Os estudos de casos fornecem apenas informações limitadas como profundidade final, largura e forma, descarga de pico, lâmina d'água máxima no galgamento, tempo máximo de drenagem total do reservatório ou da ruptura total da barragem, baseadas em uma pequena amostragem de rupturas de barragens, composta, principalmente, daquelas de pequeno porte. DSO (1998) ressalta que estudos de caso fornecem informações muito pobres para a estimativa do tempo necessário para iniciar a brecha, sua taxa de formação e do tempo total requerido para sua ruptura. Atribuiu-se este problema à dificuldade de definir o ponto exato da ruptura e às variações de interpretação, da ruptura, dada por pessoas comuns, que geralmente são as únicas testemunhas oculares da ruptura da barragem.

Já os modelos numéricos, fundamentados no comportamento físico, oferecem um potencial para detalhar melhor as informações, contudo, atualmente são reconhecidamente pouco precisos. Estes recaem sobre relações de transporte de sedimentos, os quais não são aplicáveis ou não foram testados em regimes de fluxos que ocorrem durante a abertura de brechas em barragens (DSO, 1998).

3.2.1.1 - Importância dos parâmetros físicos da brecha

DSO (1998) baseado nos estudos realizados por Singh & Snorrason e por Petrascheck & Sydler, em 1984, conclui que a importância dos diferentes parâmetros da brecha varia com o tamanho do reservatório. Para as barragens que geram reservatórios com grande volume de água acumulada, a descarga máxima, ou vazão de pico, ocorrerá quando a brecha atingir sua maior dimensão (profundidade e largura). Nestes casos, o nível do reservatório terá pouca oscilação durante o período de formação da brecha, assim, para estes casos, uma estimativa precisa da geometria final da brecha é crucial. Para pequenos reservatórios, a oscilação do nível de água do reservatório durante o processo da formação da brecha passa a ser

significativa. Desta forma, o pico do fluxo ocorre antes da configuração final da brecha e, diferentemente do caso anterior, a taxa de formação da brecha será o parâmetro fundamental. Os parâmetros geralmente adotados para representar a brecha de ruptura encontram-se ilustrados na Figura 3.4.

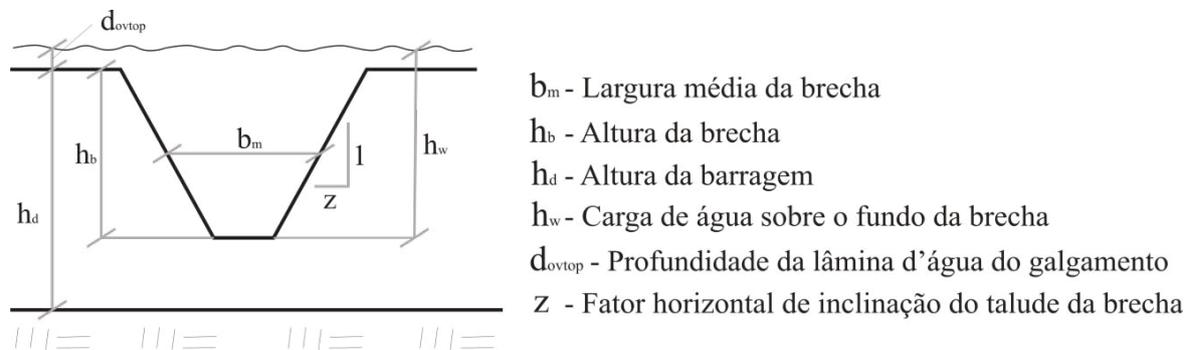


Figura 3.4 – Parâmetros normalmente adotados para representação de uma brecha de ruptura.

Os parâmetros principais que definem a brecha de ruptura são:

- Profundidade – também conhecido como altura. É a extensão vertical da brecha, medida da crista da barragem até o fundo da brecha (h_b);
- Largura – pode ser representado tanto pela largura média (b_m) quanto pelas larguras do topo e da base da brecha. Segundo DSO (1998), sua taxa de expansão e largura final afetam drasticamente o fluxo de pico e os níveis de inundação à jusante da barragem;
- Inclinação dos taludes – Juntamente com a largura e a profundidade, define a geometria da brecha. Segundo DSO (1998), a definição desta inclinação é secundária, sendo a definição de h_b e de b_m mais importante.

3.2.1.2 - Importância dos parâmetros temporais da brecha

Segundo DSO (1998), os parâmetros temporais de interesse são o tempo de iniciação da brecha e seu tempo de formação. Nestas duas fases, tanto o mecanismo quanto a taxa de erosão são completamente distintos. Na fase de iniciação da brecha, a barragem ainda não rompeu (*failed*) e o fluxo que sai da barragem ainda é pouco, uma vez que se constitui de um pequeno galgamento ou de um pequeno fluxo de um *piping* em formação ou de um canal de percolação preferencial. Durante essa primeira fase ainda é possível que a barragem resista se o galgamento ou o *piping* forem interrompidos (Figura 3.5a). Durante a segunda fase, ou seja,

a fase da formação da brecha, o fluxo e a erosão crescem rapidamente e é improvável que este fluxo e a ruptura consigam ser evitados (Figura 3.5b).

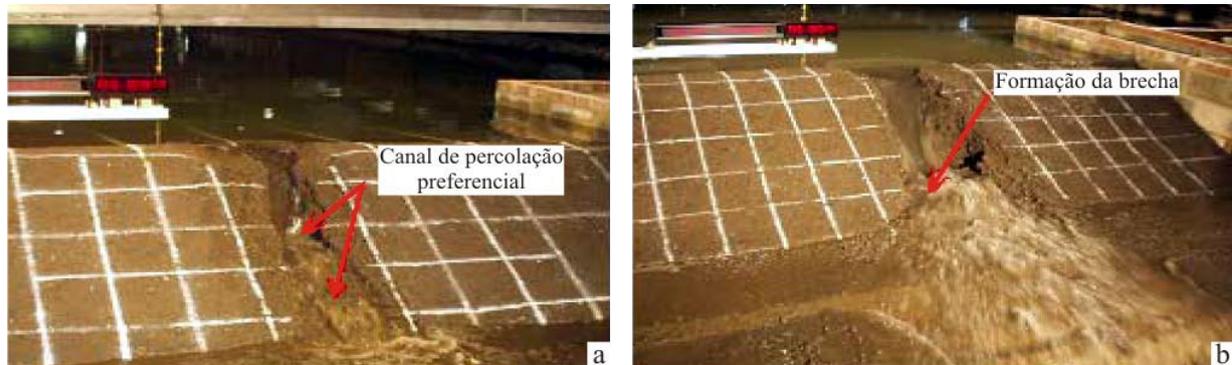


Figura 3.5 – Fases de formação da brecha de ruptura (IMPACT, 2005)

O tempo de iniciação da brecha é importante, pois acaba sendo o próprio tempo disponível para evacuação em situações mais críticas. Ele se inicia com o primeiro fluxo de água sobre ou através da barragem e termina com o início da formação da brecha. Já o tempo de formação da brecha é definido como sendo o tempo transcorrido entre a formação da primeira brecha na face do talude de montante até a formação total da mesma. Especificamente para o caso de galgamento, esse tempo se inicia somente após a erosão da face de jusante e da progressão da fenda resultante por toda extensão da crista até atingir a face de montante (DSO, 1998).

A Figura 3.6 ilustra o processo completo decorrente de uma ruptura, desde o início do problema erosivo até a chegada da onda de cheia aos centros populacionais ou infraestruturas importantes. A graduação de cor, de azul para laranja, representa a diminuição do tempo disponível, tanto para o alerta de populações, quanto para possíveis intervenções voltadas para a interrupção da ruptura e suas consequências.

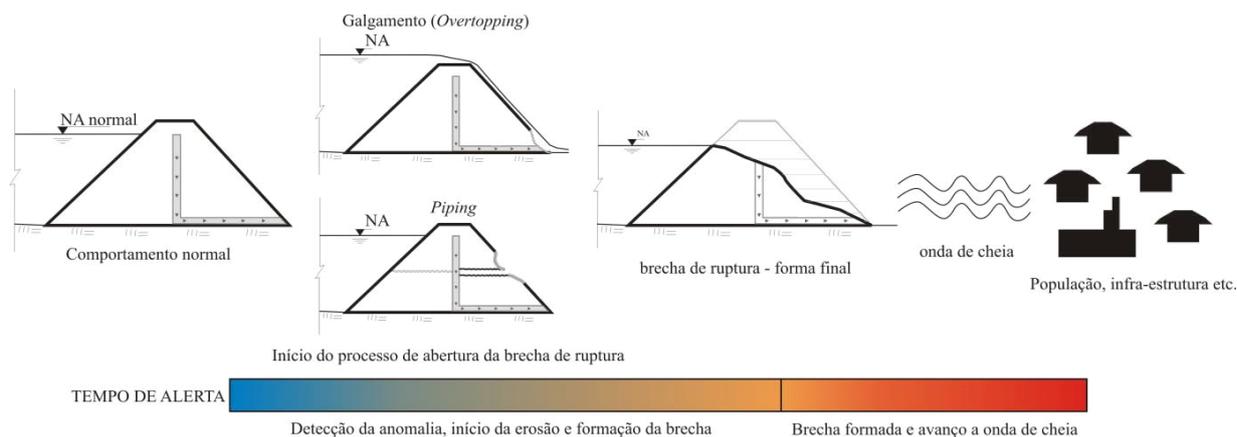


Figura 3.6 – Processo de ruptura, formação da onda de cheia e disponibilidade de tempo para alerta e ações remediadoras.

3.2.1.3 - Métodos existentes para a previsão dos parâmetros da brecha

Para se estimar os parâmetros da brecha geralmente utiliza-se de um dos seguintes métodos:

- Avaliação de casos similares e adoção de seus parâmetros;
- Utilização de equações de previsão, formuladas a partir de estudos de caso de rupturas;
- Utilização de modelos reduzidos;
- Utilização de modelos matemáticos que se baseiam em princípios hidráulicos e de transporte de sedimentos.

Uma desvantagem do primeiro método reside no fato de não existirem dados precisos e abrangentes oriundos de estudos de caso para uma grande variedade de tipos de barragens. Este problema também recai sobre o segundo método, o que dá às equações existentes um alto grau de incerteza. A Tabela 3.4 apresenta alguns exemplos de equações para previsão da geometria final da brecha obtidas por meio de estudo de casos. Modelos reduzidos, tanto para a simulação direta do caso em estudo, quanto para o estudo de comportamento de ondas de cheia, têm sido utilizados para fornecer informações que permitem a calibração e avaliação dos modelos numéricos.

O quarto método é ainda limitado devido a uma pequena compreensão dos mecanismos de evolução da brecha e da incapacidade de se modelar estes mecanismos e os processos erosivos de alta energia que os governam. Entretanto, apesar da utilização de um modelo baseado em comportamento físico ser mais difícil, é o que oferece maior potencial para resultados

mais detalhados, que permitem prever o tempo para o início da brecha e obter sua geometria parcial e final (DSO,1998).

Tabela 3.4 – Relação dos parâmetros de referência da brecha com base em estudos de caso de rupturas de barragens (modificado de DSO, 1998).

<i>Referência</i>	<i>Equações e comentários</i>
Johnson e Illes (1976)	<p>Número de barragens estudadas: Não informado</p> <p>Equações: $0,5h_d \leq B \leq 3h_d$</p> <p>Onde: h_d é a altura da barragem B é a largura da brecha</p>
Singh e Snorrason (1982)	<p>Número de barragens estudadas: 20</p> <p>Equações: $2h_d \leq B \leq 5h_d$ $0,15 \leq d_{ovtop} \leq 0,61$ $0,25 \leq t_f \leq 1,0$</p> <p>Onde: d_{ovtop} é a profundidade da lâmina d'água do galgamento na ruptura t_f é o tempo de formação da brecha (hrs)</p>
MacDonald e Lagridge-Monopolis (1984)	<p>Número de barragens estudadas: 42</p> <p>Equações: $V_{er} = 0,0261 \times (V_{out} \times h_w)^{0,769}$ (melhor ajuste) $t_f = 0,0179 \times V_{er}^{0,864}$</p> <p>Onde: V_{er} é o volume de material erodido no maciço V_{out} é o volume inicial de água que passa pela brecha h_w é a carga de água sobre o fundo da brecha no momento da ruptura</p> <p>Obs: taludes da brecha: inclinação em torno de 1H:2V</p>
FERC (1987)	<p>Número de barragens estudadas: Não informado</p> <p>Equações: $2h_d \leq B \leq 4h_d$ (variação observada: $1h_d \leq B \leq 5h_d$) $0,25 \leq Z \leq 1,0$ (p/ barragens projetadas e compactadas) $1,0 \leq Z \leq 2,0$ (p/ barragens não projetadas ou de rejeitos) $0,1 \leq t_f \leq 1hr$ (p/ barragens projetadas e compactadas) $0,1 \leq t_f \leq 0,5hr$ (p/ barragens não projetadas ou mal compactadas)</p> <p>Onde: Z é o fator horizontal de inclinação do talude de brecha (ZH: 1V)</p>
Froehlich (1995)	<p>Número de barragens estudadas: 63</p> <p>Equações: $b_m = 0,1803 \times k_0 \times V_w^{0,32} \times h_b^{0,19}$ Assumir $Z = 1,4$ no caso de galgamento e 0,9 nos demais casos</p> <p>Onde: b_m é a largura média da brecha $(b_{topo} + b_{base})/2$ $k_0 = 1,4$ no caso de galgamento e 1,0 nos demais casos V_w é o volume de água sobre a elevação do fundo da brecha no instante da abertura da brecha h_b é a altura da brecha</p>

3.2.2. Mecanismo de formação da brecha por ocorrência de *piping*

A formação do *piping* em barragens de terra ocorre segundo um dos seguintes processos (Foster *et al.*, 2000):

- Erosão regressiva, no qual a erosão se inicia no talude de jusante, no ponto de saída do fluxo percolado, e progride para montante, formando um tubo que se liga ao reservatório (Figura 3.7);

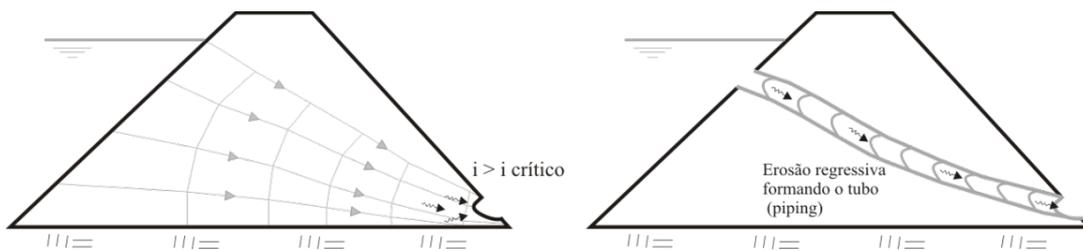


Figura 3.7 - Processo de formação de *piping* por erosão regressiva.

- Erosão em torno de trincas existentes na barragem. Essas rachaduras ou fissuras permitem a formação de um fluxo concentrado, que tem origem direta no reservatório e vai até um ponto de saída, o qual passa a erodir o solo, causando o alargamento deste caminho de água, formando o tubo (Figura 3.8);

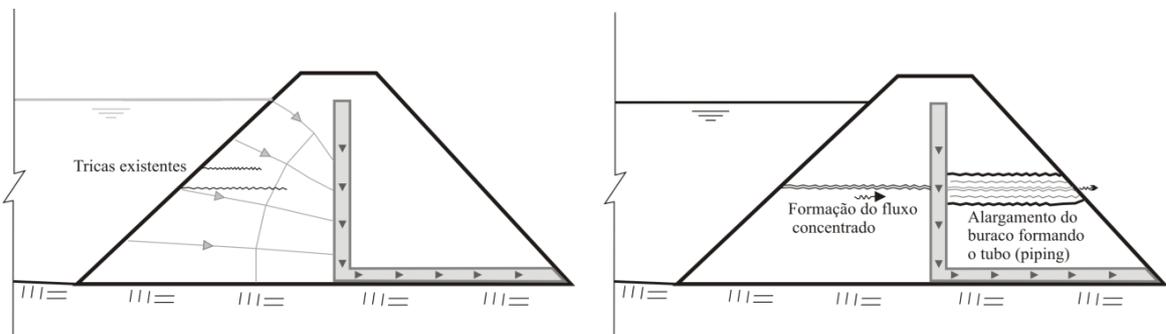


Figura 3.8 - Processo de formação de *piping* por meio do alargamento das paredes das trincas.

- Erosão devido ao carreamento de finos. Ocorre geralmente quando os materiais utilizados são mal graduados, permitindo que solos finos escapem por uma matriz granular. Esta lavagem de finos pode destabilizar internamente o solo e permitir a formação do tubo (Figura 3.9).

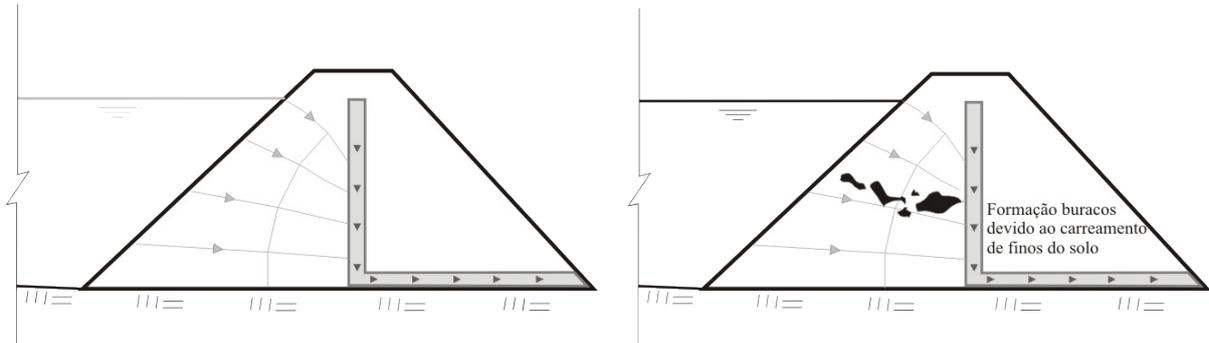


Figura 3.9 - Processo de formação de *piping* por meio do carreamento de finos.

Para Foster *et al.* (2000) os potenciais mecanismos de formação da brecha, decorrentes dos processos de *piping* listados acima, são:

- Alargamento substancial do tubo e seu desabamento;
- Rebaixamento ou formação de buracos (sinkholes) na crista, que causariam o galgamento;
- Escorregamento do talude de jusante devido à saturação e/ou aumento de poropressão;
- Desagregação do pé da barragem

Os autores ressaltam que os fatores responsáveis pelo início, continuação, progressão da erosão e abertura da brecha são altamente influenciados pela cota do nível de água do reservatório e, portanto, esta informação deve estar sempre presente nas análises de *piping*. Lembram também que para ocorrer uma instabilidade de taludes, não é necessário que ocorra uma progressão do *piping*, uma vez que bastam apenas pequenos incrementos de permeabilidade para causar o aumento de poropressão que pode resultar na perda da estabilidade.

A Tabela 3.5 apresenta os dados de frequência média de ruptura por *piping* calculado por Foster *et al.* (2000). Nesta, é possível se constatar que as maiores frequências média de ruptura ocorrem em barragens de terra que não possuem elementos de controle de percolação; além disso, observa-se que nesta configuração há uma tendência de o *piping* ocorrer nos cinco primeiros anos de operação.

Tabela 3.5 – Frequência média de ruptura por *piping* no maciço, por categoria de zoneamento de barragens, até 1986.(Foster *et al.*, 2000)

Categoria de zoneamento da barragem	Nº de rupturas	Nº de acidentes	Frequência média de ruptura ($\times 10^{-3}$)	Frequência média de acidentes ($\times 10^{-3}$)	Frequência média anual de ruptura ($\times 10^{-6}$)*	
					5 primeiros anos de operação	após 5 anos de operação
Terra homogênea (sem filtro)	14	9	16,0	9,21	2086	188
Terra homogênea com filtro	2	1	1,5	0,6	189	37
Terra homogênea c/ enrocamento de pé	5	5	8,9	8,0	1160	158
Terra zoneada	4	9	1,2	2,4	158	25
Terra e enrocamento	1	7	1,2	7,3	152	24
Enrocamento com núcleo de argila	0(1)	19	(<1,1) [†]	22,0	(<143) [†]	(<34) [†]
Terra com face de concreto	2	1	5,3	2,4	691	75
Enrocamento com face de concreto	0	1 (11) [‡]	(<1) [§]	3,5	(<130) [§]	(<17) [§]
Terra com núcleo de argila compactada	4	10	9,3	20,7	1205	38
Terra com núcleo de concreto	0	2	(<1) [§]	8,1	(<130) [§]	(<8) [§]
Enrocamento com núcleo de concreto	0	2	(<1) [§]	21,6	(<130) [§]	(<13) [§]
Aterro hidráulico	0	3	(<1) [§]	32,4	(<130) [§]	(<5) [§]
Zoneamento desconhecido	7	6				
Todos os tipos	39	75	3,5	6,7	453	56

*As porcentagens de rupturas por *piping* através do maciço ocorreram em diferentes momentos, da seguinte forma: 49% durante o primeiro enchimento, 16% durante os primeiros 5 anos de operação e 35% após 5 anos de operação. Os cálculos de frequência média anual foram realizados da seguinte forma: Frequência média anual de ruptura (todos os anos) = (frequência média de ruptura)/(média de idade); Frequência média anual de ruptura (primeiros 5 anos) = (frequência média de ruptura)0.65/5; e Frequência média anual de ruptura (após os 5 anos) = (frequência média de ruptura)0.35/(média de idade - 5).

[†]Valor do limite superior da frequência média de ruptura foi determinado admitindo-se uma ruptura de barragem.

[‡]Onze acidentes com barragens de enrocamento com face de concreto envolviam vazamentos através da face de concreto (não incluído na % estatística)

[§]Assume frequência média de ruptura como sendo $< 1 \times 10^{-3}$

3.2.3. Mecanismo de formação da brecha por ocorrência do galgamento

O desempenho de uma barragem diante de uma situação de galgamento será resultado tanto das forças hidráulicas atuantes, quanto da suscetibilidade do material à erosão. O fluxo de água que passa sobre o maciço tem seu regime de escoamento alterado à medida que passa sobre a crista da barragem e chega ao talude de jusante. Cada alteração dessas corresponde a um potencial erosivo distinto. No primeiro momento, a água, que se encontra no reservatório numa situação estática, ganha velocidade quando passa sobre o lado de montante da crista. Neste momento, o regime ainda é subcrítico, posteriormente, já próximo ao talude de jusante, atinge velocidades críticas e o regime de escoamento logo passa a ser supercrítico e, ao descer pelo talude de jusante, a velocidade do escoamento aumenta ainda mais.

Em função deste perfil de velocidades do escoamento do fluxo sobre a barragem e seus diferentes potenciais erosivos, Powledge *et al.* (1988) propuseram uma divisão da superfície de escoamento em três zonas de erosão. A zona de erosão 1 refere-se a região sobre a crista da barragem onde o escoamento é subcrítico, a 2, ainda sobre a crista, mas com o escoamento

supercrítico e a 3, já no talude de jusante, também com escoamento supercrítico. A Figura 3.10 ilustra a situação descrita.

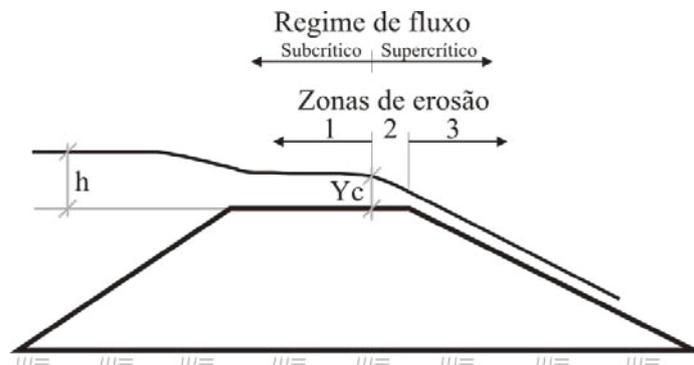


Figura 3.10 – Regimes de fluxo e zonas de erosão (Powledge *et al.*, 1988)

A zona de erosão 1 é caracterizada por velocidades de escoamento baixas, resultando em esforços de cisalhamento também baixos. Esse perfil de velocidade ocorre mesmo quando a altura da lâmina d'água é grande e, portanto, nesta região, o processo erosivo só irá se iniciar se o material for altamente erodível. Entretanto, é na zona de erosão 2 que ocorre a transição do regime subcrítico para o supercrítico, com o conseqüente aumento das forças de cisalhamento, e, desta forma, pode ser observada alguma erosão no final da crista próximo ao talude de jusante. Contudo, Powledge *et al* (1988). observam que, quando existe pavimento sobre a crista, independentemente das zonas de erosão descritas, este pode vir a flutuar e ser arrancado devido ao surgimento de subpressões em camadas subjacentes.

Na zona de erosão 3, os níveis de energia se elevam progressivamente à medida que o fluxo avança talude abaixo, assim como as velocidades de escoamento. As forças de tração se tornam muito elevadas, resultando num grande potencial erosivo. No momento em que surgem as primeiras erosões e descontinuidades no talude, o fluxo passa a ser em cascata e, desta forma, outros fatores passam a reger o processo erosivo e as forças de cisalhamento deixam de ser importantes.

Powledge *et al* (1988). observaram ainda que o início da erosão pode ocorrer em qualquer lugar no talude de jusante, mas geralmente se inicia no pé da barragem. Assim que uma abertura aparece na superfície, surge uma pequena cascata e um buraco se forma no local da queda da água. Esse buraco se alarga e se propaga tanto lateralmente, como para montante, formando a brecha de ruptura. A Figura 3.11, Figura 3.12 e Figura 3.13 ilustram os

mecanismos de ruptura para barragens compostas de materiais granulares e solos argilosos, com e sem filtro.

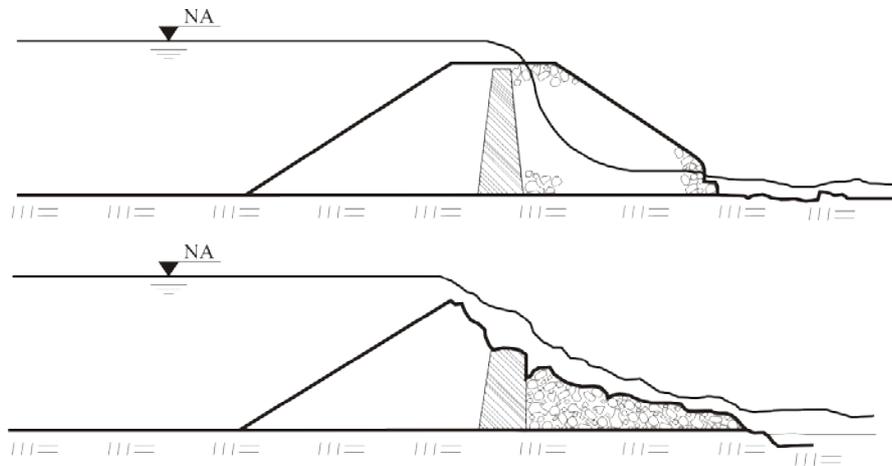


Figura 3.11 – Sequência erosiva devido ao galgamento – barragens de enrocamento com núcleo impermeável (Powledge *et al.*, 1988)



Figura 3.12 – Sequência erosiva devido ao galgamento – barragens homogêneas com materiais coesivos (Powledge *et al.*, 1988)

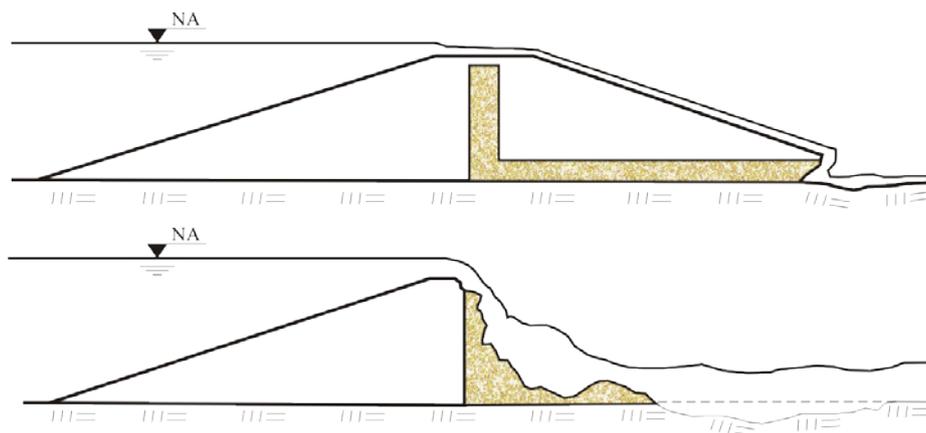


Figura 3.13 – Sequência erosiva devido ao galgamento – barragens de material coesivo com elementos granulares (Powledge *et al.*, 1988)

Os autores chamam a atenção para o fato de que em barragens de enrocamento com núcleo impermeável, se a cota do nível de água do reservatório for superior à cota de topo do elemento vedante, a barragem já corre riscos, mesmo sem o galgamento, uma vez que um grande volume de água passa a percolar no talude de jusante. Com o galgamento, a existência de altas percolações no talude colabora com o aumento das taxas de erosão. Nas barragens constituídas de material coesivo, a baixa permeabilidade dos materiais permite que elas sejam mais resistentes à erosão.

Powledge *et al.* (1988) elencam alguns fatores que influenciam o potencial de erosão de uma barragem sujeita ao galgamento, entre eles:

- Configuração, materiais empregados e compactação;
- Velocidades atingidas pelo fluxo;
- Existência de discontinuidades;
- Nível de água a jusante;
- Presença de materiais mais suscetíveis à erosão no talude de jusante (ex: drenos de pé).

Assim, para barragens geotécnicas, taludes mais abatidos, com um bom controle de compactação, bom estado de conservação, que impeçam a formação de buracos, rachaduras etc., existência de revestimentos adequados, todos são fatores que colaboram para a resistência da barragem à erosão e, conseqüentemente, à formação da brecha de ruptura nos casos de galgamento.

3.2.4. Hidrograma das vazões efluentes do reservatório

Quando uma barragem se rompe, a região a jusante geralmente sofre com inundações rápidas e catastróficas. Uma estimativa prévia destas vazões efluentes é extremamente útil, pois permite prever rotas, tempos de deslocamento da onda de inundação, avaliar a amplitude dos danos causados etc. Entretanto, a situação da região de jusante será ditada não só pela vazão de pico, mas pela combinação do volume de inundação, taxa na qual é liberado e pela topografia da região. As duas primeiras informações podem ser obtidas do hidrograma de vazões efluentes.

Um hidrograma representa uma sequência temporal de vazões e se caracteriza pelo seu volume, distribuição temporal e valor máximo (pico do hidrograma). Um exemplo de hidrograma é apresentado na Figura 3.14.

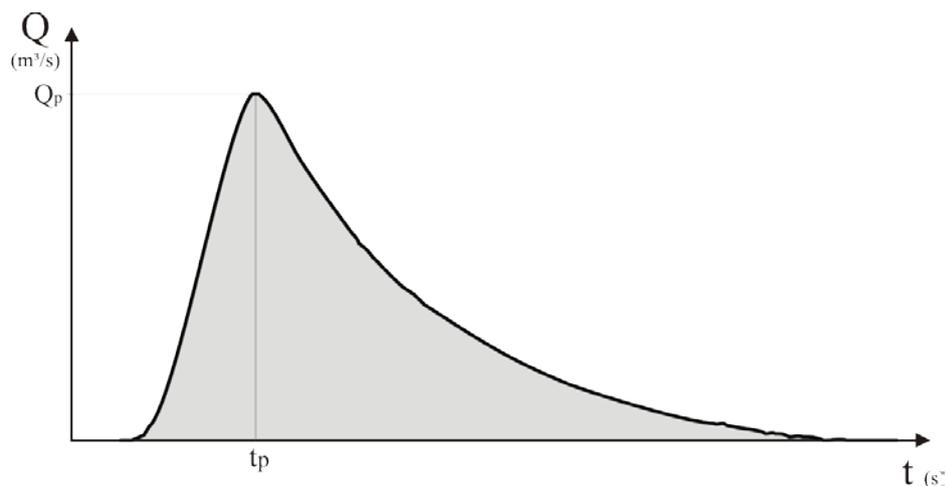


Figura 3.14 – Exemplo de hidrograma

Em um hidrograma, as vazões são grafadas no eixo das ordenadas e o tempo, no das abscissas. A área sob a curva (região hachurada) representa o volume total escoado. Q_p e t_p são, respectivamente, a vazão e o tempo de pico.

Para as barragens geotécnicas, a determinação do hidrograma de vazões resultante de uma ruptura é de difícil previsão, pois sua forma (mais achatada, alongada etc.) envolve o conhecimento do processo de formação da brecha de ruptura, que é um processo complexo que depende de vários de parâmetros, como carregamentos hidráulicos, características de

projeto e condição de conservação da barragem. Além disso, testes de ruptura realizados tanto em modelos reduzidos como em modelos de campo demonstraram que o hidrograma terá características distintas para diferentes localizações da brecha na barragem, principalmente se ela se forma próximo ao centro da barragem ou das ombreiras (IMPACT, 2005).

Existem diversos modelos matemáticos de previsão do hidrograma que consideram o processo da formação da brecha em seus algoritmos, alguns são paramétricos, ou seja, se utilizam de observações empíricas de rupturas anteriores tais quais, relações largura-profundidade, tempo de formação da brecha etc., outros se baseiam em comportamentos físicos para prever as características da brecha (Fread,1991). Um exemplo de modelo do primeiro tipo é o NWS DAMBRK e do segundo tipo, o NWS BREACH e o HR BREACH.

Segundo Fread (1991), os modelos baseados em comportamentos físicos possuem mais vantagens em comparação com modelos empíricos para a aplicação em barragens, uma vez que as propriedades críticas utilizadas, como γ , ϕ e c , são mensuráveis ou podem ser estimadas razoavelmente a partir de descrições dos materiais. O autor enfatiza que, mesmo para as propriedades mensuráveis, existe uma variabilidade em torno do valor mais provável, as quais podem ser tratadas estatisticamente.

Entretanto, antes de adotar um modelo para o estudo da brecha de ruptura e obtenção do hidrograma de vazões resultantes, o usuário deve primeiramente procurar saber como os modelos foram desenvolvidos. A adoção de um modelo, calibrado por uma quantidade limitada de eventos históricos específicos, só funcionará bem para situações semelhantes, não sendo adequado para situações distintas. Já os modelos baseados em comportamentos físicos, mesmo que não tenham sido calibrados para eventos específicos, têm maiores chances de ter um desempenho razoável para uma gama maior de situações (IMPACT, 2005).

A exatidão das previsões do modelo dependerá, portanto, do tipo de resultado que o usuário está interessado. No caso dos modelos de previsão do hidrograma de vazão de ruptura, alguns dados interessantes são o tempo de iniciação, o volume escoado e a descarga de pico (IMPACT, 2005). Contudo, após análise comparativa do resultado de previsão de vários modelos e resultados de testes de laboratório e de campo, o grupo de estudo constatou variações da ordem de 30%, para mais e para menos, nos valores da vazão de pico, que o

volume total estimado coincidia com o medido, mas a forma do hidrograma não, e que o tempo de iniciação (parte ascendente do hidrograma) não era confiável.

3.2.5. Rota do fluxo à jusante do reservatório

Após a obtenção ou estimativa do hidrograma de vazões efluentes, a extensão e o tempo de ocorrência da enchente podem ser determinados acompanhando o comportamento do hidrograma à medida que o fluxo avança pelo vale. Segundo Fread (1984), o hidrograma inicial é modificado (atenuado, retardado e distorcido) devido a vários fatores, como a capacidade de armazenamento de trechos do vale, resistência friccional ao fluxo, alteração dos componentes de aceleração da onda de cheia, presença de obstruções naturais ou artificiais etc. Para o autor, as modificações da onda de cheia se manifestam por meio da atenuação, da elevação do nível d'água, espalhamento ou dispersão do volume escoado e mudanças na celeridade (velocidade translacional) e, conseqüentemente, no tempo de viagem. Um exemplo de mudança de comportamento da onda de cheia pode ser encontrado na Figura 3.15.

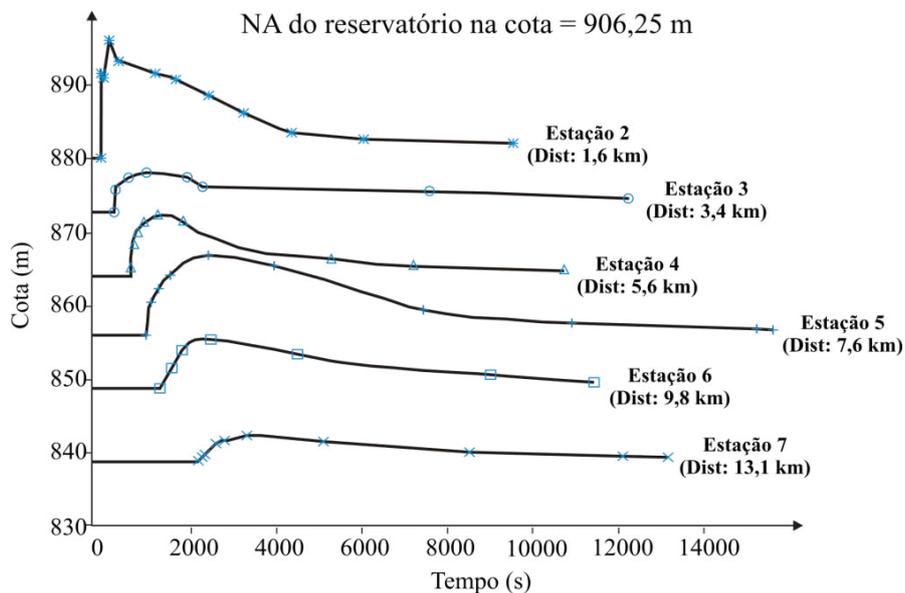


Figura 3.15 – Variação das alturas do nível d'água em função do tempo de ocorrência (Modificado de Bozkus & Kasap, 1998)

Os dados plotados no gráfico da Figura 3.15 foram obtidos de um estudo com modelo reduzido, realizado por Bozkus & Kasap (1998). O modelo representava a barragem de Cubuk-1, localizada na Turquia, próximo a Ankara. Apesar de ser uma barragem de concreto

e a simulação prever uma ruptura instantânea, o modelo, na escala 1/500, representava cerca de 25 km do vale à jusante, tornando possível a análise dos efeitos topográficos na elevação do nível d'água e na velocidade do escoamento, conforme mostrado na Figura 3.16 e na Figura 3.17.

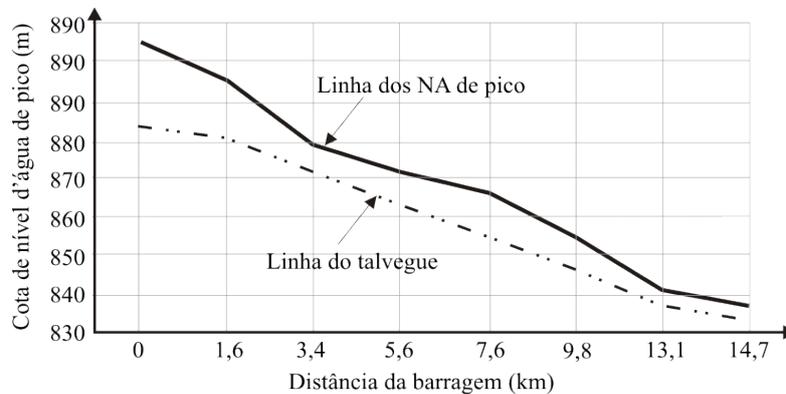


Figura 3.16 – Cota do nível d'água de pico para diferentes distâncias a jusante da barragem de Cubuk-1 (Modificado de Bozkus & Kasap, 1998)

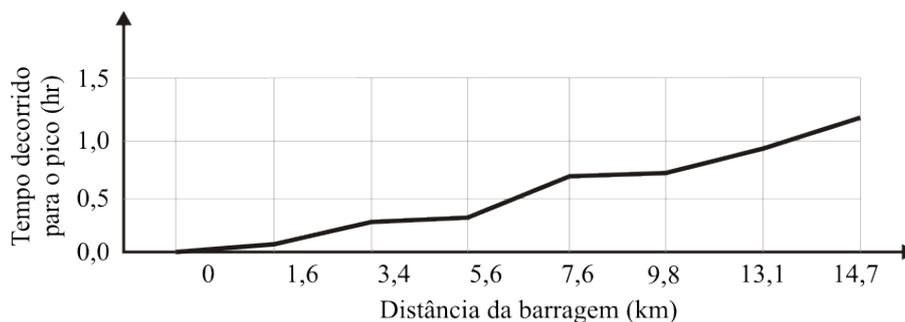


Figura 3.17 – Tempo decorrido para o pico de cheia para diferentes distâncias da barragem de Cubuk-1 (Modificado de Bozkus & Kasap, 1998)

Assim, de posse desse tipo de informação, é possível antever as consequências de uma ruptura e agir preventivamente através de planos de emergência pré-elaborados e equipes treinadas.

3.3. Considerações finais

No capítulo 2, buscou-se a compreensão do que consiste a gestão de riscos, onde e como se enquadram suas etapas, seus princípios e as principais ferramentas utilizadas para sua efetivação. Entretanto, somente após a compreensão dos mecanismos de ruptura e suas consequências, torna-se possível a aplicação consistente dos princípios e métodos necessários

para a realização de uma análise de riscos. Acredita-se que esse entendimento tenha sido, ainda que de forma geral, alcançado ao final do capítulo 3. Com esse conjunto de informações, torna-se possível a ordenação lógica das fases e etapas consideradas pertinentes em um análise de risco, descrita no capítulo 4, além de todos os procedimentos, premissas e aplicações, presentes no capítulo 5.

4. DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO PARA AVALIAÇÃO DOS RISCOS DE UMA BARRAGEM

Visando a transparência, organização da sequência de passos e clareza no trato dos dados, necessários para o entendimento e, principalmente, a repetitividade de uma avaliação de riscos, idealizou-se as atividades em seis fases distintas, que, por sua vez, foram subdivididas em etapas. Esta sequência lógica de ações encontra-se detalhada no fluxograma ilustrado na Figura 4.1.

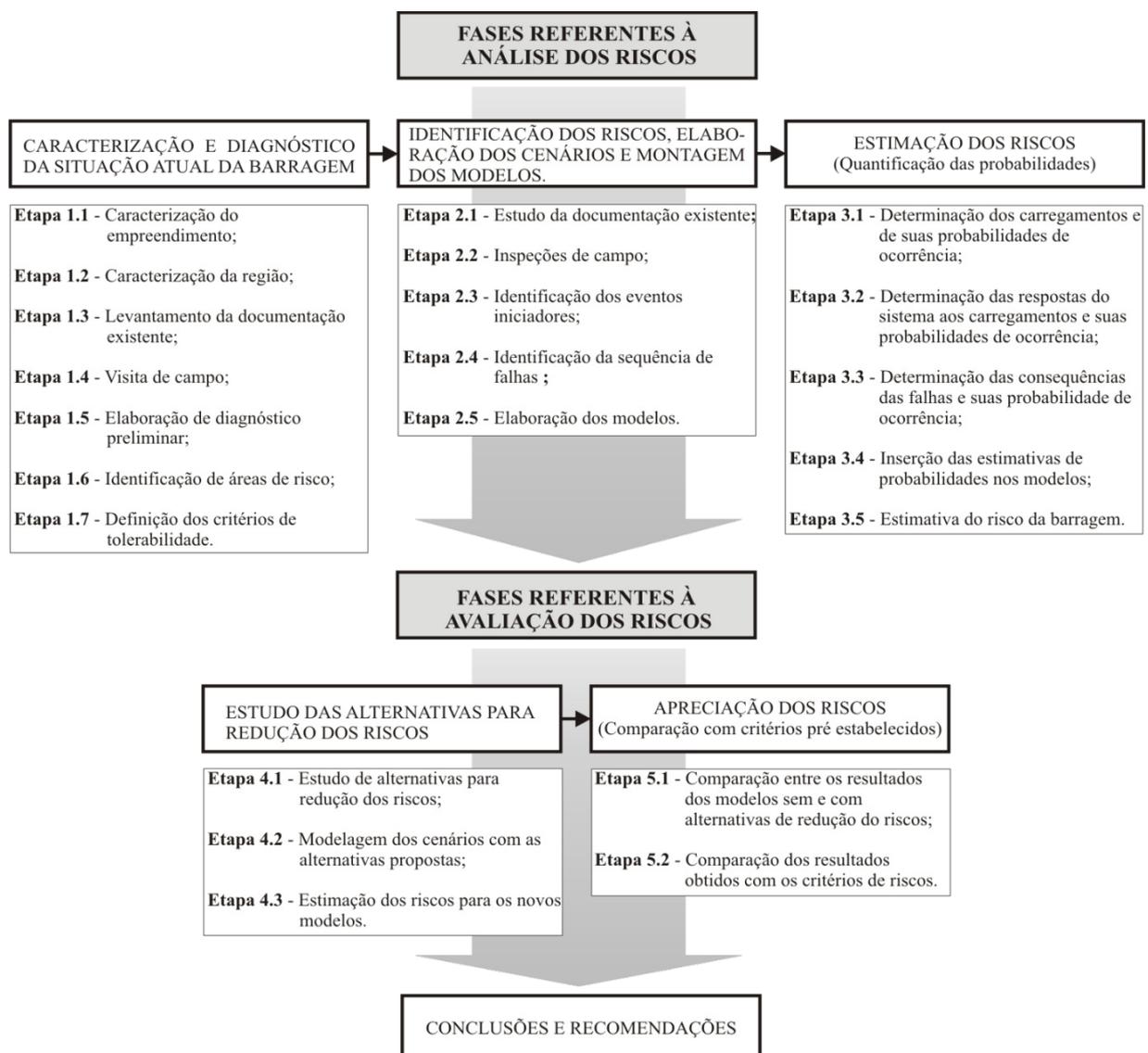


Figura 4.1 – Sequência lógica de ações idealizada para a avaliação de riscos de barragem

As fases e etapas foram pensadas de forma a agrupar atividades correlatas e proporcionar uma sequência de ações as quais, após a conclusão de uma determinada fase, fosse possível se

iniciar a fase seguinte. As duas primeiras fases do processo de análise de riscos estavam de acordo com o modelo metodológico desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE, 2006), o qual preconiza a realização de duas fases preliminares antes da quantificação do risco: a definição completa do problema e a elaboração da árvore de eventos.

Delimitação do escopo do trabalho

Para atingir os objetivos propostos, somente uma parte das atividades descritas no fluxograma da Figura 4.1 deveria de ser cumprida. Desta forma delimitou-se o escopo deste trabalho às fases referentes à análise de riscos. A Fase 1 – Caracterização e Diagnóstico da Situação Atual da Barragem, e a Fase 2 – Identificação dos Riscos, Elaboração dos Cenários e Montagem dos Modelos, foram realizadas para as situações hipotéticas de *piping*, galgamento e instabilidade de taludes. A Fase 3 – Estimação do Risco foi realizada apenas para os cenários referentes ao *piping*.

Dentre as etapas pertencentes às fases 1, 2 e 3, as etapas 1.6, 1.7 e 3.3 não foram realizadas, por terem sido consideradas como objeto de um estudo a parte, não se encaixando nos objetivos deste trabalho, uma vez que se trata de uma análise das consequências. Além disso, particularmente em relação às etapas 1.6 e 3.3, devido à complexidade envolvida e, principalmente, ao fato de que, em função de o estudo ser amparado em uma barragem real, não seria prudente traçar cenários de consequências hipotéticas sem um metucioso estudo, pois tal ato permitiria interpretações equivocadas de terceiros podendo causar danos à imagem do proprietário do empreendimento. Como consequência da eliminação das etapas descritas anteriormente, a execução da etapa 3.5 foi substituída por outra que representa um estágio imediatamente anterior à estimativa dos riscos da barragem: a quantificação das probabilidades de ocorrência dos cenários, numerada como etapa 3.4a.

Com estas delimitações no escopo, as conclusões e recomendações, que na Figura 4.1 se referem aos resultados da avaliação de riscos de uma barragem, no novo fluxograma de planejamento do trabalho, ilustrado na Figura 4.2, passaram a ser referentes ao método utilizado e aos resultados obtidos na quantificação.

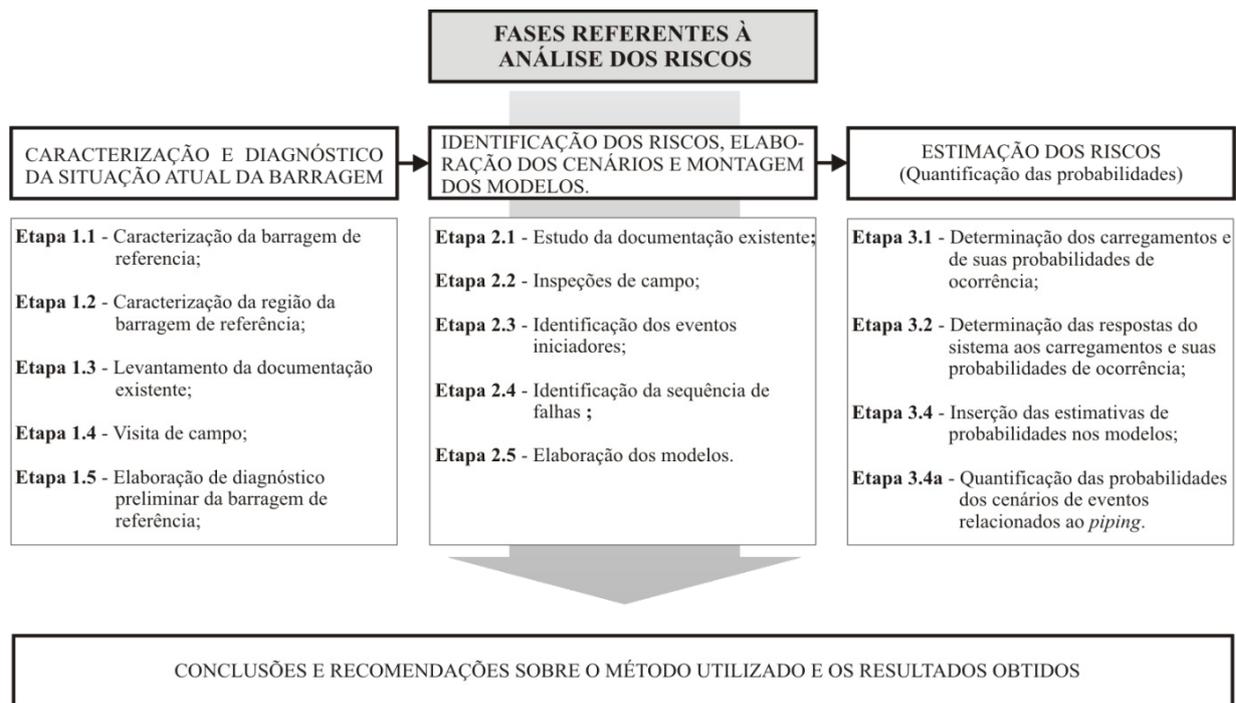


Figura 4.2 – Sequência lógica das ações utilizadas para o desenvolvimento do trabalho

Ressalta-se que as fases e etapas listadas não correspondem necessariamente à itemização utilizada neste trabalho, mas representa o planejamento utilizado para a realização dos estudos.

Este planejamento se concretizou da seguinte maneira:

- Estudo do projeto e inspeção de campo, pelos quais foi possível obter um diagnóstico inicial da situação de segurança da barragem de referência, com a identificação de aspectos construtivos relevantes, características peculiares do local de implantação do empreendimento, noções sobre a qualidade da construção e manutenção, conhecimento dos dados disponíveis e um indicativo dos possíveis problemas;
- Estudos de problemas específicos, onde se procurou por fatores que influenciam problemas específicos como o *piping*, galgamento e instabilidade de taludes, identificados na literatura técnica, para se avaliar a vulnerabilidade da barragem aos mesmos, determinar formas mais prováveis de acidentes, identificar pontos fracos e fortes da barragem;
- Elaboração da árvore de eventos, onde se procurou representar de forma gráfica as constatações feitas nas fases anteriores na forma de um conjunto de cenários possíveis;
- Quantificação dos cenários de *piping*;
- Análise da metodologia utilizada e dos resultados obtidos.

5. ELABORAÇÃO DA ÁRVORE DE EVENTOS E QUANTIFICAÇÃO DAS PROBABILIDADES DOS CENÁRIOS DE *PIPING* DE UMA BARRAGEM DE TERRA

Neste capítulo desenvolveu-se um procedimento que possibilitou a construção das árvores de eventos para situações de *piping*, galgamento e instabilidade de taludes para uma barragem hipotética. Contudo, como forma de manter esse estudo próximo à realidade, foi utilizada como referência e fonte de informações a barragem de Santa Maria, de propriedade da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB.

Com estas árvores estabelecidas, procedeu-se à quantificação das probabilidades dos cenários representados na árvore de eventos de *piping*. O enfoque foi ao tratamento dado às informações coletadas da barragem de referência e à forma como elas foram tratadas para permitir seu uso numa análise de riscos. Neste contexto, a quantificação dos cenários pertencentes à árvore de eventos do galgamento e da instabilidade tornariam este trabalho repetitivo e, portanto, não foram realizadas.

5.1. Caracterização da barragem de referência

Santa Maria é uma barragem de terra homogênea, com drenos, vertical e horizontal, que se encontra em operação desde o início dos anos 70. Sua principal função é acumular água para atender cerca de 20% do abastecimento da cidade de Brasília, DF. A Figura 5.1 apresenta a seção transversal da barragem próxima à região mais profunda do vale e na Tabela 5.1 encontram-se agrupadas suas principais características.

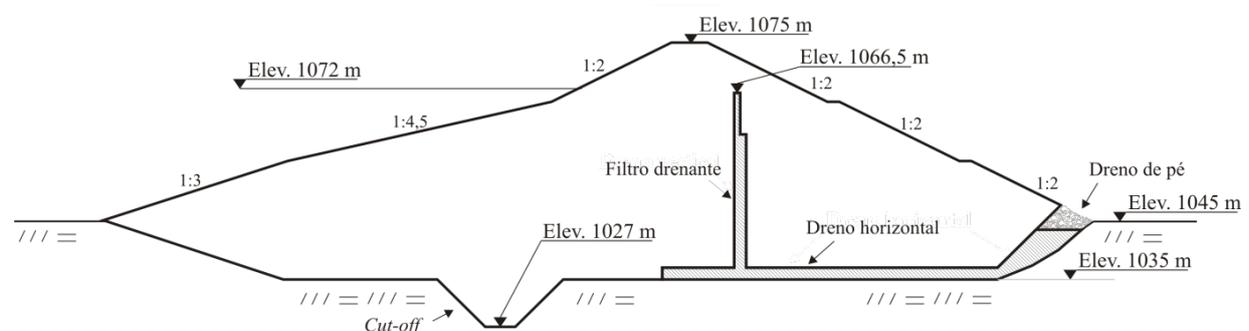


Figura 5.1 - Seção transversal da barragem pela estaca 17 (modificado de Geotécnica, 1971).

Tabela 5.1 – Ficha técnica da barragem (modificado de Geotécnica, 1971).

Barragem de Santa Maria			
Tipo de barragem	Terra homogênea	Proprietário	CAESB - DF
Elementos filtro-drenantes no maciço	Filtro vertical e tapete drenante	Finalidade	Abastecimento de água
Altura máxima	40 m	Tempo em operação	Desde 1971
Comprimento da crista	550 m	Volume total	58,45 x 10 ⁶ m ³
Largura da crista	6 m (pavimentada)	Volume útil	45,70 x 10 ⁶ m ³
Cota de coroamento	Elev. 1075,0 m	Área do reservatório	6,06 km ²
Nível d'água máximo Maximorum	Elev. 1073,0 m	Área de drenagem	108 km ²
Nível d'água máximo normal	Elev. 1072,0 m	Incl. média do talude de montante	1V:3H
Nível d'água mínimo (oper.)	Elev. 1060,6 m	Incl. talude de jusante	1V:2H

As obras de construção da barragem se iniciaram em julho de 1969, com a instalação do canteiro de obras, e foram concluídas em dezembro de 1970. O empreendimento é composto pelo maciço da barragem, uma torre de tomada d'água, uma galeria em concreto armado e um vertedouro de soleira livre. A torre de tomada d'água se localiza próxima à ombreira direita e se liga à galeria de adução, que atravessa o maciço da barragem. A estrutura do vertedouro está localizada na ombreira esquerda, a 300 m de distância da barragem. O arranjo do empreendimento pode ser visualizado na Figura 5.2. Na Tabela 5.2 encontram-se condensadas as informações técnicas sobre o maciço da barragem, na Tabela 5.3, sobre a tomada d'água e na Tabela 5.4, sobre o vertedouro.



Figura 5.2 – Arranjo geral da barragem de Santa Maria (modificado - Google, 2009).

Tabela 5.2 - Dados básicos: Características do maciço (modificado de Geotécnica, 1971).

Características do maciço (volumes)			
Aterro	1100 x 10 ³ m ³	Rip-Rap e transições	12 x 10 ³ m ³
Trincheira de vedação	20 x 10 ³ m ³	Dreno vertical e tapete	70 x 10 ³ m ³
Enrocamento de pé e transições	5 x 10 ³ m ³		

Tabela 5.3 - Dados básicos: Tomada d'água e galeria (modificado de Geotécnica, 1971).

Características da tomada d'água e galeria			
Volume total de concreto	1.000 m ³	Número de comportas	4 unidades
Altura da torre	21,00 m	Comprimento da galeria	61 m
Seção transversal	retangular	Dimensões da galeria	3,8 x 2,50 m

Tabela 5.4 - Dados básicos: Características do Vertedouro (modificado de Geotécnica, 1971).

Características do vertedouro			
Volume total de concreto	5.000 m ³	Vazão de projeto	107,7 m ³ /s
Comprimento da crista	51,04 m	Tempo de recorrência (TR)	10.000 anos
Cota da crista	Elev. 1072 m	Cota máxima	Elev. 1073 m

Na Figura 5.3a é mostrada a torre de tomada d'água e na Figura 5.3b tem-se uma vista interna da galeria de concreto armado que atravessa a barragem. Na Figura 5.4a tem-se representada toda estrutura responsável pela descarga das vazões excedentes, composta do vertedouro, canal do rápido e bacia de dissipação. Um detalhe do vertedouro é ilustrado na Figura 5.4b.



Figura 5.3 – Estrutura de captação e adução da barragem de Santa Maria: a) foto da torre de tomada d'água; b) foto do interior da galeria sob a barragem - jusante para montante.



Figura 5.4 – Estrutura responsável pela descarga das vazões excedentes da barragem de Santa Maria: a) foto do conjunto: vertedouro, rápido e bacia de dissipação; b) detalhe do vertedouro em leque com seção do tipo Creager.

5.2. Caracterização do local de implantação e do tratamento da fundação

A barragem de Santa Maria está localizada dentro do Parque Nacional de Brasília, portanto, numa área de preservação ambiental e de entrada restrita. A vegetação predominante na região é o cerrado. Ao longo dos trechos dos rios encontram-se matas ciliares densas. Ambos estão bem preservados. O acesso principal é feito pela estação elevatória da Caesb, localizada na região conhecida como Granja do Torto, de onde se segue em estrada de terra por cerca de 7 km até a barragem. Não existem placas indicativas que orientem chegar ao local.

O maciço foi implantado numa região de vale aberto com ombreiras suaves, adequado para o tipo de barragem escolhido. Grande parte do material necessário para sua construção encontrava-se próximo à obra, como as jazidas de material para o maciço, que distavam no máximo 600 m da área de construção. Na região da fundação da barragem foram identificados depósitos aluvionares, no vale, manto eluvial, nas ombreiras, e, sob estas, embasamento rochoso de forte a medianamente alterado, constituído por ardósia com intercalação de veios de quartzo.

Os perfis geológicos na região da fundação encontravam-se distribuídos da seguinte forma (Geotécnica, 1971):

- Os depósitos eluviais tinham espessuras compreendidas entre 2 a 4 m, compostos de siltes argilosos, por vezes arenosos, de medianamente compactos a muito compactos, com permeabilidade de cerca de 10^{-6} m/s, relacionada com a porosidade do material;

- A camada de aluvião, de cerca de 5 m de espessura, era composta de argila muito mole, saturada, orgânica, com permeabilidades da ordem de 10^{-5} e 10^{-6} m/s;
- Subjacente à camada de aluvião foi encontrado um horizonte de pedregulho arenoso, aluvionar, com espessura variando entre 1 a 5 m, envolvido por material silto-argiloso. Neste horizonte não foram realizados ensaios de permeabilidade.
- Sob todas as camadas, encontrava-se embasamento rochoso constituído por ardósia fortemente alterada, com intercalações delgadas de veios de quartzo, que não apresentaram (até a profundidade perfurada – 25 m) índices de recuperação crescentes com a profundidade. Os ensaios de permeabilidade *in situ* resultaram em permeabilidades decrescentes com a profundidade, com valor de 10^{-5} m/s para o horizonte superior de cerca de 6 m de espessura.

Por ocasião da construção da barragem, as camadas de alúvio (recente e antigo) foram removidas, a trincheira foi escavada, penetrando na ardósia cerca de 5 m, e, nas ombreiras, foram removidos os elúvios, localizados à montante da trincheira, apoiando a barragem sobre a ardósia fortemente alterada. Ainda na região das ombreiras, à jusante da trincheira, o maciço foi assentado sobre o solo residual. A Figura 5.5 ilustra a distribuição das camadas, identificadas quando da escavação do canal de desvio do rio. Destas, as camadas 1 e 2 foram completamente removidas e a trincheira de vedação penetrou na camada 3.

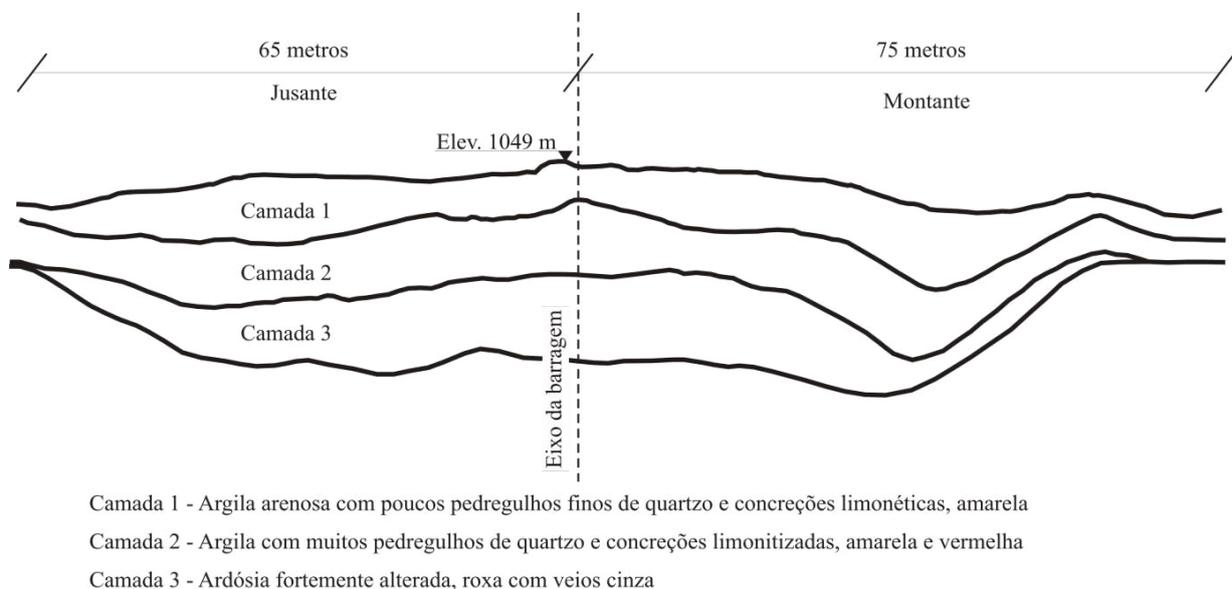


Figura 5.5 - Perfil longitudinal ao longo do canal de desvio - exagero na escala vertical: 5x (modificado de Geotécnica, 1971).

A Figura 5.6 mostra a topografia do terreno após tratamento da fundação, o tipo de tratamento dado para diferentes áreas e indica a localização dos principais elementos da barragem. Nesta figura é possível observar o posicionamento do filtro vertical, entre as estacas 5 e 28, do tapete drenante, entre as estacas 12 e 25, a posição do eixo da galeria que corta o maciço, entre as estacas 8 e 9, além do eixo da trincheira de vedação. Também se observa que, tanto na região central da barragem, a montante de seu eixo, quanto na ombreira esquerda, foi realizado um tratamento mais rigoroso da fundação; já na região sob o tapete drenante e na ombreira direita, este tratamento foi mais brando.

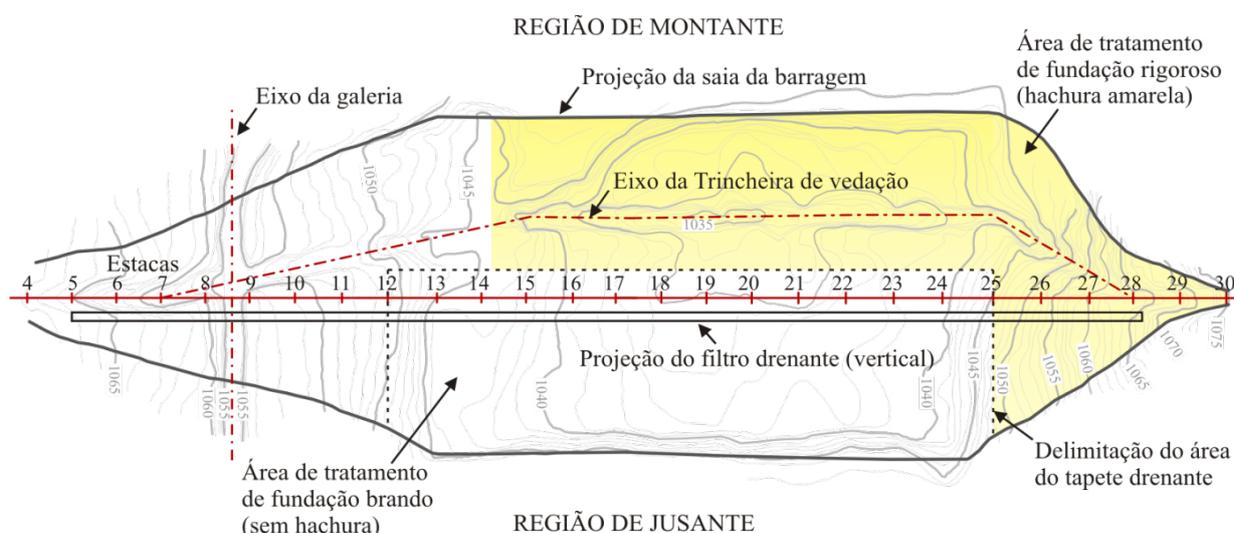


Figura 5.6 – Tratamento de fundação (modificado de Geotécnica, 1971).

5.3. Avaliação preliminar da barragem de referência

Após a coleta das primeiras informações sobre a obra e seu local de implantação, foi possível ter uma primeira impressão sobre o empreendimento e seu estado de conservação. Constatou-se que a barragem foi bem projetada e construída, não tendo apresentado, até então, ocorrências mais graves. Entretanto, identificou-se duas situações relevantes: 1) o não funcionamento dos piezômetros e 2) a inoperância das comportas da tomada d'água, que foi relatada por técnicos do local.

No geral, a barragem apresentava um bom aspecto visual, indicando cuidados com a manutenção. Esta avaliação preliminar serviu para fornecer subsídios que permitiram elucidar aspectos, referentes à segurança da barragem, necessários nas fases seguintes, que englobam a determinação dos cenários de falhas.

5.4. Estudo dos fatores de vulnerabilidade para elaboração da árvore de eventos

Uma vez caracterizado o empreendimento, procurou-se identificar vários fatores referentes ao maciço, existência de estruturas e local de implantação, os quais poderiam influir no aumento ou diminuição da vulnerabilidade da barragem à ocorrência de falhas, principalmente daquelas decorrentes do processo de *piping*, galgamento e instabilidade do talude. Posteriormente, após o entendimento deste conjunto de fatores e suas implicações na segurança da obra, alguns cenários de rupturas, considerados importantes, foram definidos e grafados na forma de uma árvore de eventos.

Ressalta-se que nunca foi intenção deste trabalho abranger todo o universo das possíveis sequências de eventos que culminassem em falha, mesmo porque esta tarefa demandaria um grupo multidisciplinar e um estudo muito mais aprofundado, mas sim o de demonstrar, com o auxílio de cenários mais significativos, uma forma de raciocínio que pode ser utilizada em uma análise de riscos.

5.4.1. Estudo da vulnerabilidade ao *piping*

Para fins deste estudo procurou-se identificar fatores que poderiam influenciar na inicialização de um processo de erosão interna, que poderia evoluir para um problema de *piping*, limitando este estudo somente ao maciço da barragem. Para tanto, utilizou-se de duas estratégias: a análise dos dados de projeto confrontando-os com os fatores de vulnerabilidade propostos por Foster & Fell (2000) e a avaliação *in loco* da barragem por meio de inspeção de campo utilizando a metodologia proposta pelo Ministério da Integração Nacional (MI, 2005).

5.4.1.1 - Avaliação dos dados de projeto

Analisou-se preliminarmente, de forma qualitativa, a potencialidade de o maciço da barragem ser suscetível ao surgimento de trincas transversais, colapso por molhagem, fratura hidráulica ou possuir camadas com alta permeabilidade. Este estudo foi feito utilizando-se como referência as tabelas propostas por Foster & Fell. (2000), formuladas com base em dados históricos.

Estas tabelas abordam basicamente questões como a suscetibilidade do material do maciço ao surgimento de trincas e à existência de zonas de alta permeabilidade. Para a primeira, os fatores de influência considerados são a qualidade da compactação, controle de umidade, tipo de solo utilizado e influência de regiões de baixas tensões de confinamento, resultantes principalmente de questões topográficas e diferenças de rigidez dos materiais utilizados. Para a segunda, a existência de camadas com problemas de compactação ou regiões próximas as mais diversas estruturas adjacentes ao maciço da barragem, como muros e transições, como no caso da galeria da tomada d'água.

A Tabela 5.5 e a Tabela 5.6 foram utilizadas para avaliar a suscetibilidade ao surgimento de trincas no talude de montante. Nestas as características que mais se adequavam à barragem de referência foram destacadas em negrito. Em alguns casos, a descrição dada pelos autores, a um ou outro fator de influência, foi modificada para se adequar à realidade da barragem, desde que essa adequação mantivesse os princípios implícitos em cada fator previamente nomeado.

Tabela 5.5 – Fatores de influência na probabilidade de surgimento de trincas ou de colapso induzido por molhagem – aplicado à Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco provável
Grau de compactação (1)	Mal compactado, < 95% do grau de compactação normal (2)	95-98% do grau de compactação normal	Bem compactado, ≥ 98% do grau de compactação normal
Umidade de compactação	Mais seco do que a umidade ótima de compactação (cerca de - 3%)	Unidade de compactação entre -1 e -2 %	Umidade de compactação ótima ou mais úmida
Tipo de solo utilizado (3)	Argilas finas com baixa plasticidade	Argilas finas com plasticidade moderadas	Argilas finas com alta plasticidade ou Siltes finos sem coesão.

Notas: (1) Em se tratando de trincas e rachaduras, o grau de compactação não é um fator primordial, entretanto, já é importante de ser considerado quando da análise do colapso induzido por molhagem.
 (2) < 93% do grau de compactação ótimo e grau de umidade menor que o ótimo, é muito mais provável.
 (3) O tipo de solo não é mais importante que o grau de compactação e o grau de umidade.

Tabela 5.6 – Fatores de influência na probabilidade de trincas ou fratura hidráulica – aplicado à Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco provável
Perfil geral da ombreira	Vale profundo e estreito. Mudanças abruptas no perfil da ombreira.	Taludes uniformes e moderadamente escalonados (0.25H:1V a 0.5H: 1V)	Perfil uniforme de ombreira ou modificações de larga escala nos taludes. Taludes suaves (>0.5H:1V)
Irregularidades de menor escala no perfil da ombreira	Degraus, platôs, depressões na rocha de fundação, principalmente sob o núcleo	Irregularidades presentes mas não sob o núcleo	Cuidado tomado com as modificações no talude ou perfil pouco acidentado.
Recalques diferenciais na fundação	Solos de fundação profundos adjacentes à ombreiras rochosas. Profundidades variáveis de solos de fundação. Variabilidade na compressibilidade dos solos de fundação	Fundação em solo com gradual variação com a profundidade.	Solo de fundação com baixa compressibilidade. Sem solo na fundação.
Características do núcleo (no caso da Barragem de Santa Maria: Talude de montante)	Núcleo estreito ($h_d/L > 2$), particularmente em núcleos com lados verticais.	Largura padrão de núcleos ($2 < h_d/L < 1$)	Núcleos largos ($h_d/L < 1$)
	Material do núcleo com rigidez menor que a da transição	Materiais de núcleo com rigidez equivalente às das transições	Materiais de núcleo com rigidez maiores que às das transições
	Núcleos centrais.		Núcleos inclinados para montante

Pelo enquadramento das características da barragem aos fatores de influência descritos nas tabelas, foi possível constatar a qualidade do projeto geotécnico. Cuidados com o tratamento das fundações, controle de compactação e controle de umidade se refletiram na baixa suscetibilidade ao surgimento de trincas na barragem de Santa Maria, principalmente daquelas decorrentes de fatores construtivos. Apesar de esta avaliação prévia indicar uma baixa probabilidade da ocorrência de trincas, não se pode excluir totalmente essa possibilidade, principalmente por se tratar de uma barragem de terra. Outro fator, não incluído nas tabelas anteriores e que foi considerado, quando se avaliou a potencialidade do trincamento, foi a ocorrência de ciclos de ressecamento e molhagem do material do maciço, resultantes da grande depleção do nível d'água do reservatório durante os períodos de seca e posterior enchimento nos períodos chuvosos, que, no caso de Brasília, são bem definidos e duradouros.

Quanto à suscetibilidade do maciço ao surgimento de um fluxo em uma camada mais permeável, a avaliação preliminar foi realizada com o auxílio da Tabela 5.7, Tabela 5.8 e Tabela 5.9. Da mesma forma, as características que mais se adequavam à barragem de Santa

Maria foram destacadas em negrito e a descrição dada inicialmente pelos autores foi modificada para se adequar a realidade da barragem.

Tabela 5.7 – Fatores de influência na probabilidade de formação de fluxo concentrado - aplicado à Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco provável
Grau de compactação	Mal compactado, < 95% do grau de compactação normal	95-98% do grau de compactação normal	Bem compactado, ≥ 98% do grau de compactação normal
Umidade de compactação	Mais seco do que a umidade ótima de compactação (-3%)	Umidade de compactação entre -1 e -2 %	Umidade de compactação ótima ou mais úmida
Qualidade da construção	Sem supervisão durante a construção; Limpeza ruim após períodos úmidos ou secos durante a construção.		Bom acompanhamento da obra. Retirada de camadas ressecadas ou úmidas antes da retomada da construção.
Detalhes da instrumentação	Compactação ruim próximo à instrumentação (se esta passar pelo núcleo da barragem)		Sem instrumentação no núcleo.
Características do material do núcleo (no caso da Barragem de Santa Maria: Talude de montante)	Grande variabilidade de materiais na área de empréstimo. Material suscetível a trincamento devido ao ressecamento. Materiais amplamente graduado suscetíveis à segregação		Baixa variabilidade de materiais nas áreas de empréstimo. Baixo potencial de encolhimento por ressecamento. Curva granulométrica estreita.

No caso da barragem de Santa Maria, os condutos foram dispostos sobre berços e protegidos por uma galeria, ambos de concreto armado, conforme mostrado na Figura 5.3b. Um eventual problema com os condutos, como, por exemplo, vazamentos, repercutiria, inicialmente, nesta galeria e não diretamente no corpo do maciço.

Na avaliação realizada por meio dos fatores de influência, listados na Tabela 5.8, considerou-se, esta proteção, favorável à segurança da obra. Entretanto, qualquer vazamento substancial pode causar problemas caso atinja o maciço.

Tabela 5.8 – Fatores de influência na probabilidade de formação de fluxo concentrado associado à presença de condutos através do maciço – aplicado à Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000).

Fator de influência	Mais provável	Bastante provável	Neutro	Pouco provável
Tipo de conduto (1)	Alvenaria, tijolos, metal corrugado	Aço, ferro fundido, não envelopado	Ferro fundido envelopado com concreto. Concreto pré-moldado.	Aço envelopado com concreto. Conduto de aço, abrigado em galeria de concreto armado (3)
Juntas do conduto (1)	Juntas abertas ou trincas como sinais de erosão	Juntas abertas	Juntas de alta qualidade, com aberturas de até 5 mm com vedação.	Juntas de alta qualidade sem aberturas.
Corrosão do conduto (1)	Envelhecido, material corroído	Material envelhecido		Aço novo com proteção contra a corrosão
Detalhes do conduto (1)	Recalques significativos ou presença de solos de fundação altamente compressíveis. Junção com o shaft dentro do maciço.	Alguns recalques, solos de fundação compressíveis com baixa profundidade.		Pequeno ou nenhum recalque ou fundação em rocha.
Detalhes da trincheira do conduto (2)	Estreita, profunda, próxima a lados verticais. Trincheiras em solos (suportados por concreto)	Profundidade e largura medianas, escavado através da barragem	Taludes laterais com inclinação suave (> 1H:1V)	Trincheira localizada totalmente em rocha preenchida com concreto.

Notas: (1) O tipo de conduto, juntas, corrosão e seus detalhes afetam principalmente a ocorrência de *piping* envolvendo o conduto.

(2) Os detalhes referentes à trincheira afetam principalmente a ocorrência de *piping* ao longo do conduto.

(3) Fator de influência adicionado à tabela original.

Tabela 5.9 – Fatores de influência na probabilidade de formação de fluxo concentrado associado ao muro da galeria – aplicado à barragem de Santa Maria (modificado Foster & Fell, 2000).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco provável
Inclinação da parede	Em balanço	Vertical	Inclinação $\geq 0,1H:1V$
Condição da fundação	Solo. Muro sujeito a recalques e rotações	Solo ou rochas fracas. Sem rotação	Rochas
Colares de concreto, contrafortes, outros	Presente (particularmente se a forma torna a compactação do núcleo mais difícil).		Não presente.
Compactação especial	Sem compactação especial próximo ao muro		Compactação cuidadosa próxima ao muro.

A presença da galeria atravessando o maciço da barragem foi considerada um fato relevante, principalmente por ter sido assentada em uma trincheira estreita que dificulta a compactação do material próximo ao muro. Desta forma o *piping* poderia se desenvolver ao longo da interface maciço / galeria de concreto. Outro ponto interessante é que a estrutura, composta da torre da tomada d'água e da galeria, que comporta os dutos de adução, é rígida e em forma de 'L', apoiada no maciço da barragem, assim, movimentações desta estrutura poderiam prejudicar o contato com o solo, com o conseqüente surgimento de trincas.

5.4.1.2 - Inspeção de campo

A inspeção foi realizada após um longo período de seca, possibilitando a identificação visual de regiões com solos úmidos, tanto no talude, quanto na região logo a jusante da barragem. Nestas regiões, a vegetação, que nesta época deveria estar seca, estava verde e vistosa. Este fato analisado isoladamente não identifica uma situação de risco, mas permite uma boa indicação de caminhos preferenciais da água que percola pela barragem e sua fundação. Dentro desta ótica, dois locais chamaram a atenção: o primeiro na saída da galeria, localizada na ombreira direita (Figura 5.7), e a segunda na região a jusante da ombreira esquerda (Figura 5.8). Excetuando-se a região próxima a galeria, não havia no talude de jusante outra situação que merecesse maior de atenção.



Figura 5.7 – Detalhe da estrutura de saída da galeria da tomada d'água: a) poço de acesso à galeria (talude de jusante) com indicações de presença de água; b) detalhe da vegetação a jusante da galeria.

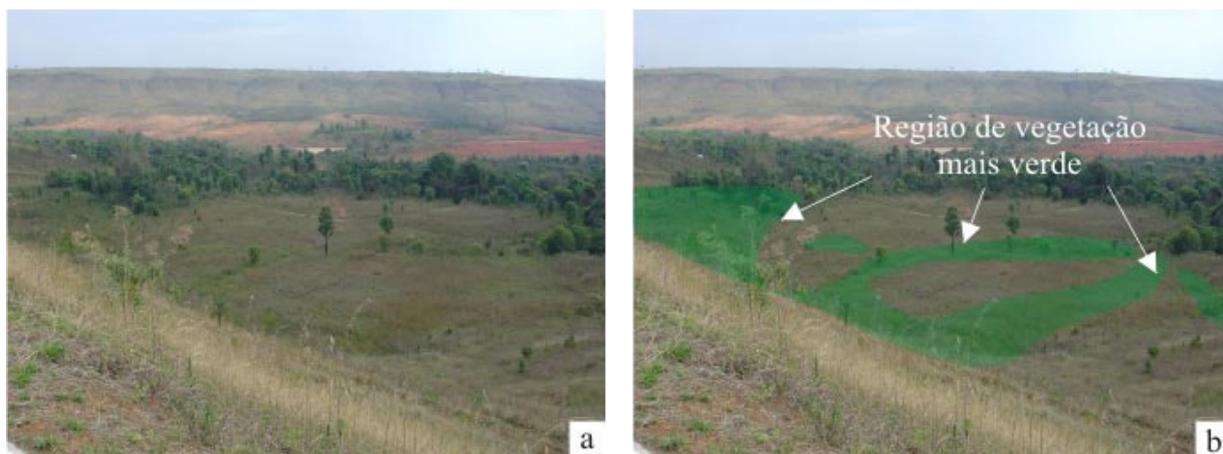


Figura 5.8 – Região a jusante da barragem: a) Vista geral; b) indicativo dos caminhos preferenciais da água percolada através do maciço e fundações.

Caminhou-se pela área identificada e não se constatou afloramento de água ou áreas superficialmente úmidas, entretanto, não foi possível adentrar áreas com vegetação muito densa para fazer esta verificação. Posteriormente à identificação, grafou-se em uma foto aérea da barragem, a localização dos filtros e drenos conjuntamente com as áreas úmidas, o resultado pode ser visualizado na Figura 5.9. Da análise desta figura, concluiu-se que o comportamento estava de acordo com o esperado, ou seja, as áreas úmidas coincidiam com a localização do tapete drenante, contudo, como citado anteriormente, duas regiões chamaram a atenção: a saída da galeria e a ombreira esquerda, nas quais não se esperava encontrar sinais de umidade do solo.

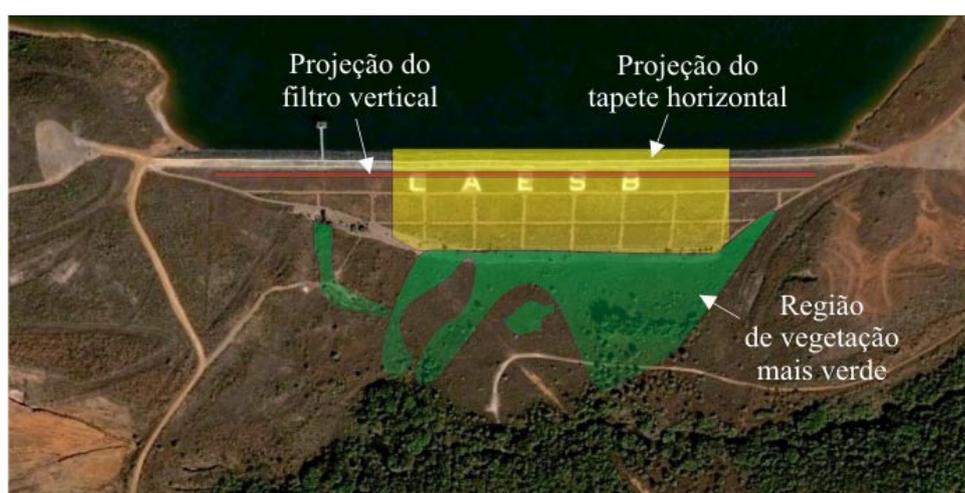


Figura 5.9 - Localização dos filtros, drenos e áreas úmidas à jusante da barragem (modificado - Google, 2009).

As duas saídas de água dos drenos de pé também foram vistoriadas. No dreno localizado mais próximo à ombreira direita, não foram constatadas vazões significantes, conforme mostrado na Figura 5.10a, entretanto, marcas deixadas no tubo e nas paredes do dreno, indicavam algum carreamento de finos, não considerado significativo. Já o dreno localizado mais próximo à ombreira esquerda apresentava vazões na ordem de 0,6 l/s, com a água límpida, não sendo constatado o carreamento de material do maciço, conforme mostrado na Figura 5.10b. Ressalta-se que no dia da inspeção o reservatório se encontrava com o nível d'água cerca de 2 m abaixo de seu nível normal (1072 m).



Figura 5.10 – Poço de inspeção da vazão de saída dos drenos, localizado próximo à ombreira direita (a) e próximo a ombreira esquerda (b).

A Figura 5.11 detalha a interação entre o dreno de pé e os poços de inspeção da vazão de saída dos drenos.

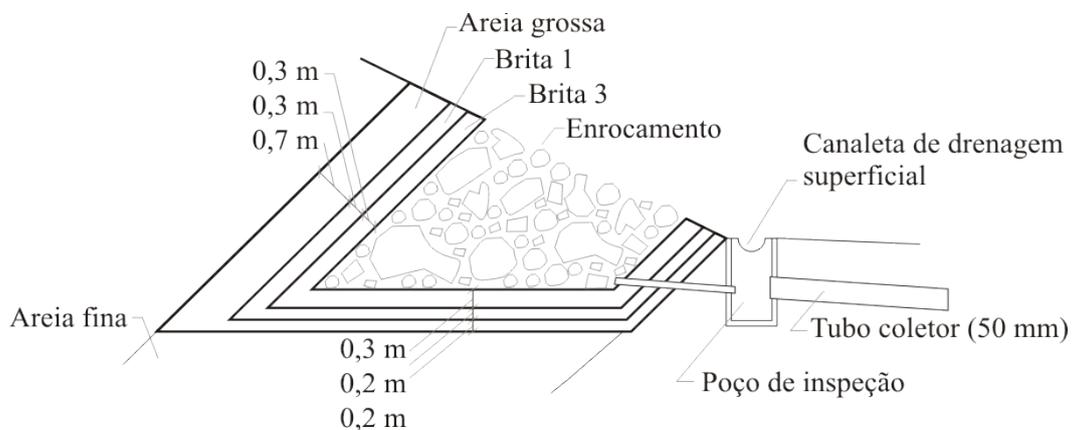


Figura 5.11 – Detalhe do dreno de pé e poço de inspeção (Geotécnica, 1971).

5.4.1.3 - Premissas adotadas para a elaboração da árvore de eventos

Do observado nos estudos de projeto e visita de campo, foram estipuladas algumas premissas básicas para subsidiar a montagem dos cenários que integrarão da árvore de eventos para o *piping*. São elas:

- O *piping* no maciço só deverá ocorrer se houver trincas ou camadas com problemas;
- O *piping* no contato maciço / galeria parece ser mais provável, principalmente, por se tratar de uma região mais complexa e que apresenta sinais de umedecimento;
- O correto funcionamento dos filtros reduz drasticamente a chance da ocorrência de um processo de *piping* no maciço;
- Acredita-se que a existência dos filtros não exerça tal influência no caso de um processo de *piping* no contato maciço / galeria;
- Uma vez iniciado um processo erosivo, este, se não impedido, irá evoluir formando o tubo (*pipe*), que irá se alargar até que haja um desabamento, por falta de capacidade de suporte, que poderá resultar em abertura da brecha de ruptura.

Apesar dos cuidados tomados nas fases de projeto e construção, os quais puderam ser constatados durante os estudos realizados, concluiu-se que um processo de *piping* é um evento cuja possibilidade de ocorrência não pode ser descartada.

O proprietário deve sempre empreender esforços no sentido de eliminar as incertezas existentes nesse tipo de problema, quer seja por meio do monitoramento, ensaios específicos, instrumentação, ou, intervenções necessárias.

5.4.2. Estudo da vulnerabilidade ao galgamento

A barragem de Santa Maria dispõe de um registro de cotas diárias do nível d'água que abrange cerca de vinte e um anos de medições, o que corresponde a aproximadamente 50% de sua vida útil. Com base nestes registros, foi traçada a Curva de Frequência mostrada na Figura 5.12.

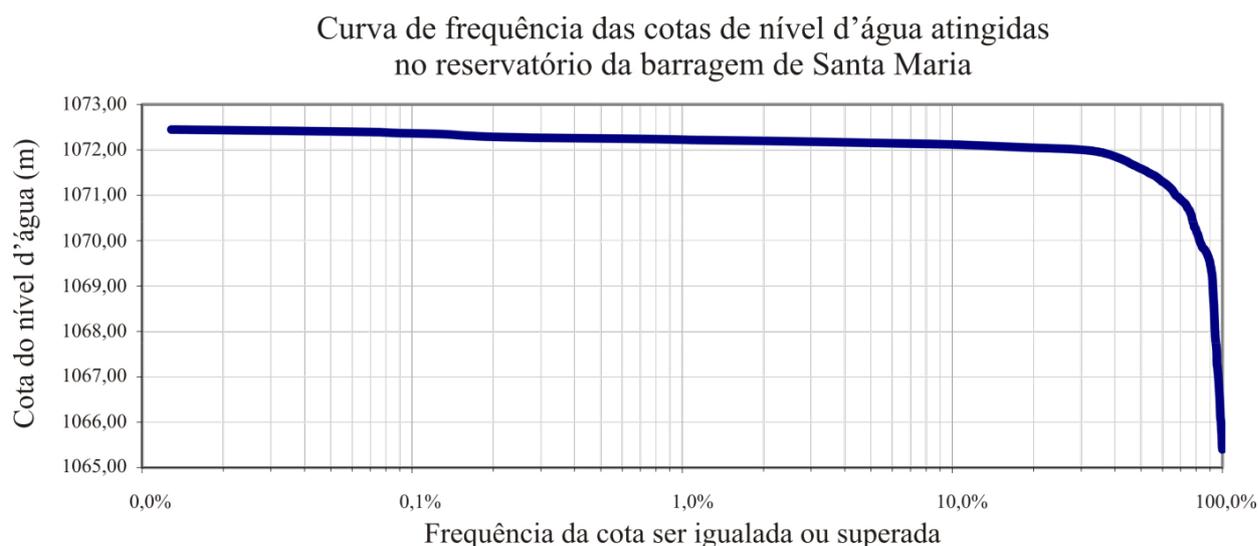


Figura 5.12. Curva de frequência das cotas de nível d'água diárias atingidas no reservatório da barragem de Santa Maria no período de 13 de fevereiro de 1987 a 31 de maio de 2008.

Da análise desta curva, constatou-se que o nível d'água do reservatório igualou ou superou a cota 1072 m em apenas 30% das vezes, ou seja, em 70% do tempo de medição a barragem não verteu. A cota máxima registrada ocorreu em 22 de dezembro de 1989 e atingiu a elevação 1072,45 m, a mínima, em 25 de fevereiro de 1987, atingindo 1065,4 m, correspondendo a uma amplitude de quase 7 m. A média das 7779 medições foi a cota 1071,06 m, sendo o valor mais frequente (moda), 1071,98 m.

Para uma melhor compreensão do comportamento do reservatório, grafou-se o histograma de frequência das cotas atingidas, ilustrado na Figura 5.13, o qual demonstrou que, se desconsiderados 5% das maiores cotas e 5% das menores, 90% das medições realizadas estavam situadas entre as cotas 1067,64 e 1072,15 m.

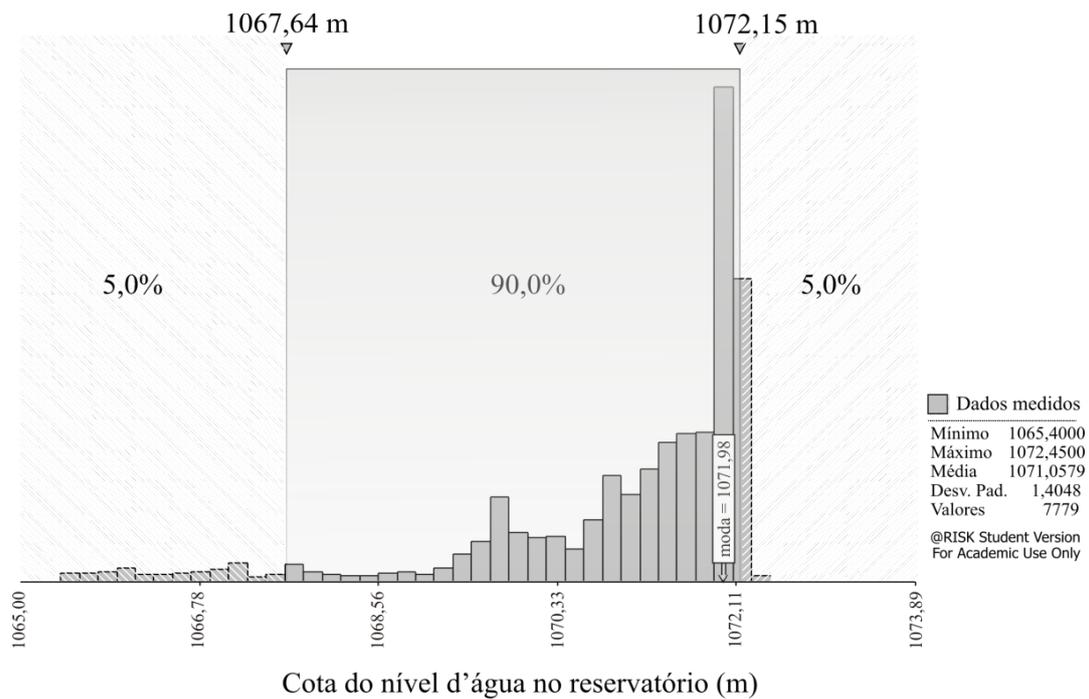


Figura 5.13 - Histograma de frequência das cotas de nível d'água diárias atingidas na barragem de Santa Maria no período de 13 de fevereiro de 1987 a 31 de maio de 2008.

O reservatório possui capacidade para armazenar aproximadamente $58,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água em seu nível normal de operação, capacidade esta que pode chegar a $64,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, se a cota 1073 m for atingida. Dado que a moda da série de cotas medidas ficou quase na elevação 1072 m, observou-se que geralmente se dispõe um volume de 6 milhões de metros cúbicos para suportar o período de chuvas, sem considerar a vazão que é liberada pelo vertedouro que pode atingir até $107,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

As curvas cota-área e cota-volume do reservatório foram redesenhadas e encontram-se ilustradas na Figura 5.14.

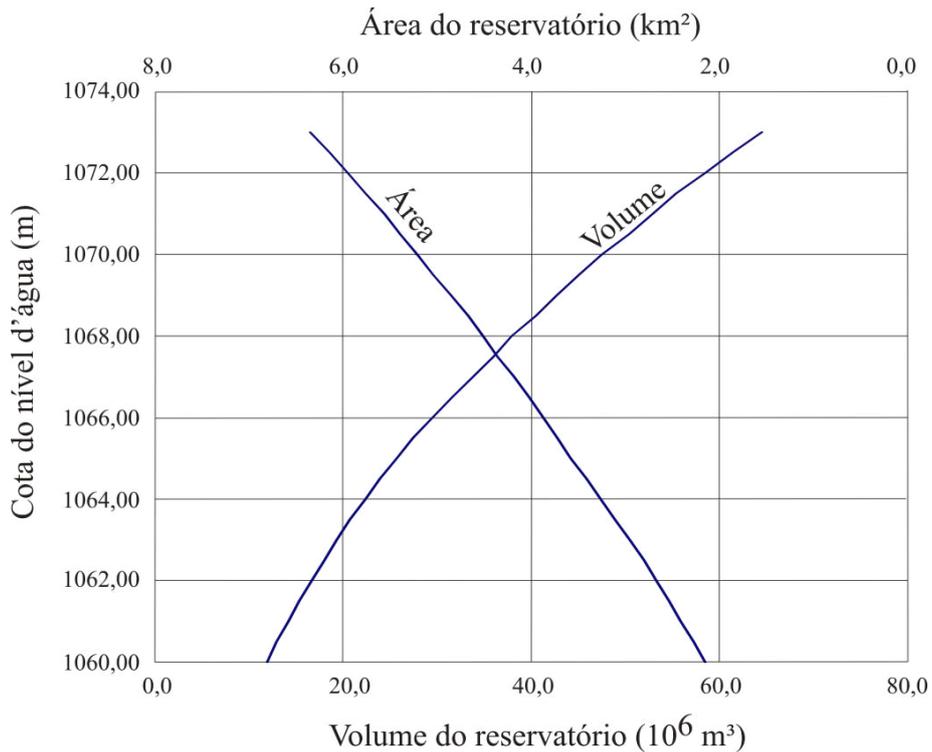


Figura 5.14 - Curva Cota x Área, Cota x Volume do reservatório da barragem de Santa Maria (CNEC, 1978).

Para facilitar o trato com os dados de volume do reservatório e área de superfície do espelho d'água, utilizou-se das leituras destas curvas para obter as seguintes equações, nas quais o volume é dado em hm³, a área em km² e a cota em m:

$$\text{Volume} = 0,156859585 \times \text{cota}^3 - 330,540310134 \times \text{cota} + 174137,301257632 \quad (5.1)$$

$$\text{Área} = 0,00507886 \times \text{cota}^2 - 10,511193381 \times \text{cota} + 5437,39345396 \quad (5.2)$$

O vertedouro da barragem de Santa Maria é do tipo Creager, com coeficiente de vazão de 2,11 e comprimento de 51,04 m. O estudo de descarga foi realizado pela seguinte equação:

$$Q_v = 2,11 \times 51,04 \times h^{3/2} \quad (5.3)$$

Onde:

Q_v é a vazão de descarga do vertedouro (em m³/s);

h é a altura da lâmina d'água sobre a crista (em m);

Para análise da parcela de participação do vertedouro no controle do nível d'água e consequentemente na segurança da barragem ao galgamento, utilizou-se a Equação 5.3 para calcular a vazão vertente para cada incremento de 5 cm na cota do NA, assim, conhecendo o incremento de volume (ΔV) acumulado no reservatório, por meio da Equação 5.1, foi possível estimar o tempo que levaria para o esgotamento desse ΔV . Observa-se que foi considerado somente a atuação das vazões de descarga do vertedouro, sem nenhuma outra contribuição de entrada ou saída de água no reservatório. Os resultados encontram-se agrupados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Tempo aproximado de rebaixamento do nível d'água do reservatório da barragem de Santa Maria, entre as cotas 1073 a 1072 m, considerando apenas a descarga do vertedouro.

Cota do NA de referência	ΔV no reservatório (m³) (Eq. 5.2)	Vazão do vertedouro (m³/s) (Eq. 5.4)	Tempo necessário p/ o rebaixamento de 5 cm até a cota de referência	Tempo total acumulado, necessário para o rebaixamento do NA, da cota 1073 até a cota de referência
1072,00	0	0	6 dias	9,5 dias
1072,05	288.700	1,2	1 dias	4 dias
1072,10	289.500	3,4	17 h	3,5 dias
1072,15	290.300	6,3	10 h	2 dias
1072,20	291.100	9,6	7 h	1,5 dia
1072,25	291.900	13,5	5 h	1,3 dia
1072,30	292.600	17,7	4 h	1 dia
1072,35	293.400	22,3	3 h	21 h
1072,40	294.200	27,2	3 h	18 h
1072,45	295.000	32,5	2 h	15 h
1072,50	295.800	38,1	2 h	13 h
1072,55	296.600	43,9	2 h	11 h
1072,60	297.400	50,0	2 h	9 h
1072,65	298.100	56,4	1 h	7 h
1072,70	298.900	63,1	1 h	6 h
1072,75	299.700	69,9	1 h	5 h
1072,80	300.500	77,1	1 h	4 h
1072,85	301.300	84,4	1 h	3 h
1072,90	302.100	91,9	50 min.	2 h
1072,95	302.800	99,7	50 min.	50 min.
1073,00	303.600	107,7		

Durante o enchimento ou mesmo esvaziamento do reservatório é notório que outros fatores deveriam ser considerados, como, por exemplo, as vazões de entrada e saída, onde se incluem aquelas que são captadas para suprir a demanda de abastecimento. A consideração de todos os fatores que exerceriam influência na entrada e saída de água do reservatório, como alguns que se encontram ilustrados na Figura 5.15, seria, para efeitos deste trabalho, dispendiosa e desnecessária, portanto, optou-se por estudar primeiramente somente a contribuição do escoamento superficial direto (rios) e da vazão captada para o abastecimento e, se necessário,

posteriormente agregar mais detalhes, como por exemplo, a influência de precipitações intensas.

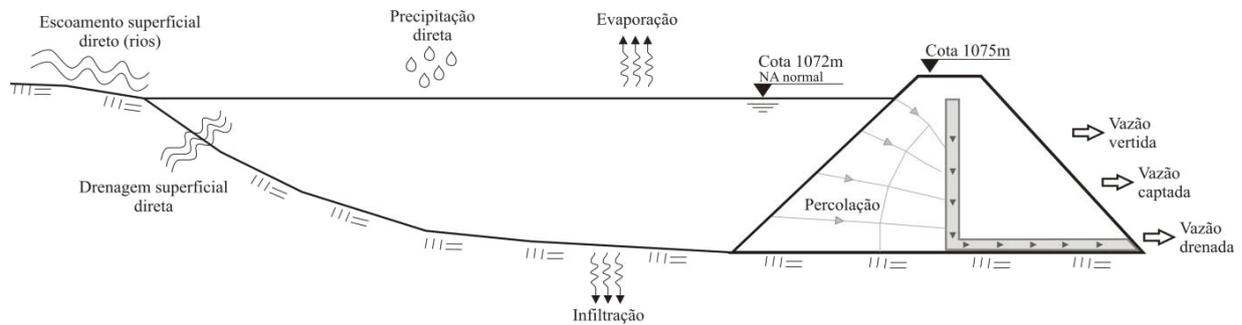


Figura 5.15 – Esquema geral de uma barragem com indicação de alguns fatores que influenciam o NA.

Como o reservatório é alimentado pelos córregos Santa Maria, Vargem Grande e Milho Cozinho, adotou-se a soma de suas vazões como a principal contribuição para seu enchimento. O hidrograma ilustrado na Figura 5.16 condensa as informações sobre as vazões afluentes.

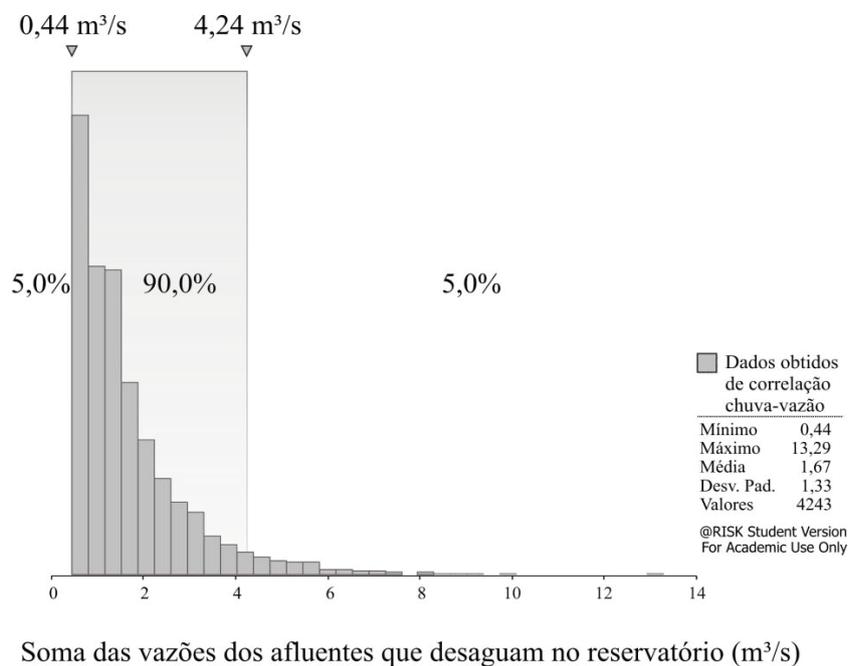


Figura 5.16 - Histograma das vazões de alimentação do reservatório de Santa Maria

O histograma foi obtido a partir de dados oriundos de uma correlação entre chuva-vazão, desenvolvida com o objetivo de obter vazões que representassem períodos chuvosos e

períodos secos, uma vez que os dados oriundos da medição de vazão direta nem sempre foram realizadas em dias representativos do período.

Os dados das vazões captadas consistiam de uma série de 222 dados que eram médias mensais de captações diárias, no período de janeiro de 1990 a junho de 2008. Estes dados foram tratados estatisticamente, resultando no histograma mostrado na Figura 5.17.

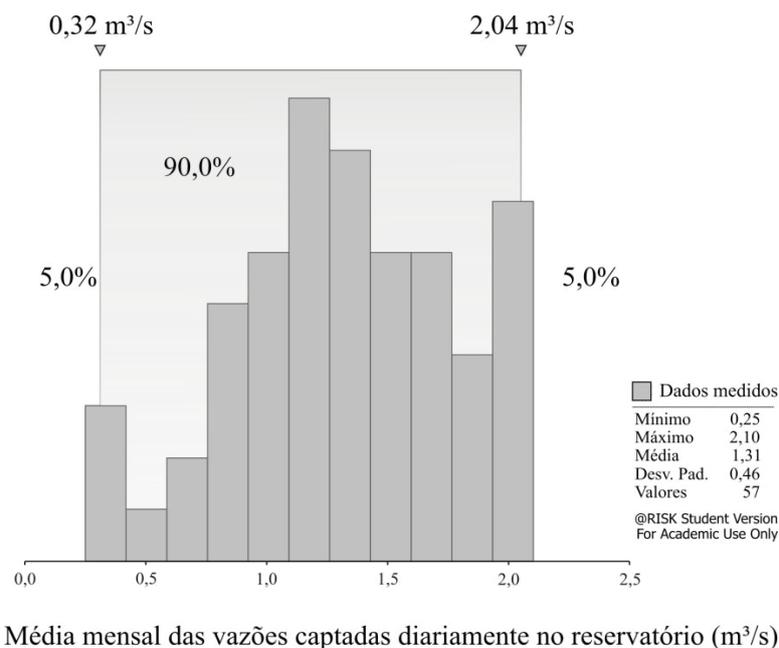


Figura 5.17 - Histograma das vazões captadas do reservatório de Santa Maria

As captações mínimas e máximas foram determinadas pela capacidade das bombas da estação elevatória do Torto, composta de quatro máquinas com capacidade de 0,7 m³/s, das quais uma é mantida como reserva do sistema. Assim a amplitude nominal de vazão total seria de 0 à 2,1 m³/s, o que demonstra que o sistema costuma ser utilizado em sua plenitude.

5.4.2.1 - Inspeção de campo

Na inspeção de campo procuraram-se indícios que pudessem representar fatores de vulnerabilidade da barragem ao galgamento, assim foram analisadas questões como recalques superficiais acentuados, presença de erosões ou rachaduras na crista, buracos ou afundamentos no talude de montante e falhas na proteção do talude de jusante.

A crista se encontrava em um bom estado de conservação, sendo observado apenas alguns poucos buracos, resultado principalmente do tráfego de veículos. Não foi constatada nenhuma perda de borda livre decorrente de buracos ou afundamentos. O alinhamento do meiofio indicava que até mesmo os eventuais recalques sofridos durante a vida útil da barragem foram pequenos e visualmente imperceptíveis, conforme pode ser observado na Figura 5.18.



Figura 5.18 – Foto demonstrando o bom estado de conservação do pavimento e perfeito alinhamento do meiofio.

O talude de montante é protegido por uma camada de Rip-Rap na faixa de maior oscilação do nível d'água do reservatório. A principal função deste tipo de cobertura é o de proteger o talude contra erosões causadas pelas ondas que se formam no reservatório. No entanto, foram constatadas falhas nesta proteção numa faixa que se estende horizontalmente por todo o talude. Em vários pontos foi possível constatar a formação buracos resultantes do processo erosivo, conforme ilustrado na Figura 5.19. A progressão dessas erosões poderia vir a causar desmoronamentos na crista com conseqüente redução da borda livre.



Figura 5.19 - Falhas na proteção do talude de montante e surgimento de buracos de erosão.

O talude de jusante é composto de três lances com inclinação 1V:2H, intercalados por duas bermas de serviço. Esse talude foi projetado para ser protegido por grama, entretanto, foi constatado que o que predomina é um tipo de capim, que não evita que uma grande parte da área de superfície fique desprotegida e sujeita à erosão. As erosões constatadas eram superficiais, não tendo sido identificada nenhuma mais profunda ou caminhos preferenciais de água. A Figura 5.20 ilustra a situação encontrada.



Figura 5.20 - Talude de jusante: falhas na proteção e constatação de início de erosão.

A região próxima ao vertedouro foi considerada outra área passível de galgamento. Nesta, o aterro está confinado entre o terreno natural e o muro do vertedouro, com a função, tanto de reconstituir a área escavada para a construção dessa estrutura de concreto armado, quanto compatibilizar as cotas de coroamento do empreendimento, conforme mostrado na Figura 5.21. Este pequeno maciço se encontra nas mesmas condições do maciço principal da barragem, descritas anteriormente.



Figura 5.21 - Aterro na região do vertedouro: a) vista de montante; b) vista de jusante.

Nesta região, uma parte da proteção do talude de montante foi removida, tanto pelo efeito das ondas, quanto pela influência das altas velocidades de aproximação da água próximas a crista do vertedouro. Estes blocos de pedra, deslocados pela força da água, possuíam diâmetro de cerca de 20 cm, foram encontrados a 250 m de distância de seu local original, na bacia de dissipação e no canal de restituição, conforme indicado na Figura 5.22.



Figura 5.22 - Deslocamento do material do Rip-Rap pela força da água.

5.4.2.2 - Premissas adotadas para a elaboração da árvore de eventos

Do observado nos estudos de projeto e visita de campo, foram estipuladas algumas premissas básicas que nortearam a montagem dos cenários para serem representados na árvore de eventos. São elas:

- O NA do reservatório deve ser a principal informação, pois, em função dele, haverá um maior, ou menor, chance de que eventos adversos resultem no galgamento da barragem;
- O que causaria um galgamento na barragem seria somente uma combinação entre um NA elevado, provavelmente maior do que os já registrados, e um evento adverso extremo. Este evento, por sua vez, causaria vazões afluentes superiores à capacidade de descarga do vertedouro, resultando num aumento do NA, de um valor Δh , maior que a borda livre disponível no momento do incidente;
- Outra possibilidade de ocorrer o galgamento decorreria de falha na proteção do talude de montante, que causariam erosões e consequentes desabamentos no mesmo, resultando na perda de borda livre da barragem, que permitiria a passagem de água sobre o maciço;

- Uma vez que a água do reservatório atingisse o talude de jusante, as características físicas da barragem (inclinação do talude, existência de bermas etc.) e a qualidade da proteção vegetal existente favoreceriam a erosão do mesmo, podendo resultar na abertura de brecha de ruptura.

Entretanto, devido ao fato de o NA da barragem de Santa Maria nunca ter superado a cota Elev. 1072,45 m, de o vertedouro ter sido dimensionado para um tempo de recorrência de 10.000 anos, e dos problemas encontrados na barragem poderem ser resolvidos facilmente e mantidos em condições satisfatórias, acredita-se que uma situação de galgamento dificilmente ocorrerá.

5.4.3. Estudo da vulnerabilidade à instabilidade de taludes

Da análise dos documentos “como construído” verificou-se que o talude de montante passou a ter três trechos com inclinações distintas: 1V:3H, 1V:4,5H e 1V:2H, diferente da configuração proposta no projeto original, que previa apenas duas inclinações: 1V:3H e 1V:1,5H.

O talude de jusante também foi alterado frente à proposta original, na qual os lances tinham inclinações 1V:1,5H, 1V:2H e 1V:2,5H e passaram a ter inclinação 1V:2H, interrompido por duas bermas de serviço.

Os materiais constituintes do maciço foram oriundos de três jazidas distintas, que juntamente com adições de cascalho, compuseram cinco regiões de aterro. A Figura 5.23 esquematiza a distribuição dos materiais pelo maciço da barragem e fornece a inclinação dos taludes.

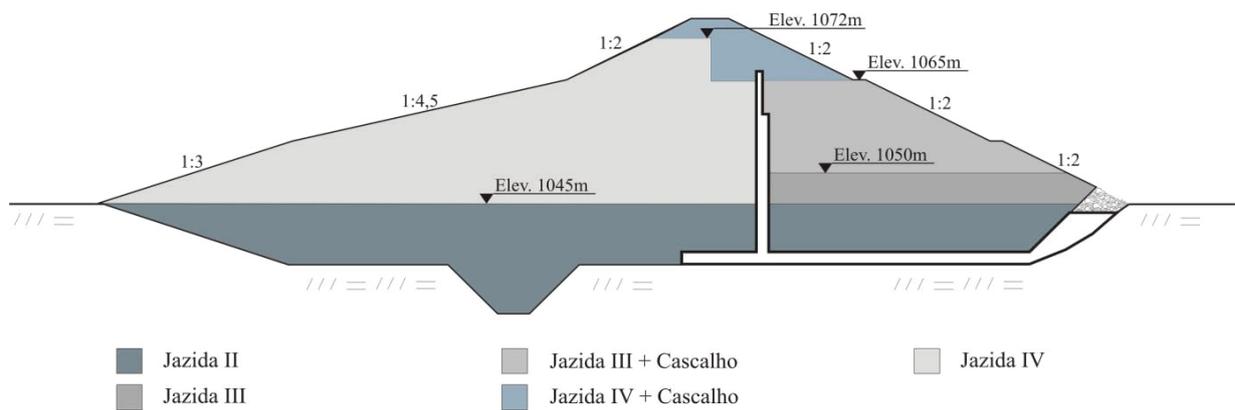


Figura 5.23 - Distribuição dos materiais de diferentes jazidas pelo maciço da barragem e inclinações dos taludes.

A configuração final dos taludes foi considerada dentro do normal para uma barragem de terra e os materiais das jazidas também foram considerados adequados, sendo identificados como argilosos.

Optou-se por verificar a estabilidade do talude de jusante adotando-se como condição de contorno o NA máximo maximorum, ou seja, com o nível d'água na cota 1073 m, pois sendo estável nestas circunstâncias, também seria para as demais cotas de NA operacionais. Para esta análise, foi utilizado para isso o pacote de programas GeoStudio (GEOSLOPE International, Versão 6.02, 2004).

Para fins de modelagem, a barragem e suas fundações foram divididas em quinze regiões distintas, englobando drenos (vertical, horizontal e de pé), maciço e fundações, nas quais estariam representados doze tipos de materiais. A Figura 5.24 ilustra as regiões e os números dos materiais utilizados, que são descritos na Tabela 5.11.

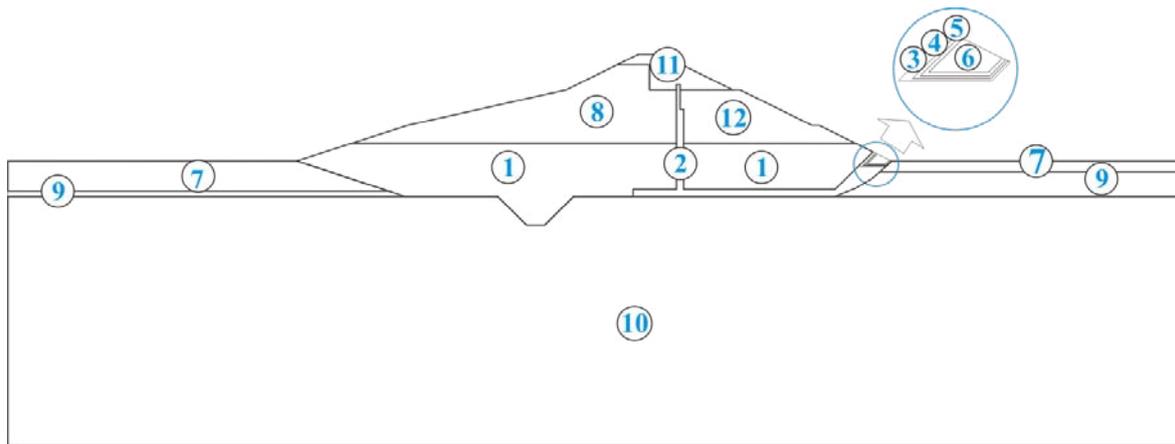


Figura 5.24 - Distribuição das regiões e materiais adotados na modelagem utilizada para a verificação da estabilidade de taludes da barragem.

Tabela 5.11 - Descrição dos materiais empregados na modelagem, parâmetros geotécnicos e permeabilidades adotadas.

Material	Descrição	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (^o)	k (m/s) (na saturação)	kv/k
1	Argila 1 - maciço	18	10	20	3×10^{-7}	0,1
2	Areia drenos vertical e horizontal	19	5	30	1×10^{-4}	1
3	Areia grossa – transição dreno de pé	19	0	30	2×10^{-4}	1
4	Brita 1 - transição dreno de pé	25	0	35	1×10^{-3}	1
5	Brita 3 - transição dreno de pé	25	0	35	1×10^{-2}	1
6	Enrocamento do dreno de pé	30	0	40	1×10^{-1}	1
7	Argila orgânica - fundação	16	15	15	1×10^{-7}	1
8	Argila 2 - maciço	18	10	20	3×10^{-7}	0,1
9	Ardósia alterada - fundação	25	50	35	1×10^{-8}	1
10	Ardósia - fundação	30	100	45	1×10^{-10}	1
11	Argila 3 - maciço	18	30	25	4×10^{-7}	0,1
12	Argila 4 - maciço	18	30	25	4×10^{-7}	0,1

Os valores listados na Tabela 5.11 foram estimados com certo conservadorismo, contudo, quando possível, respeitou-se a ordem de grandeza das informações existentes na documentação da barragem de referência (Geotécnica, 1971). Como simplificação, para os materiais argilosos do maciço, adotou-se um valor de permeabilidade único para aqueles sem a adição de cascalho (materiais 1 e 8) e outra para aqueles com adição (materiais 11 e 12). Considerou-se também, que a permeabilidade, na direção horizontal, seria 10 vezes maior que na vertical, buscando-se representar os efeitos do processo da compactação em camadas. Os demais valores de permeabilidade necessários para a simulação também foram estimados. A saída gráfica do programa é mostrada na Figura 5.25.

A análise foi iniciada com o estudo da percolação de água pelo maciço, considerando o nível d'água no reservatório na sua cota máxima *maximorum*, utilizando-se, o programa SEEP/W (GEOSLOPE International, Versão 6.02, 2004).

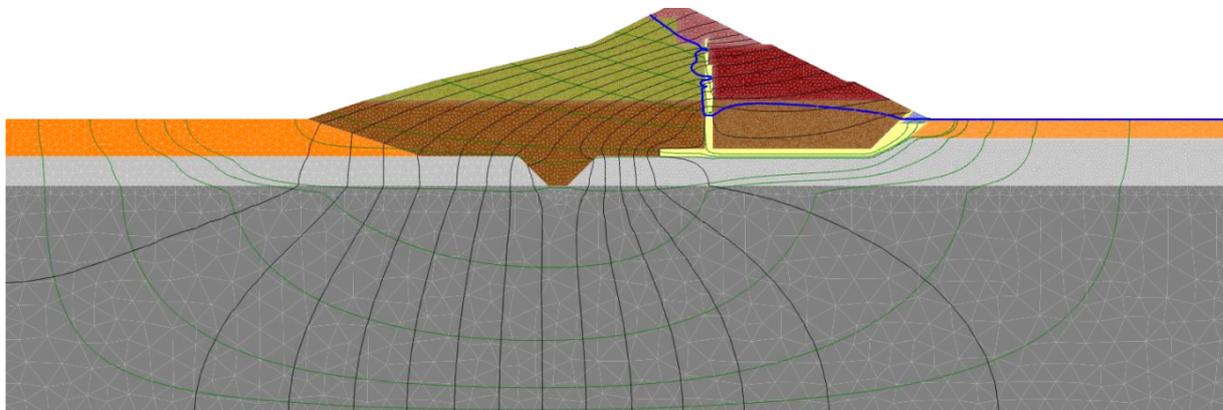


Figura 5.25 - Análise de percolação da barragem com o nível do reservatório na cota 1073 m.

Após a simulação, observou-se o comportamento da linha freática, a qual corretamente se dirigiu à região superior do dreno vertical e, já no talude de jusante, representou bem a região de saturação do maciço. Constatou-se também um trecho de comportamento errático da freática na região de fronteira entre o material do maciço e de dreno. Considerou-se que isso ocorreu devido à grande diferença de permeabilidade entre os materiais e principalmente devido ao fato de o dreno ser mais esbelto em sua parte superior. Concluiu-se, contudo, que tal fato não comprometeria a análise da estabilidade do talude de jusante.

A vazão resultante desta percolação girou em torno dos 2 l/s (considerando todo o comprimento da barragem com mesma seção transversal da análise), que pode ser considerada dentro do esperado se comparada com a vazão que foi medida nos drenos de aproximadamente 0,6 l/s quando o nível d'água estava na cota 1070 m. Os resultados do estudo da percolação foram utilizados como dados de entrada para a verificação da estabilidade do talude de jusante.

O coeficiente de segurança obtido da análise da estabilidade de taludes foi de 1,2 e uma linha de ruptura que se delineou na região saturada do maciço, como pode ser visualizada na Figura 5.26. Ressalta-se que esta análise foi realizada utilizando-se de dados determinísticos que foram estimados, uma vez que um aprofundamento deste estudo não fazia parte do escopo do

trabalho, contudo, uma análise estatística da estabilidade do talude também poderia ser feita, uma vez que existem dados disponíveis no projeto para tal.

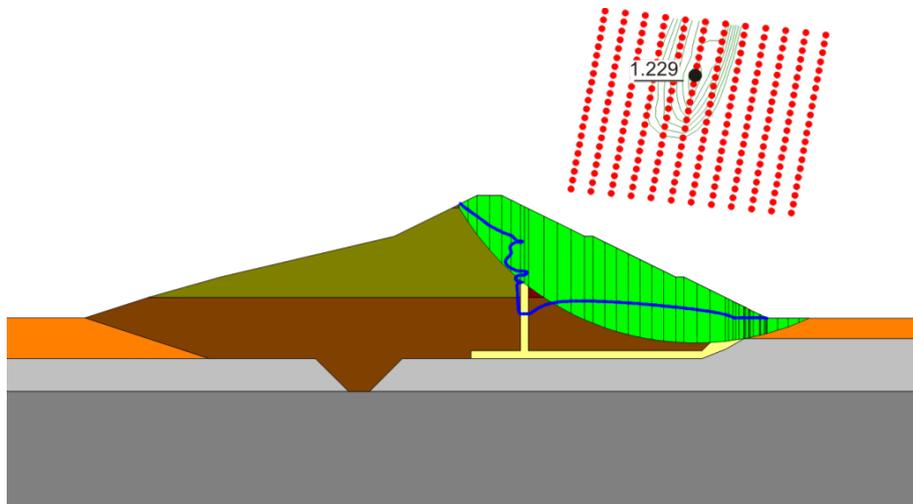


Figura 5.26 - Análise da estabilidade do talude de jusante da barragem com o nível do reservatório na cota 1073 m.

5.4.3.1 - Inspeção de campo

Não foi constatada visualmente nenhuma trinca no coroamento ou sinais nos taludes que pudessem indicar quaisquer indícios de movimentação ou deslocamentos de terra, que poderiam ser resultado de instabilidade, tanto para o maciço principal quanto para o aterro próximo ao vertedouro. A Figura 5.27 ilustra a situação geral do talude de jusante.



Figura 5.27 - Talude de jusante da barragem de Santa Maria sem indícios de movimentação ou deslocamentos de terra.

5.4.3.2 - Premissas para a elaboração da árvore de eventos

Do observado da análise de estabilidade e do constatado em campo, foram estipuladas algumas premissas básicas que orientaram a montagem dos cenários, que seriam descritos na árvore de eventos. São elas:

- Uma eventual instabilidade do talude seria resultado, principalmente, de uma falha na capacidade dos drenos, que resultaria no aumento das poropressões e redução da capacidade resistiva do material devido à molhagem;
- Próximo à galeria da tomada d'água, eventuais caminhos preferenciais, resultantes de falhas no contato maciço / galeria, podem causar a molhagem do talude de jusante, causando perda da capacidade resistiva.

Sob condições normais de funcionamento, a barragem de Santa Maria pode ser considerada segura quanto à estabilidade, entretanto, como o controle de percolação no maciço é realizado por meio dos drenos, vertical e horizontal, sua eficiência é um dos pontos vitais para a segurança da obra, principalmente após 38 anos operação. Uma falha na capacidade destes elementos de efetivamente drenar a água percolada no maciço poderia resultar no aumento da poropressão e causar a instabilidade do talude de jusante. Outro ponto relevante é a possibilidade de o nível d'água superar a cota 1073 m e a linha freática se posicionar acima do topo do dreno vertical (cuja cota de topo está na Elev. 1066,55 m), pois nesta situação, a molhagem do maciço de jusante também poderia afetar a estabilidade do talude.

Considerou-se que um monitoramento adequado seria suficiente para manter a barragem em segurança, em termos da estabilidade de seus taludes.

5.5. Proposta das árvores de eventos

Com base nas análises de projeto e informações coletadas por meio da inspeção de campo, condensadas nos itens anteriores, três séries de cenários foram propostas para a barragem hipotética objeto de estudo.

A primeira série refere-se aos eventos relacionados à ocorrência de *piping* e encontra-se ilustrado na Figura 5.28; a segunda ao galgamento, apresentada na Figura 5.29; e a terceira a um eventual caso de instabilidade de taludes, conforme se constata na Figura 5.30.

Nestas árvores de eventos se procurou colocar de maneira clara e objetiva os pontos que foram considerados como sendo de vulnerabilidade e que poderiam resultar em falhas. Além disso, buscou-se elaborar uma sequência de eventos que proporcionasse não só um entendimento de um provável comportamento da barragem frente a uma solicitação adversa, mas também pudesse ser considerada como um ponto de partida para discussões, permitindo “percepções” (*insight*) sobre o tópico em questão, podendo ser aprimorada à medida que novas informações ou dados fossem inseridos ou algumas questões fossem mais bem compreendidas.

Assim estas árvores de eventos foram concebidas como árvores de eventos iniciais, que podem e devem ser corrigidas, modificadas, substituídas ou até mesmo descartadas à medida que o estado do conhecimento se aprimora.

Esta interação e possibilidade de repetitividade (do processo) é um dos princípios da gestão de riscos. Outra característica que foi observada é que nem todos os eventos descritos nestas árvores podem ser diretamente quantificados, o que também não ofusca o ganho qualitativo que se tem com esse processo.

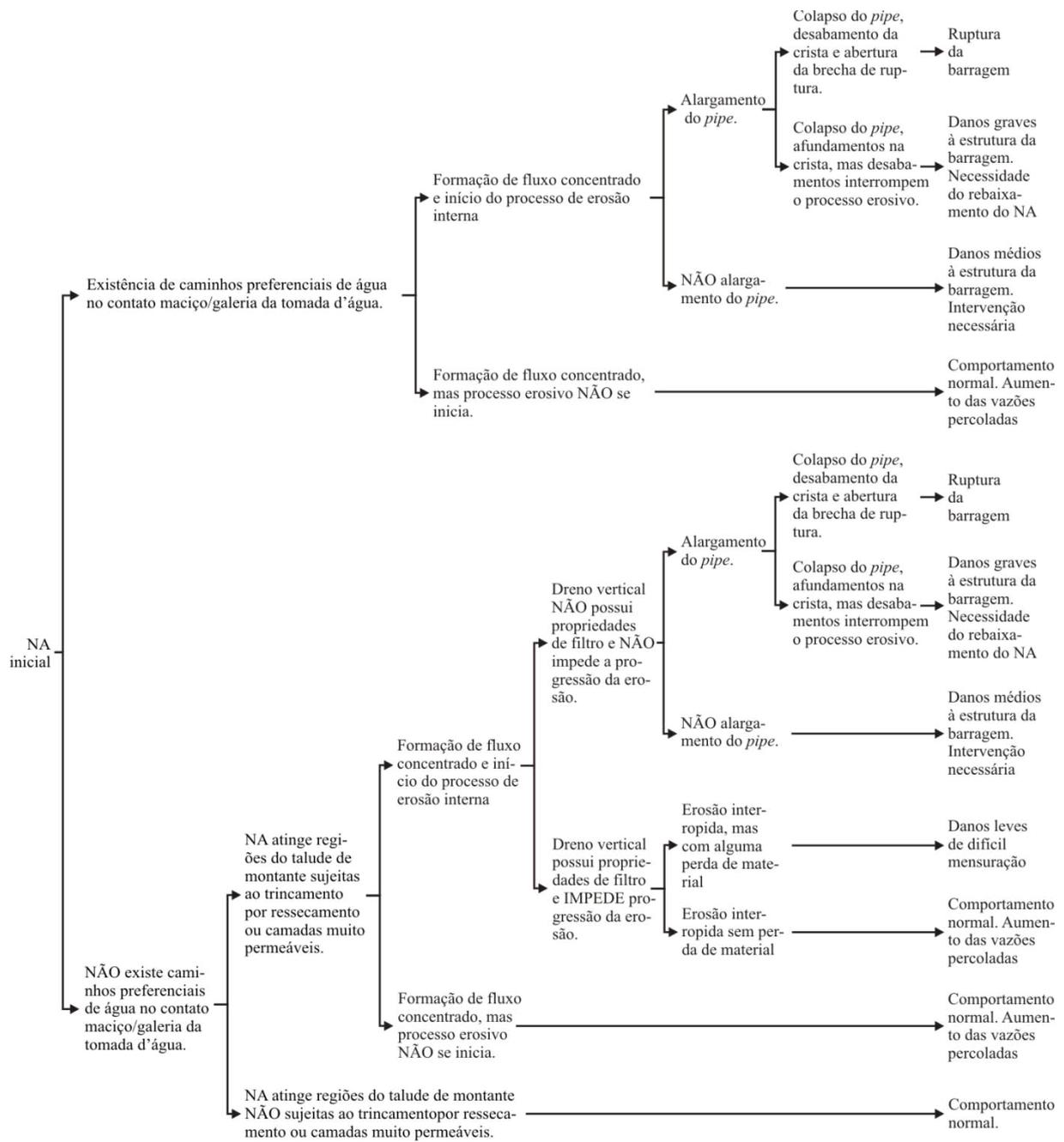


Figura 5.28 – Árvore de eventos para o *piping* do caso-estudo da barragem.

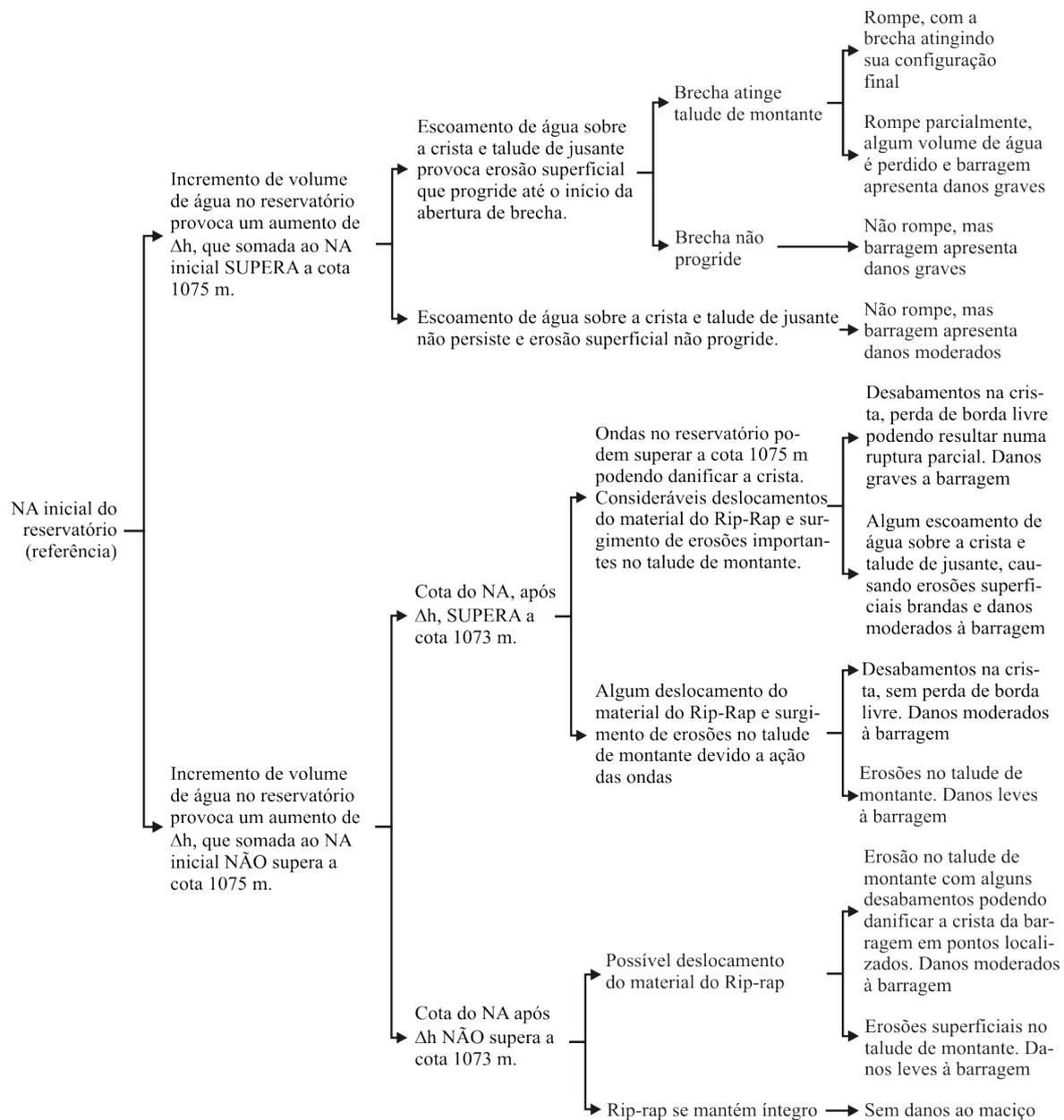


Figura 5.29 – Árvore de eventos para o galgamento do caso-estudo da barragem.

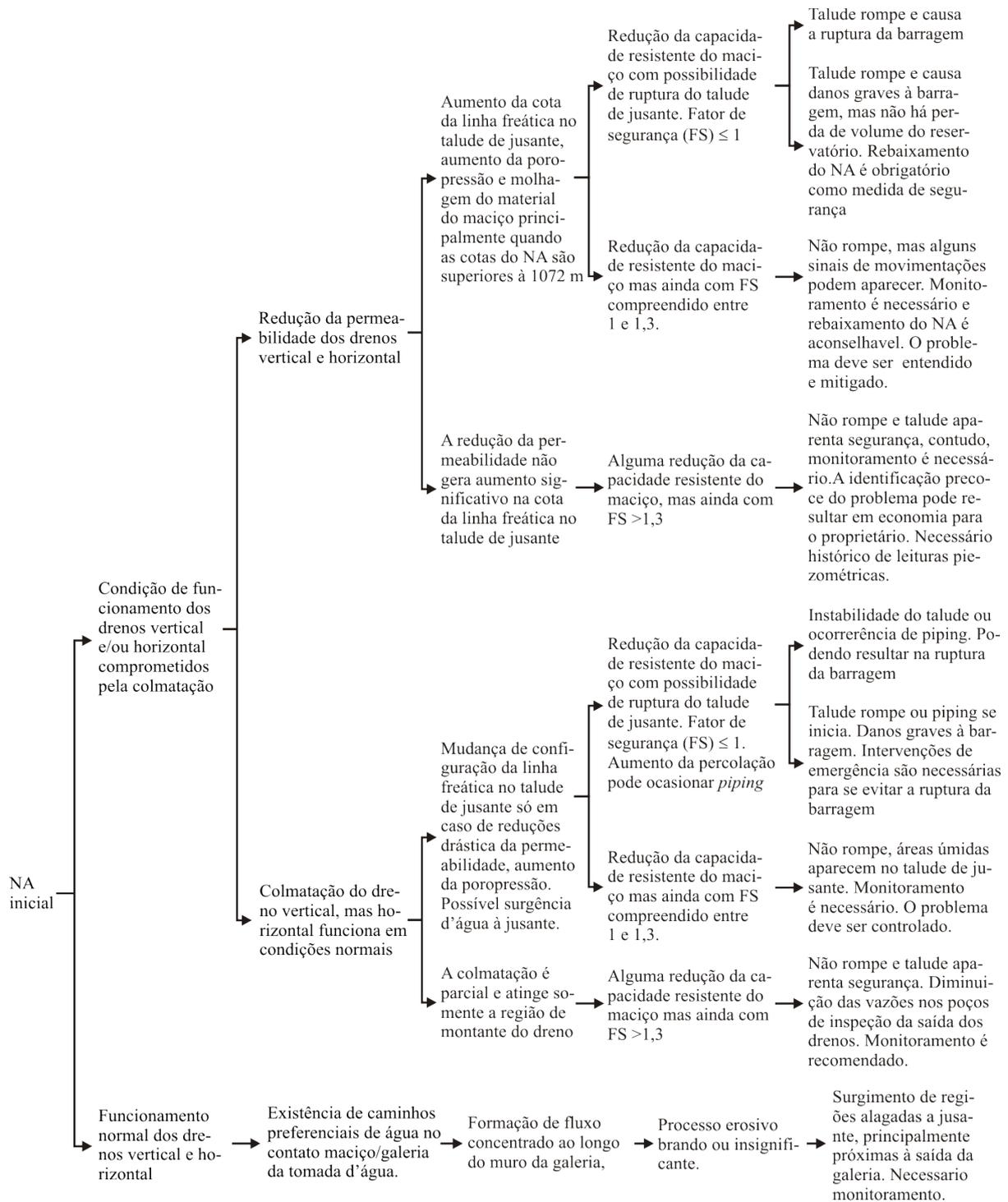


Figura 5.30 - Árvore de eventos para a instabilidade do talude de jusante do caso-estudo da barragem.

5.6. Quantificação das probabilidades dos cenários da árvore de eventos para o *piping*

Diante da maior possibilidade de ocorrência do *piping*, frente ao galgamento e instabilidade de taludes, identificado nos estudos anteriores, optou-se por proceder à quantificação apenas do primeiro, de forma a obter uma maior compreensão sobre o mesmo. Para quantificar a probabilidade de ocorrência de cada cenário, ou seja, de cada ramo da árvore de eventos, foi necessário primeiramente quantificar cada um dos eventos que o compunha. Para tanto, utilizou-se de critérios, ora puramente estatísticos, quando se dispunha de dados, ora baseados no julgamento de valor e ora na combinação de ambos, que permitiram atribuir valores numéricos a estes eventos. Os eventos estudados encontram-se condensados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Lista dos eventos relacionados à ocorrência de *piping* da barragem e forma de análise adotada para quantificação.

Evento estudado	Fonte de informação	Tratamento adotado	Resultado esperado
Nível d'água no reservatório	Direta – Série histórica de medições diárias	Tratamento estatístico dos dados e ajuste de distribuição de probabilidade	Distribuição de probabilidade das cotas de nível d'água do reservatório
Surgimento de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria da tomada d'água	Indireta – Características construtivas e comportamento da fundação	Elaboração de árvore de falhas fundamentada nos fatores de influência identificados por Foster & Fell (2000a)	Quantificação da probabilidade de ocorrência do evento de topo por meio da análise qualitativa dos fatores de influência
Existência de trincas no maciço que permitam a formação de fluxo concentrado	Indireta – Características do material do maciço e aspectos construtivos	Elaboração de árvore de falhas fundamentada nos fatores de influência identificados por Foster & Fell (2000a)	Quantificação da probabilidade de ocorrência do evento de topo por meio da análise qualitativa dos fatores de influência
Início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado	Inexistente	Julgamento de engenharia	A probabilidade de se iniciar a erosão será tabelada em função da carga hidráulica atuante
Capacidade dos drenos em impedir o carreamento de finos	Indireta – Características relativas entre o material utilizado nos drenos e no maciço.	Utilização da metodologia proposta por Foster & Fell (2001)	Quantificação da probabilidade do filtro impedir o avanço da erosão (análise qualitativa baseada no diâmetro característico dos grãos)
Grau de progressão do processo erosivo (alargamento do <i>pipe</i>)	Indireta – Características do material do maciço	Elaboração de árvore de falhas fundamentada nos fatores de influência identificados por Foster & Fell (2000a)	Quantificação da probabilidade de ocorrência do evento de topo por meio da análise qualitativa dos fatores de influência
Colapso do <i>pipe</i>, desabamento da crista e abertura da brecha	Inexistente	Julgamento de engenharia	Quantificação da probabilidade com base em valores estipulados

A maioria dos eventos listados na Tabela 5.12 não pôde ser quantificada diretamente, o que é uma característica dos problemas relacionados ao *piping*, que envolvem processos erosivos de difícil mensuração e identificação e onde raramente se obtém registros de casos semelhantes. Diante deste quadro, quando possível, optou-se por se avaliar o evento utilizando-se de árvores de falhas, nas quais o evento estudado passou a ser o evento de topo e se procurou identificar fatores de influência que resultam na sua ocorrência. Entretanto, cada um desses fatores é na verdade um evento isolado que combinado a outros resulta no evento de topo e que, portanto, também precisam ser quantificados.

Para os eventos que não permitiam um tratamento estatístico (por não se dispor de dados), foi utilizado um método semi-quantitativo que associou valores de probabilidade a uma descrição, com base nos conhecimentos de engenharia do autor, para a quantificação da possibilidade da ocorrência dos mesmos. A Tabela 5.13 apresenta a associação entre a descrição dos eventos e a probabilidade que foi adotada.

Tabela 5.13 - Correspondência entre a descrição verbal da chance de ocorrência do evento e o valor de probabilidade adotado.

Descrição do evento que culmina no evento de topo	Probabilidade
O evento é certo, salvo aconteça algo muito raro	0,99
O evento é praticamente certo	0,95
O evento é muito provável	0,80
O evento tem boas chances de ocorrer	0,65
O evento tem boas chances de não ocorrer	0,35
É muito provável que o evento não ocorra	0,20
O evento dificilmente ocorrerá	0,05
O evento não vai ocorrer, mas continua existindo a possibilidade física.	0,01

Ao valor de probabilidade obtido com o auxílio da tabela, atribuiu-se uma distribuição de probabilidade triangular. Nesta, o valor encontrado foi adotado como sendo o mais provável de ocorrer. Os valores máximos e mínimos da distribuição foram então calculados como percentuais deste, tendo como limite mínimo o valor 0,01 e máximo, 0,99. Os percentuais adotados foram:

- 40% para eventos de difícil caracterização e avaliação, envolvendo um número considerável de variáveis;
- 30% para eventos de difícil caracterização e avaliação, envolvendo poucas variáveis;

- 20% para eventos de difícil avaliação;
- 15% para eventos de difícil avaliação, mas com alguma tendência de comportamento;
- 10% para eventos no qual se tem algum entendimento ou que se dispõe de metodologias para sua determinação.

Nos eventos nos quais se dispunha de dados, como no caso das cotas de nível d'água do reservatório, optou-se por realizar um tratamento estatístico e posteriormente realizar o ajuste com uma distribuição de probabilidade matematicamente conhecida, que passou a ser utilizada para representar o comportamento da variável em questão. Um maior detalhamento sobre a forma de tratamento adotada para cada um dos eventos que compõe as árvores é tratado no item 5.5.1.

5.6.1. Tratamento dos dados

O propósito deste item foi descrever a maneira como cada um dos eventos foi manipulado para permitir a atribuição de valores probabilísticos, que fossem trabalhados matematicamente, de modo que as diversas combinações de eventos pudessem ser analisadas com o uso de métodos computacionais. Tais descrições também deveriam permitir a repetitividade do processo e a transparência necessária para permitir ajustes em qualquer evento isoladamente ou em um determinado cenário. Uma vez estabelecido o tratamento de cada evento, estes seriam agrupados em uma planilha de cálculo e a simulação realizada.

Nível d'água no reservatório (NA)

A partir dos dados de medições das cotas de NA atingidas pelo reservatório da barragem de Santa Maria, representado no histograma de frequência da Figura 5.13, utilizou-se o programa @Risk (Palisade Corporation, 2008, versão 5.0) para ajustar uma distribuição de probabilidade, matematicamente conhecida, que possibilitou determinar a probabilidade de ocorrência de quaisquer eventos específicos relacionados ao NA.

A distribuição Weibull apresentou um melhor ajuste aos dados, resultantes de medição de campo, segundo o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. O resultado do ajuste pode ser visualizado na Figura 5.31.

O programa permite atribuir a uma célula da planilha eletrônica não um valor fixo, mas sim variável. Desta forma, operações matemáticas que envolvam esta célula passam a ser realizadas por meio de amostragens de valores que atendem à distribuição pré-estabelecida, utilizando-se, para isso, do método de Monte Carlo.

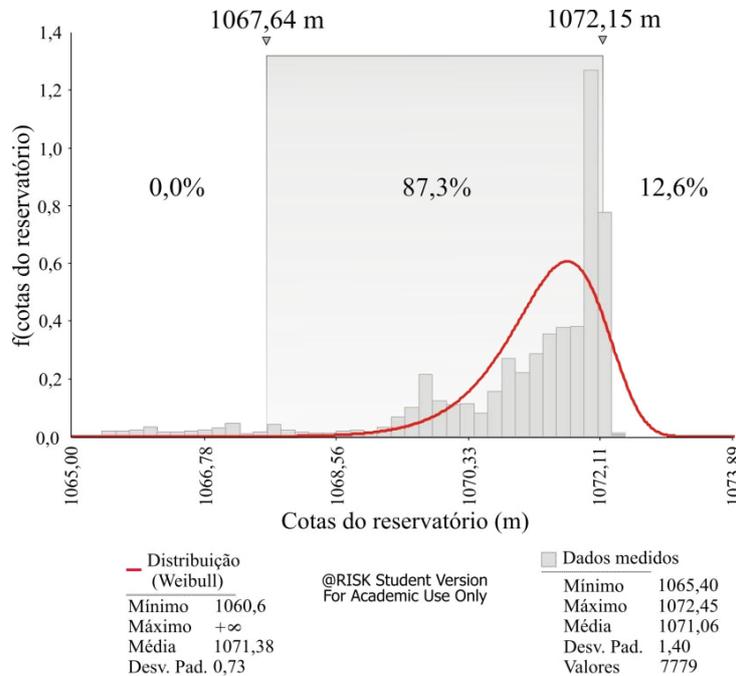


Figura 5.31 - Distribuição de probabilidade das cotas de NA no reservatório (Weibull).

Nesta distribuição, a frequência de cada cota pode ser obtida por meio da equação:

$$f(cota) = \frac{a \times C^{a-1}}{\beta^a} \times e^{-\left(\frac{C}{\beta}\right)^a} \quad (5.4)$$

Onde:

α é o parâmetro de forma. Igual à 18,29;

β é o parâmetro de escala. Igual à 11,1;

e é o número neperiano

O valor de C é um valor calculado em função da cota do reservatório, que permite a utilização da Equação 5.4, e pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$C = \text{Cota do reservatório} - 1060,60 \quad (5.5)$$

Surgimento de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria

Diferentemente da variável tratada anteriormente, a probabilidade do surgimento de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria foi obtida por meio do uso de uma árvore de falhas, uma vez que não se dispunha de dados oriundos de medições ou casos históricos semelhantes que pudessem ser utilizados para esta quantificação. A árvore que foi utilizada é ilustrada na Figura 5.32.

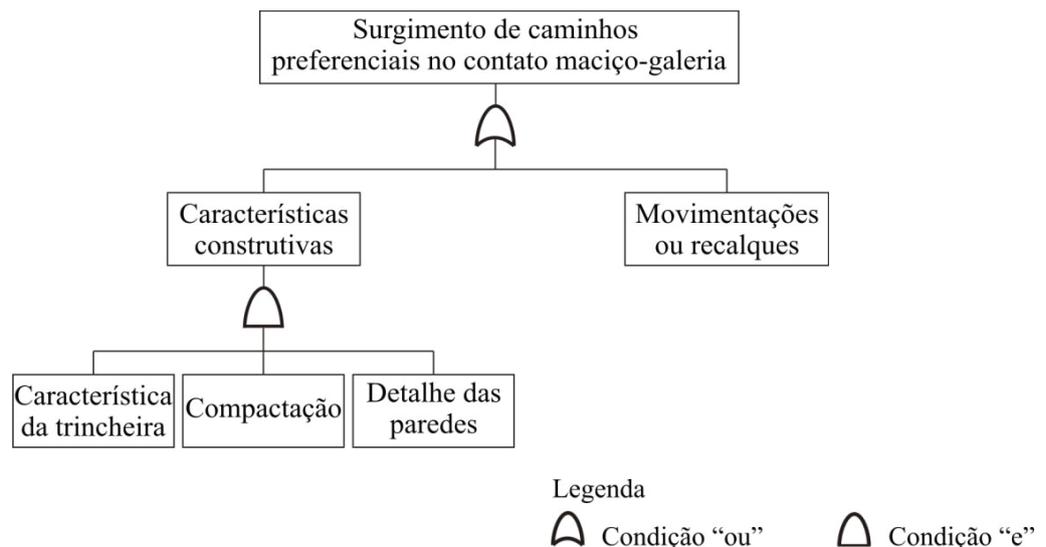


Figura 5.32 - Árvore de falhas que levam à ocorrência de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria.

Nesta árvore, os eventos de base adotados refletem as características físicas do local de implantação, a qualidade da compactação realizada, detalhes geométricos da galeria e eventuais movimentações ou recalques ocorridos na mesma.

Para a quantificação dos eventos de base, utilizou-se das considerações feitas por Foster et al. (2000a), por meio das quais se analisou a influência de cada evento base no potencial de surgimento de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria, para posteriormente correlacionar a classificação obtida com a descrição mais adequada dentre as listadas na Tabela 5.13. O resultado desta análise pode ser encontrado na Tabela 5.14. Na primeira coluna, encontram-se os eventos analisados, na segunda, o enquadramento das características da barragem aos critérios propostos por Foster et al. (2000a), na terceira, a classificação desses autores a influência que o evento teria na possibilidade da ocorrência de trincas, na quarta coluna, a classificação adotada e, na quinta, a respectiva probabilidade.

Tabela 5.14 - Quantificação da probabilidade de ocorrência dos eventos de base que independem da cota nível d'água do reservatório e que resultam no surgimento de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria.

Evento base	Enquadramento aos critérios de Foster & Fell	Classificação Foster & Fell	Classificação adotada (Tabela 5.13)	Probabilidade associada (Tabela 5.13)
Avaliação da CARACTERÍSTICA DA TRINCHEIRA escavada para comportar a galeria	Profundidade mediana, com taludes inclinados. Trincheira escavada através da barragem	Mais provável	Devido à trincheira ser estreita, com 5m de profundidade e taludes 1V:1H, concluiu-se que existem boas chances de surgir trincas no contato maciço / galeria.	0,65
Avaliação da COMPACTAÇÃO realizada na trincheira	Compactação cuidadosa próxima às paredes	Pouco provável	Foi descrito no projeto o cuidado com a compactação próxima à parede da galeria, assim o evento tem boas chances de não favorecer o surgimento de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria	0,35
DETALHE DA INCLINAÇÃO DA PAREDE da galeria da tomada d'água	Paredes verticais	Neutro	Paredes verticais propiciam uma boa condição de contato com o solo e, portanto, surgimento de caminhos preferenciais tem boas chances de NÃO ocorrer	0,35
MOVIMENTAÇÕES OU RECALQUES ao longo da galeria	Pequeno ou nenhum recalque ou fundação em rocha	Muito pouco provável	A galeria foi assentada em rocha alterada. Inspeção não identificou movimentações. O evento NÃO vai ocorrer, mas continua existindo a possibilidade física.	0,01

O resultado da análise da probabilidade de surgimento de caminhos preferenciais de água no contato maciço / galeria (Tabela 5.14) foi disposto pelos ramos da árvore de falhas da Figura 5.32, conforme ilustrado na Figura 5.33.

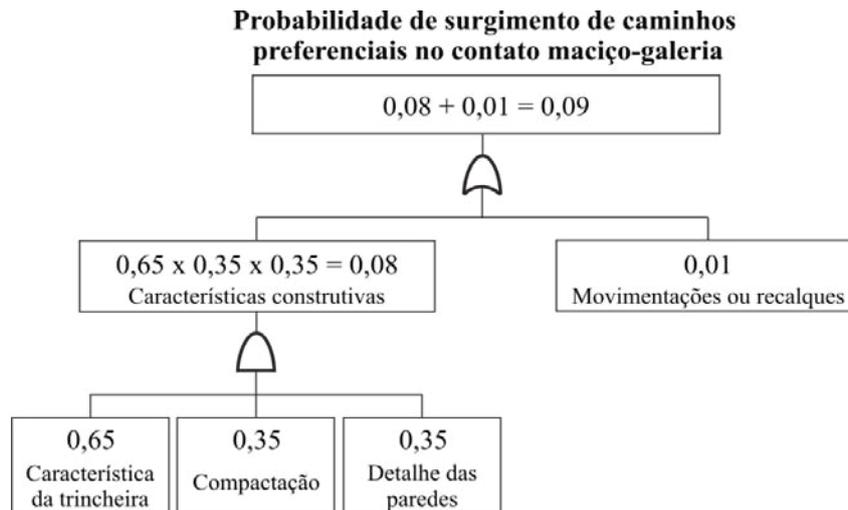


Figura 5.33 - Árvore de falhas contendo a probabilidade de surgimento de caminhos preferenciais de água no contato maciço / galeria.

O valor obtido, 0,09, foi considerado como sendo a melhor estimativa para a probabilidade de surgimento de caminhos preferenciais no contato maciço / galeria. Para representar a imprecisão inerente ao processo de obtenção deste número, admitiu-se uma variabilidade em torno do valor médio (melhor estimativa). A forma escolhida para representar esta variabilidade foi por meio de uma distribuição triangular, ilustrada na Figura 5.34, onde os valores, mínimo e máximo, correspondiam respectivamente a uma redução e um aumento de 40% do valor médio. A distribuição foi utilizada como dado de entrada na árvore de eventos para representar o comportamento da probabilidade da variável.

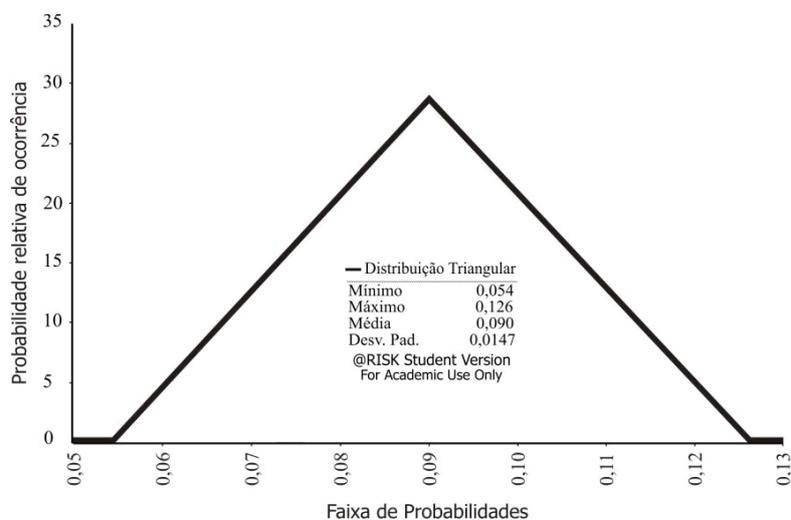


Figura 5.34 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de surgimento de caminhos preferenciais de água no contato maciço / galeria.

Existência de trincas no talude

A probabilidade da existência de trincas o talude de montante também não pode ser obtida diretamente devido à inexistência de dados oriundos de medições ou de casos históricos que pudessem ser utilizados para a quantificação, assim, recorreu-se a árvore de falhas da Figura 5.35.

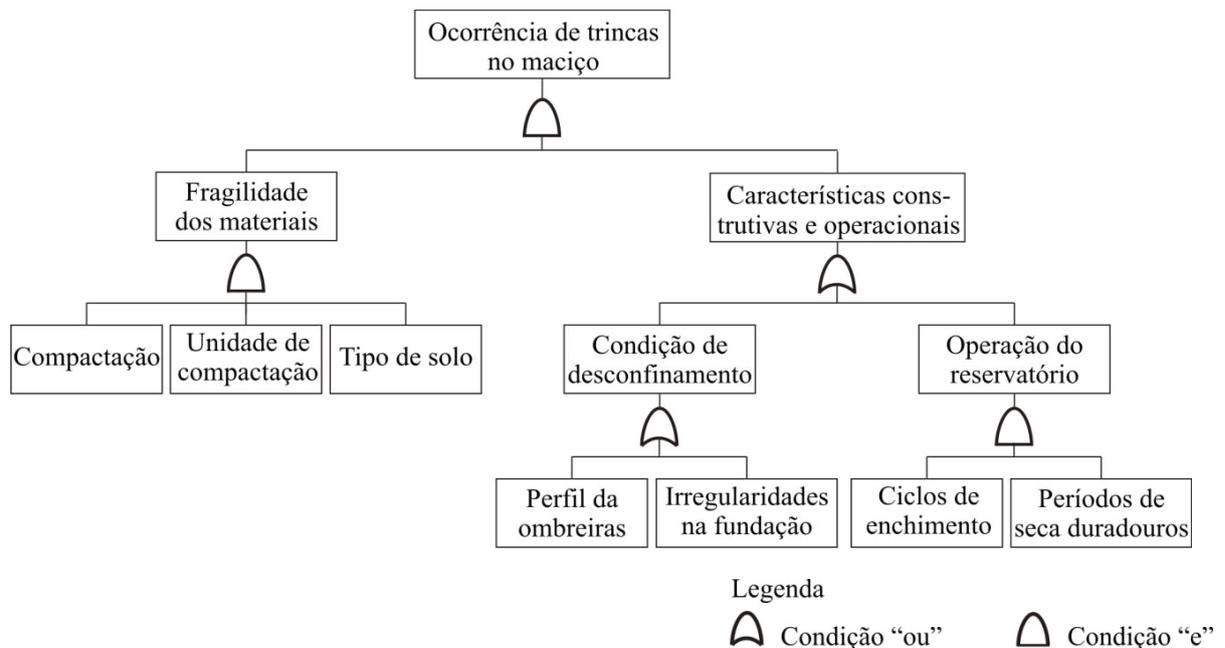


Figura 5.35 - Árvore de falhas proposta para quantificar a probabilidade de ocorrência de trincas no maciço da barragem (modificado de Foster et al., 2000a).

Nesta árvore, todos os eventos de base foram quantificados segundo sua parcela de contribuição para o surgimento de trincas no talude de montante da barragem. Aqueles referentes às condições Fragilidade dos Materiais e Condição de Confinamento foram considerados como independentes da cota do nível d’água e, portanto, uma vez quantificadas, valeriam para quaisquer cotas de NA atingidas no reservatório. Já aqueles referentes à condição Operação do Reservatório seriam função do NA.

Para a quantificação dos eventos de base do primeiro grupo, utilizou-se das considerações feitas por Foster et al. (2000a) sobre a influência de cada evento na chance de surgimento de trincas para a análise dos dados do projeto “como construído” e das informações coletadas nas inspeções de campo, para posteriormente correlacionar o evento base com a descrição mais adequada dentre as listadas na Tabela 5.13. O resultado desta análise pode ser encontrado na Tabela 5.15. Na primeira coluna, encontram-se os eventos analisados, na segunda, o

enquadramento das características da barragem aos critérios propostos por Foster et al. (2000a), na terceira, a classificação desses autores a influência que o evento teria na possibilidade da ocorrência de trincas, na quarta coluna, a classificação adotada e, na quinta, a respectiva probabilidade.

Tabela 5.15 – Quantificação da probabilidade de ocorrência dos eventos de base que independem da cota nível d'água do reservatório e que resultam no trincamento do talude de montante.

Evento base	Enquadramento aos critérios de Foster & Fell	Classificação Foster & Fell	Classificação adotada	Probabilidade associada
Avaliação da COMPACTAÇÃO realizada	Realizada no intervalo de 95-98% do grau de compactação normal	Neutro	É muito provável que NÃO ocorram trincas em função da compactação realizada no maciço	0,20
Faixa da UMIDADE DE COMPACTAÇÃO efetivamente atingida	Unidade de compactação entre -1 e -2 % da umidade ótima de compactação	Neutro	Trincas decorrentes da faixa de umidade de compactação atingida têm boas chances de NÃO ocorrer	0,35
TIPO DE SOLO utilizado na construção do maciço de montante	Argilas finas com baixa plasticidade	Mais provável	Em função da baixa plasticidade, existe boas chances do trincamento vir a ocorrer	0,65
PERFIL DA OMBREIRA	Perfil uniforme de ombreira ou modificações de larga escala nos taludes. Taludes suaves (>1V: 0.5H)	Muito pouco provável	Devido à pequena inclinação dos taludes da obreira, dificilmente ocorrerão trincas no talude	0,05
IRREGULARIDADES NA FUNDAÇÃO	Cuidado tomado com as modificações no talude da ombreira. Perfil pouco acidentado.	Muito pouco provável	É muito provável que NÃO ocorram trincas em função do bom tratamento de fundação realizado	0,20

Para a quantificação dos eventos relacionados à operação do reservatório, ou seja, a possibilidade da ocorrência de ciclos de esvaziamento e enchimentos na região acima da cota de referência do NA e do trincamento por ressecamento resultante de longos períodos de seca, ou seja, sem molhagem do material do maciço, foram utilizadas as probabilidades definidas na Tabela 5.16. Estas foram estabelecidas pelo autor com base no histórico de cotas do reservatório ilustrado na Figura 5.13, as probabilidades, segundo a Tabela 5.13. A primeira coluna traz intervalos de cotas de NA do reservatório para os quais foram atribuídos os

valores de probabilidade de ocorrência de ciclos de molhagem e secagem, como também da ocorrência de períodos prolongados de seca (considerados como períodos de não molhagem do material do maciço em cotas superiores ao NA de referência), localizados respectivamente nas colunas 2 e 3. As faixas foram distribuídas segundo os critérios descritos na Tabela 5.17

Tabela 5.16 - Probabilidades adotadas para a chance de ocorrência de ciclos de molhagem e secamento do material e períodos prolongados de secagem.

Faixa de cotas (m)	Probabilidade de ocorrer ciclos	Probabilidade de períodos de seca
1060,60 – 1067,60	0,20	0,05
1067,61 – 1072,15	0,80	0,20
1072,16 – 1072,45	0,65	0,80
1072,46 – 1073,00	0,05	0,95

Tabela 5.17 – Critérios adotados para a escolha das faixas de cotas.

Faixa de cotas (m)	Critério adotado
1060,60 – 1067,60	Intervalo onde se situam 5% das menores cotas registradas ⁽¹⁾
1067,61 – 1072,15	Intervalo onde se situam 90% das cotas registradas ⁽¹⁾
1072,16 – 1072,45	Intervalo onde se situam 5% das maiores cotas registradas ⁽¹⁾
1072,46 – 1073,00	Cotas operacionais da barragem, mas que nunca tiveram ocorrências registradas

Notas: (1) Ver Figura 5.31 - Distribuição de probabilidade das cotas de NA no reservatório (Weibull).

Os valores de probabilidade da Tabela 5.16 foram adotados segundo o seguinte raciocínio: para cada faixa de cotas, tanto a probabilidade de ocorrer ciclos, quanto a de ocorrer períodos de seca foram estimadas em função da frequência histórica dos níveis de água já atingidos no reservatório. No primeiro caso, cotas de NA que na maior parte do tempo permanecem submersas ou secas teriam menores probabilidades de passarem por ciclos, diferentemente das cotas de NA que correspondem às cotas operacionais do reservatório. Já para o período de seca, as maiores probabilidades foram atribuídas às cotas cuja frequência de superação do NA fossem menores.

O resultado da análise da probabilidade de ocorrência de trincas no maciço da barragem para cada uma das faixas de cotas (Tabela 5.15 e Tabela 5.16) foi disposto pelos ramos da árvore de falhas da Figura 5.35 e encontra-se ilustrado na Figura 5.36.

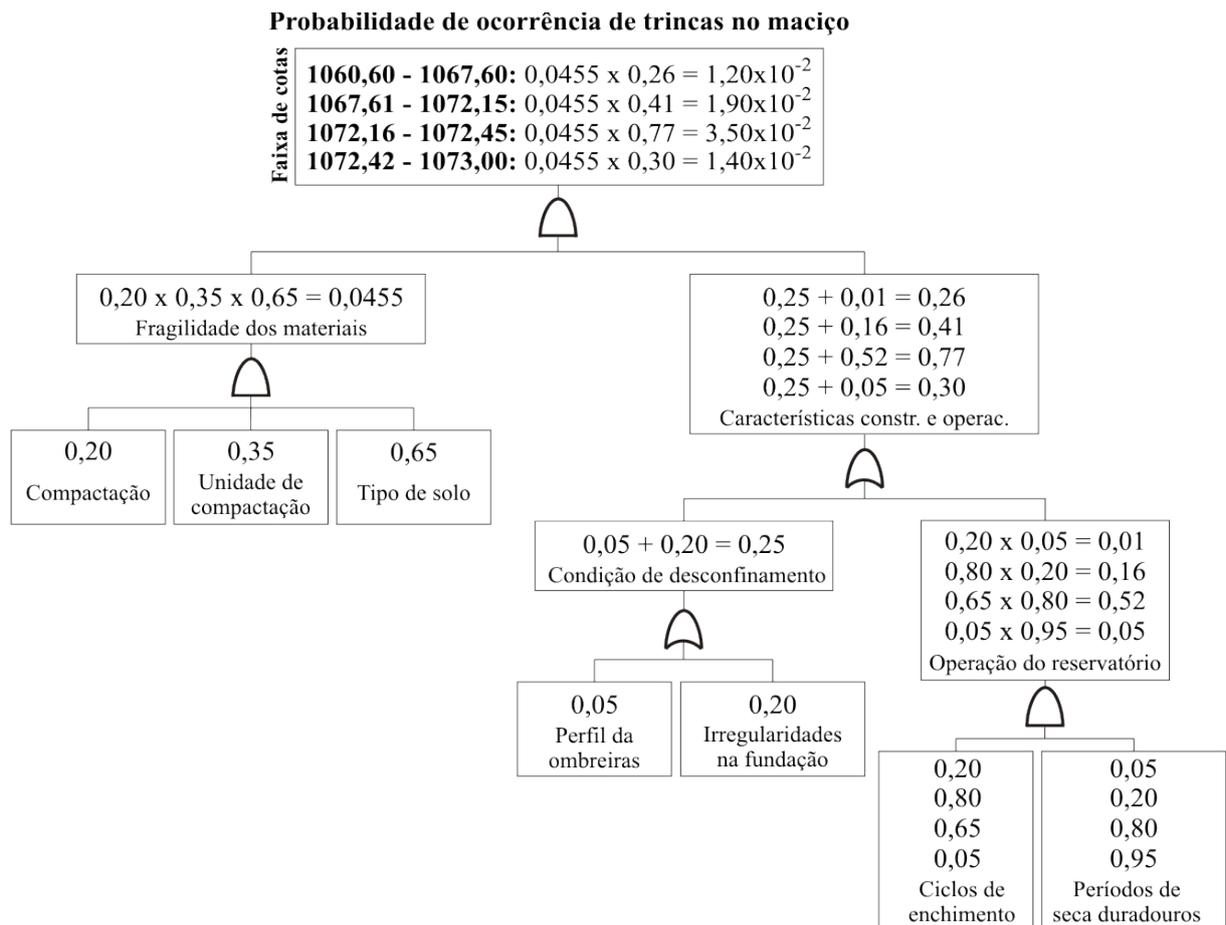


Figura 5.36 - Árvore de falhas contendo a probabilidade de ocorrência de trincas no maciço da barragem em função do NA no reservatório.

Os valores obtidos, para cada faixa de cotas, foram considerados como sendo a melhor estimativa para a probabilidade de ocorrência de trincas no maciço para a respectiva faixa. Para representar a imprecisão inerente ao processo de obtenção destes números, admitiu-se uma variabilidade em torno da melhor estimativa da faixa. A forma adotada para representar estas variabilidades foi por meio de distribuições triangulares, ilustradas na Figura 5.37, Figura 5.38, Figura 5.39 e Figura 5.40, onde os valores, mínimo e máximo, correspondiam respectivamente a uma redução e um aumento de 40% do valor médio, limitadas a um valor mínimo admissível de 0,01.

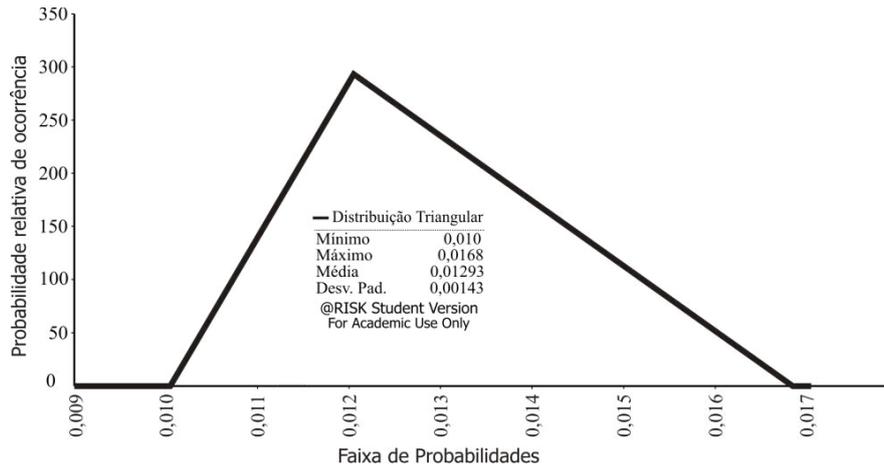


Figura 5.37 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de ocorrência de trincas no maciço para cotas entre 1060,60 e 1067,60 m.

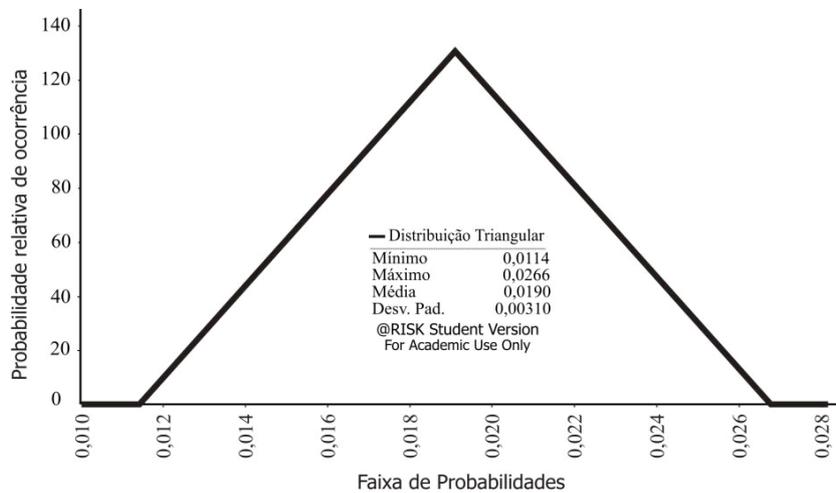


Figura 5.38 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de ocorrência de trincas no maciço para cotas entre 1067,61 e 1072,15 m.

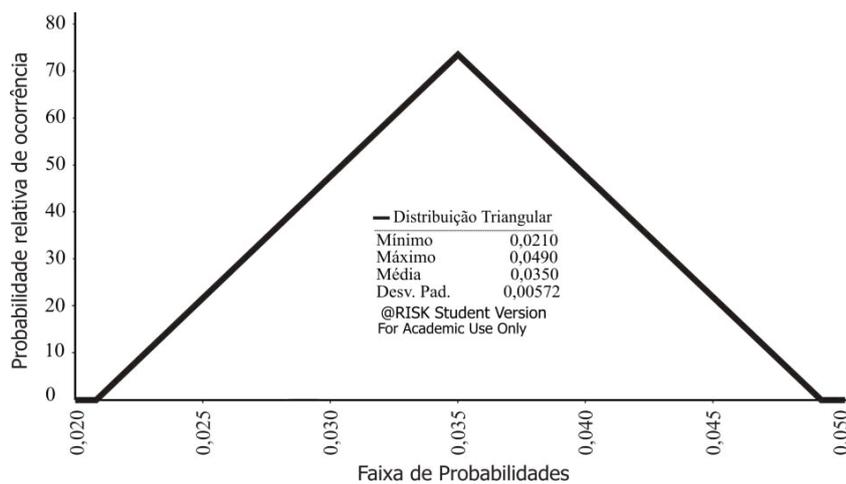


Figura 5.39 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de ocorrência de trincas no maciço para cotas entre 1072,16 e 1072,45 m.

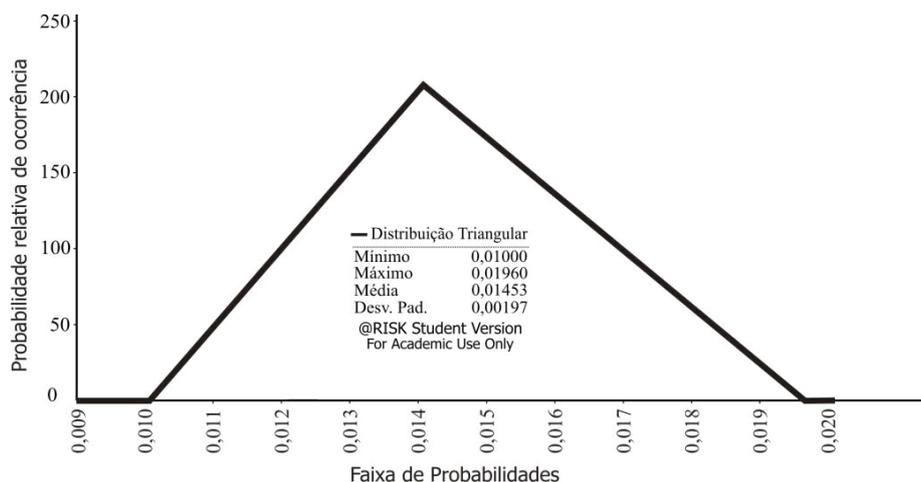


Figura 5.40 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade de ocorrência de trincas no maciço para cotas entre 1072,46 e 1073,00 m.

Para que as informações contidas nas distribuições pudessem ser utilizadas como dado de entrada na árvore de eventos, representando o comportamento da probabilidade da variável como uma única distribuição, simulou-se como seriam os resultados de probabilidade, com base no histórico de cotas de NA do reservatório da barragem de referência, resultante da combinação das quatro distribuições triangulares, respeitadas as faixas de cota pré-estabelecidas.

Esta simulação foi realizada utilizando-se a distribuição de probabilidade do NA, ilustrada na Figura 5.31, de onde foram geradas 100.000 amostras aleatórias de nível d'água pelo Método de Monte Carlo. Cada NA obtido por esta amostragem foi enquadrado em sua respectiva faixa de cotas (Tabela 5.16), associada ao respectivo valor de melhor estimativa e conseqüentemente a uma das distribuições triangulares. Deste processo, resulta um único valor de probabilidade para cada amostra de NA. O conjunto de valores obtidos após as centenas de iterações propiciaram a elaboração do histograma de frequência das probabilidades da variável Ocorrência de Trincas no Maciço.

Para representar o comportamento desta variável, optou-se por ajustar uma nova distribuição de probabilidade, matematicamente conhecida, que pudesse ser utilizada como dado de entrada na árvore de eventos. O histograma e a distribuição de ajuste encontram-se ilustrados na Figura 5.41.

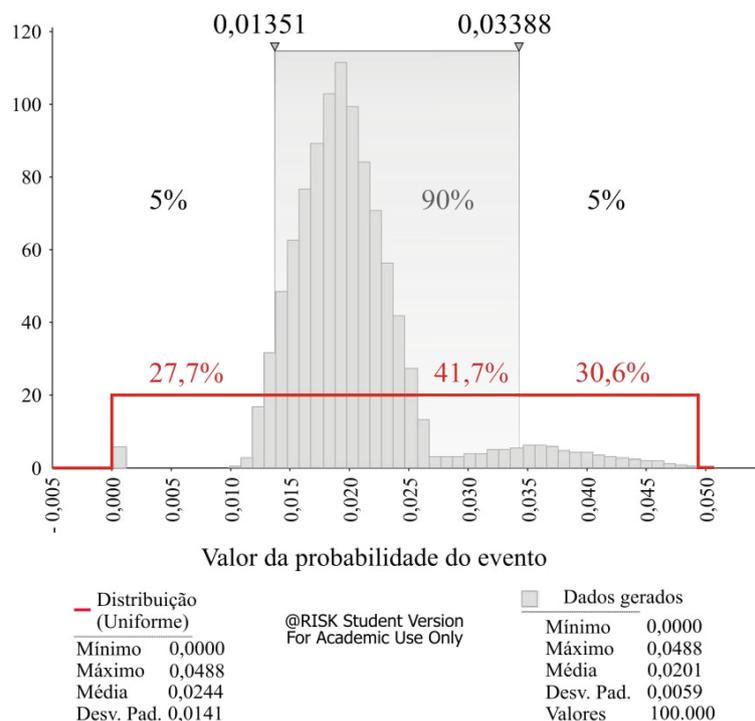


Figura 5.41 - Distribuição de probabilidade adotada para representar as probabilidades de ocorrência de trincas

Para este ajuste foi utilizada a distribuição que melhor respeitasse os valores mínimo, médio e máximo obtidos no histograma e que desse a melhor aderência pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, neste caso, uma distribuição uniforme.

Início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado

Uma vez estabelecido um fluxo concentrado de água através do maciço da barragem, foi necessário obter a probabilidade de um processo erosivo se iniciar. No entanto, devido à dificuldade em se avaliar fatores que resultem no início da erosão, optou-se por utilizar valores de probabilidade estabelecidos com relação à carga hidráulica (h^*) sobre os caminhos preferenciais de água (calculado segundo Tabela 5.19), quer sejam trincas ou deficiências no contato entre estruturas de concreto e o solo do maciço, existentes em cotas inferiores ao NA de referência. As probabilidades adotadas estão listadas na Tabela 5.18 e foram estabelecidas com base nas descrições encontradas na Tabela 5.13.

Tabela 5.18 - Probabilidades adotadas para a chance de ocorrência do início de processo erosivo decorrente da formação de fluxo concentrado em função da carga hidráulica atuante.

Carga hidráulica (h*)	Probabilidade da erosão se iniciar P(erosão)	Probabilidade da erosão NÃO se iniciar 1 – P(erosão)
< 2m	0,05	0,95
2m ≤ h* < 5m	0,20	0,80
5m ≤ h* < 7m	0,35	0,65
≥ 7m	0,65	0,35

Para a determinação da carga hidráulica a ser utilizada em cada evento específico previsto na árvore de eventos, cujo valor seria diferente para cada relação NA do reservatório / cota da trinca ou caminho preferencial, adotou-se critérios de cálculo que variavam em função do evento analisado. Estes critérios, sua vinculação com os eventos e o valor de probabilidade a ser adotado, encontram-se definidos na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Procedimento para determinação da carga hidráulica de referência e adoção da probabilidade de inicialização do processo erosivo.

Descrição do evento na árvore da Figura 5.28	Procedimento adotado para determinação da carga hidráulica de referência (h*)	Probabilidade Associada segundo Tabela 5.18
Formação de fluxo concentrado e início do processo de erosão interna	h* = (NA de referência) – (valor inferior da faixa de cotas, estabelecido na Tabela 5.18, dentro da qual se encontra o NA de referência)	P(erosão)
Formação de fluxo concentrado, mas processo erosivo NÃO se inicia	Idem	1 – P(erosão)
Formação de fluxo concentrado ao longo do muro da galeria e início do processo de erosão interna	h* = (NA de referência) – (cota média da galeria: 1061)	P(erosão)
Formação do fluxo concentrado ao longo do muro da galeria, mas processo de erosão interna NÃO se inicia	Idem	1 – P(erosão)

Os valores predeterminados, para cada faixa de carga hidráulica, foram considerados como sendo a melhor estimativa para a probabilidade de início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado para a respectiva faixa. Para representar a imprecisão inerente ao processo de obtenção destes números, também se admitiu uma variabilidade em torno da melhor estimativa da faixa. A forma adotada para representar estas variabilidades foi por meio de

distribuições triangulares, ilustradas na Figura 5.42, Figura 5.43, Figura 5.44 e Figura 5.45, onde os valores, mínimo e máximo, correspondiam respectivamente a uma redução e um aumento de 30% do valor médio. As distribuições foram utilizadas como dados de entrada na árvore de eventos representando o comportamento da probabilidade da variável.

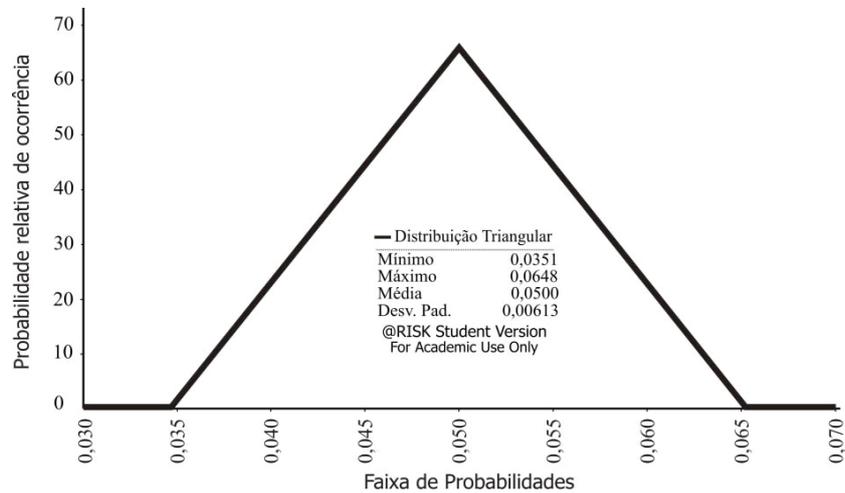


Figura 5.42 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado para $h^* < 2m$.

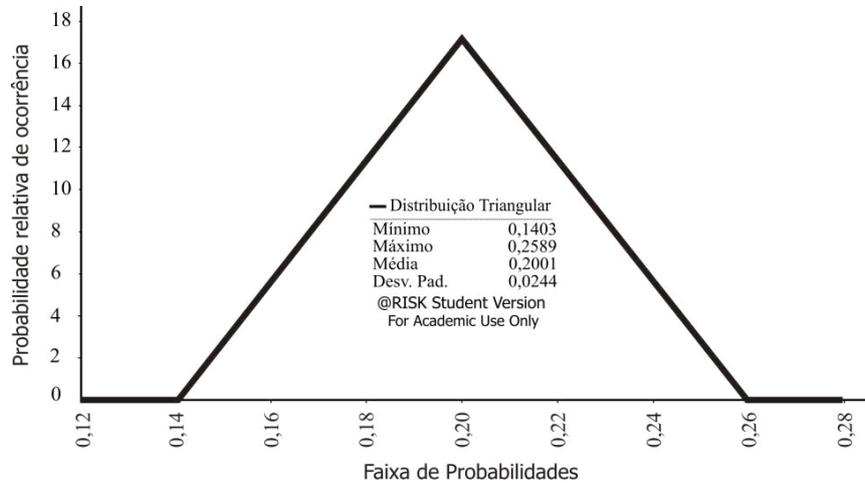


Figura 5.43 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado para h^* compreendidos entre 2 m e 5 m.

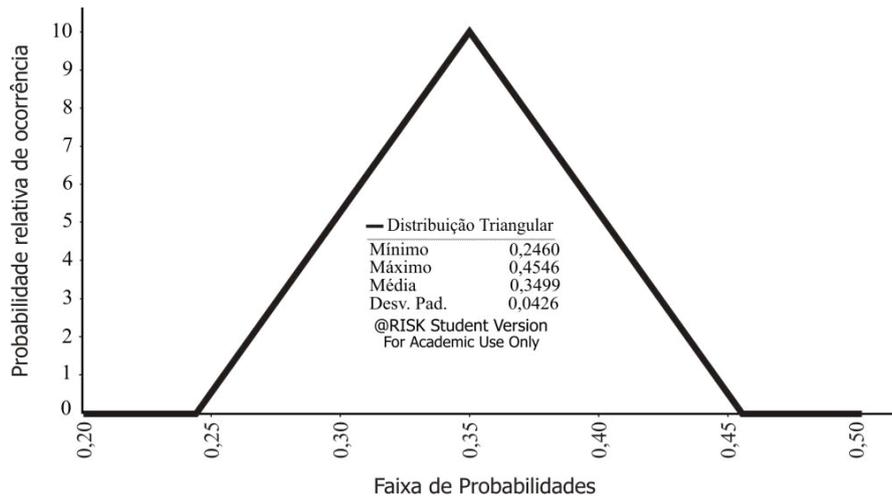


Figura 5.44 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado para h^* compreendidos entre 5 m e 7m.

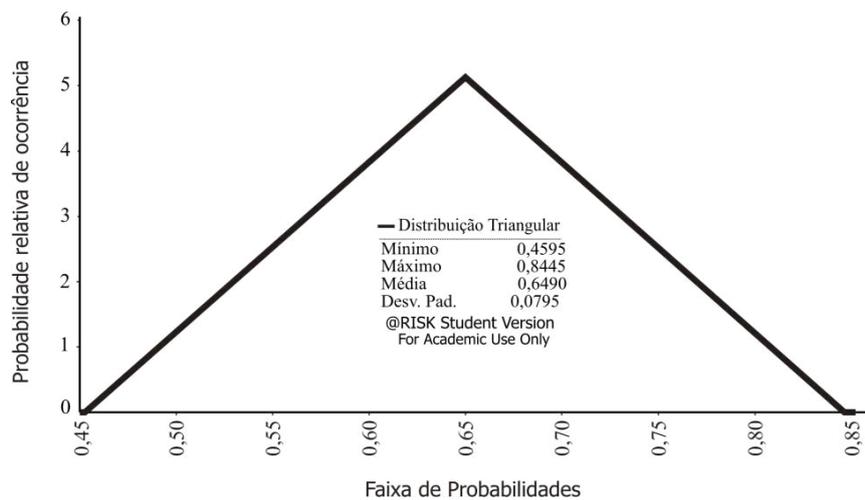


Figura 5.45 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do início do processo erosivo decorrente do fluxo concentrado para $h^* > 7m$.

De maneira análoga à utilizada anteriormente para o tratamento da outra variável, para que as informações contidas nas distribuições pudessem ser utilizadas como dado de entrada na árvore de eventos, simulou-se como seriam os resultados de probabilidade, com base no histórico de cotas de NA do reservatório da barragem de referência, resultante da combinação das quatro distribuições triangulares, respeitadas as faixas de h^* pré-estabelecidas.

Nesta simulação foram utilizadas as mesmas amostras de NA geradas para o estudo da probabilidade de Ocorrência de Trincas no Maciço. Cada NA obtido por esta amostragem foi trabalhado, conforme descrito na Tabela 5.19, para a obtenção do valor de h^* .

O valor de h^* resultante foi enquadrado na faixa descrita na Tabela 5.18 e associada ao respectivo valor de melhor estimativa e conseqüentemente a uma das distribuições triangulares. Deste processo, resulta um único valor de probabilidade para cada amostra de NA. O conjunto de valores obtidos após as centenas iterações propiciaram a elaboração do histograma de frequência das probabilidades da variável Formação de Fluxo Concentrado e Início do Processo Erosivo.

Para representar o comportamento desta variável, optou-se por ajustar uma nova distribuição de probabilidade, matematicamente conhecida, que pudesse ser utilizada como dado de entrada na árvore de eventos. Como os critérios para a determinação das probabilidades diferiam quanto à determinação da carga hidráulica de referência (h^*), foram trabalhadas duas curvas de ajuste, uma para ser utilizada no ramo da árvore referente ao maciço e outra para a região de contato maciço – galeria. Os referidos histogramas e as distribuições de ajuste encontram-se ilustrados na Figura 5.46 e Figura 5.47.

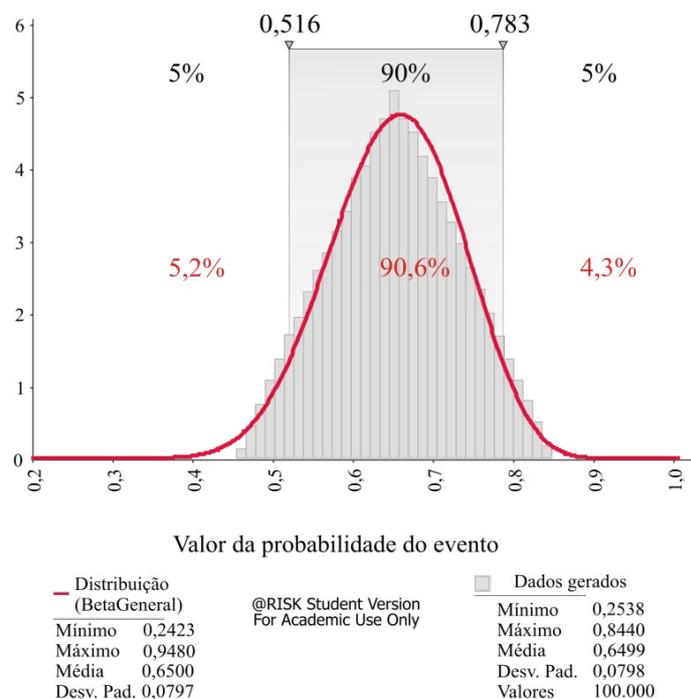


Figura 5.46 - Distribuição de probabilidade adotada (maciço-galeria)

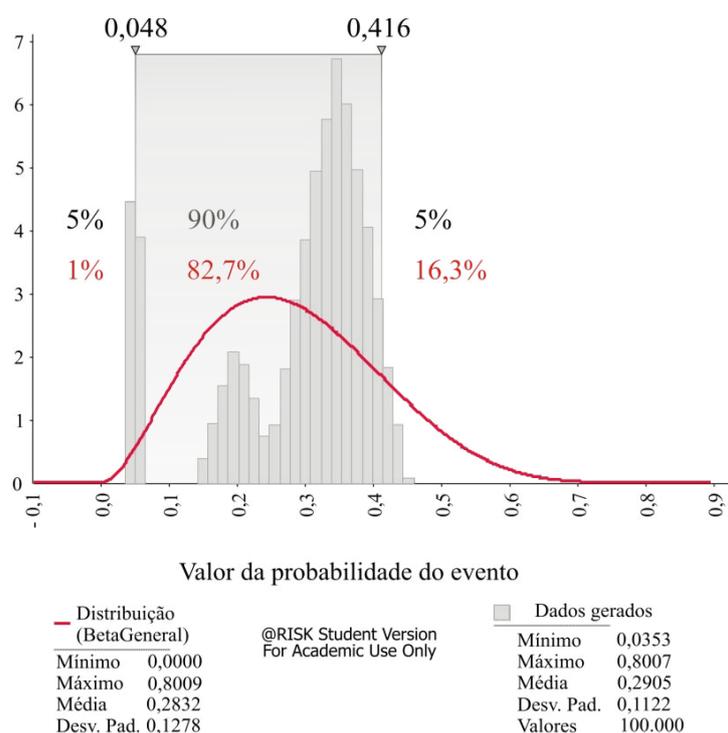


Figura 5.47 - Distribuição de probabilidade adotada (maciço)

Para estes ajustes foram utilizadas distribuições que melhor respeitassem os valores mínimo, médio e máximo obtidos nos histogramas e que resultassem na melhor aderência pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Capacidade dos drenos em impedir o carreamento de finos

A análise da capacidade de filtro em evitar a progressão do *piping* foi realizada por meio do método proposto por Foster & Fell (2001), no qual a distribuição granulométrica das partículas do material do filtro é comparada com as do solo utilizado no maciço da barragem para determinar se o filtro é suficientemente fino para impedir o processo erosivo resultante da formação de um fluxo concentrado de água fluindo através do maciço da barragem.

Do estudo das curvas granulométricas do material do maciço e do utilizado nos drenos, obtidos no projeto, obteve-se os dados necessários para a avaliação do comportamento do conjunto solo-filtro de areia, que foram concentrados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Valores característicos da granulometria dos materiais utilizados nos filtros e maciço da barragem.

Características dos materiais da barragem	Valor obtido das curvas granulométricas
DF15 médio	0,2 mm
DF15 granular	0,35 mm
DB85	0,09 mm
DB90	0,13 mm
DB95	0,25 mm
pp%75 μ m	75 %

Notas: (1) DF15 – tamanho das partículas do filtro onde 15% do peso é composto de finos

(2) DB(valor) - das partículas do solo onde (valor)% do peso é composto de finos

(3) pp%75 μ m é a porcentagem de finos < 75 μ m

O primeiro ponto analisado foi o enquadramento no critério de não-erosão (NE) da Tabela 5.21. Para o solo utilizado no maciço (pp%75 μ m = 75%), o limite de não-erosão seria DF15 \leq 0,7 mm. Comparando-se com os valores de DF15 médio e DF15 granular, listados na Tabela 5.20, constatou-se que ambos apresentavam valores menores que o valor de referência, ou seja, DF15 médio < NE e DF15 granular < NE.

Tabela 5.21 - Critério para definição do limite de não-erosão (Foster & Fell, 2001).

Conteúdo de finos do solo (%)	Critério proposto para limite de não-erosão (NE)
≥ 85	DF15 ⁽²⁾ \leq 9DB85 ⁽³⁾
35 – 85	DF15⁽²⁾ \leq 0,7 mm
15 - 35	DF15 ⁽²⁾ \leq 1,6DF15 _d ⁽⁴⁾
< 15	DF15 ⁽²⁾ \leq 7DB85 ⁽³⁾

Notas: (1) Conteúdo (%) – Passante na peneira #200

(2) DF15 – tamanho das partículas do filtro onde 15% do peso é composto de finos

(3) DB85 - das partículas do solo onde 85% do peso é composto de finos

(4) DF15_d = (35 – pp%75 μ m)(4DB85-0,7)/20+0,7, onde pp%75 μ m é a porcentagem de finos < 75 μ m

Posteriormente, foi analisado o enquadramento nos critérios de erosão excessiva (EE) e erosão contínua (CE) de acordo com a Tabela 5.22. Para o solo do maciço (DB95 = 0,25 mm), os limites tanto para EE quanto para CE seria DF15 > 9DB95. Comparando-se os valores de DF15 médio e DF15 granular com o valor de 9DB95 (ver Tabela 5.20), constatou-se que ambos apresentavam valores menores que o valor de referência, resultando na seguinte classificação: DF15 médio < EE e < CE, e DF15 granular < NE.

Tabela 5.22 - Critério para definição do limite de erosão excessiva e erosão continuada (Foster & Fell, 2001).

Solo do maciço ⁽²⁾	Critério proposto para limite de erosão excessiva (EE) ⁽²⁾	Critério proposto para limite de erosão contínua (CE) ⁽²⁾
DB95 < 0,3 mm	DF15 > 9 DB95	DF15 > 9 DB95
0,3 < DB95 < 2 mm	DF15 > 9DB90	DF15 > 9 DB95
DB95 > 2 mm e porcentagem de finos > 35%	DF15médio ou DF15 granular > DF15* ⁽¹⁾	DF15 > 9 DB95
DB95 > 2 mm e porcentagem de finos > 15%	DF15 > 9DB85	DF15 > 9 DB95
DB95 > 2 mm e porcentagem de finos 15 – 35 %	DF15 > 2,5DF15 _d	DF15 > 9 DB95

Notas: (1) DF15* - DF15 que resulta numa perda erosiva de 0,25 g/cm² nos testes de erosão continuada, ou DF15 que resulta numa perda erosiva de 1,0 g/cm² nos testes de erosão continuada

(2) Critério é diretamente aplicável para solos com DB95 até 4,75 mm. Para solos com partículas maiores, determinar DB85 e DB95 usando curvas granulométricas ajustadas para ter partículas máximas de 4,75 mm.

Após as comparações entre os valores característicos do filtro e do solo, os resultados foram lançados na Tabela 5.23 e, assim, os possíveis desempenhos do filtro foram obtidos. Segundo esta análise, o filtro da barragem possui qualidades que permitem que eventuais processos erosivos sejam interrompidos rapidamente, com alguma colmatação do filtro.

Tabela 5.23 - Possíveis desempenho de filtro em eventos de fluxo concentrado (Foster & Fell, 2001).

Comparação entre o DF15 da barragem e os limites estabelecidos na Tabela 5.22 e na Tabela 5.22		Possíveis desempenhos do filtro em eventos de fluxo concentrado		
DF15 médio	DF15 granular	Filtro sela sem erosões	Filtro sela com alguma erosão	Selamento parcial ou sem selamento com grande erosão
< NE	< NE	Muito provável	Improvável	Altamente improvável
< NE	> NE e < EE	Igualmente provável	Igualmente provável	Improvável
> NE	< EE	Improvável	Igualmente provável	Igualmente provável
> NE e < EE	> EE	Improvável	Improvável	Provável
> EE	> EE	Altamente improvável	Improvável	Muito provável

Legenda: NE – Não Erosão; EE – Erosão Excessiva.

Para associar valores de probabilidade aos eventos descritos na árvore de eventos da Figura 5.28, correlacionou-se as descrições da Tabela 5.23 às da Tabela 5.13, resultando na Tabela 5.24.

Tabela 5.24 - Resultado da análise da capacidade do dreno vertical impedir a progressão do *piping*, segundo Foster & Fell (2001), e determinação da probabilidade de ocorrência.

Descrição do evento na árvore da Figura 5.28	Avaliação segundo Tabela 5.23	Correspondência com a descrição da Tabela 5.13	Probabilidade associada
Dreno vertical não possui propriedades de filtro e NÃO impede a progressão da erosão	Evento altamente improvável	O evento dificilmente ocorrerá	0,05
Dreno vertical possui propriedades de filtro e impede o progresso da erosão, contudo há alguma perda de material	Evento improvável	O evento tem boas chances de NÃO ocorrer	0,35

Novamente, os valores obtidos, 0,05 e 0,35, foram tratados como as melhores estimativas para as probabilidades do comportamento dos drenos descritos na Tabela 5.24. Para representar a imprecisão inerente ao processo de obtenção destes números, admitiu-se uma variabilidade em torno do valor médio (melhor estimativa), distintos para cada um dos valores. A forma escolhida para representar estas variabilidades foi por meio de uma distribuição triangular, onde os valores, mínimo e máximo, correspondiam respectivamente a uma redução e um aumento de 10% do valor médio, para o primeiro valor, e de 20% para o segundo. A Figura 5.48 e a Figura 5.49 ilustram as distribuições utilizadas como dado de entrada.

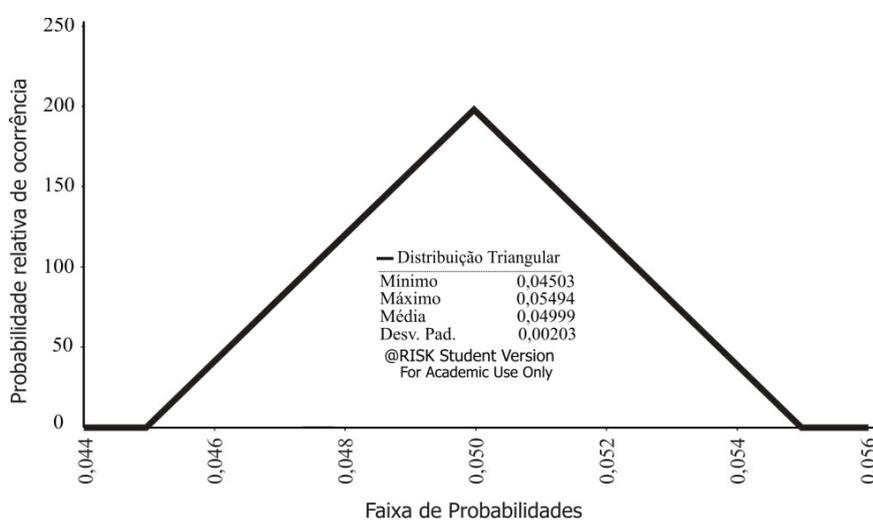


Figura 5.48 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do dreno vertical não possuir propriedades de filtro e não impedir a progressão da erosão.

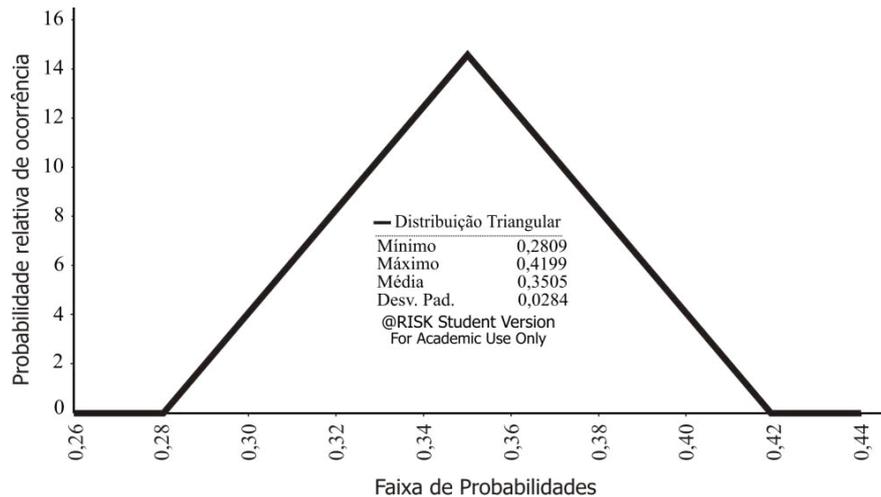


Figura 5.49 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do dreno vertical possuir propriedades de filtro, impedir o progresso da erosão, contudo resultar em alguma perda de material.

Alargamento do piping

Para a quantificação da probabilidade do processo erosivo progredir e resultar no alargamento do *pipe* (tubo) foi adotado a árvore de falhas da Figura 5.50. Nesta, a combinação dos eventos de base repercutiria no potencial de erosão do material do maciço, na capacidade de limitação o fluxo concentrado e na suscetibilidade ao desabamento do teto do tubo.

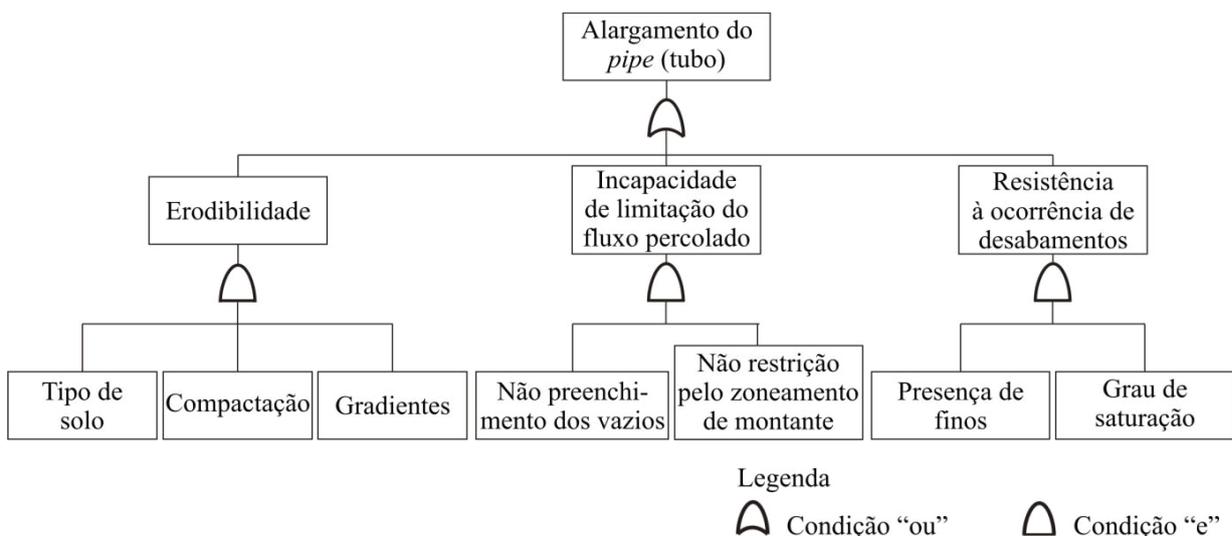


Figura 5.50 - Árvore das falhas que resultam no alargamento do tubo.

Por Erodibilidade entendeu-se como sendo a medida da capacidade do solo em não resistir às forças erosivas decorrentes do fluxo concentrado e com isso permitir a perda de material, por Incapacidade de Limitação do Fluxo Percolado, a medida da capacidade do material do maciço em não se auto vedar, ou seja, não preencher as trincas com partículas do solo que viessem a ser arrancadas de regiões mais a montante e por Resistência à Ocorrência de Desabamentos, a medida da capacidade do solo em suportar o teto do tubo formado pelo processo de *piping* e não desabar, fechando o *pipe*.

A combinação destas três propriedades do maciço seria, portanto, responsável por manter o *pipe* aberto e alargá-lo, permitindo o progresso do processo erosivo. Os eventos de base foram, quase em sua totalidade, avaliados segundo as considerações feitas por Foster & Fell (2000), com exceção do evento nomeado “gradientes” para o qual se utilizou de simulações no programa SEEP/W (GEOSLOPE International, Versão 6.02 2004).

O primeiro conjunto de eventos base analisados e quantificados encontram-se listados na Tabela 5.25. Para esta análise foi utilizado o mesmo procedimento anteriormente adotado, ou seja, avaliou-se cada evento com o apoio das tabelas propostas por Foster et al. (2000a), que posteriormente foi correlacionado com as descrições adotadas e descritas na Tabela 5.13.

Tabela 5.25 - Quantificação da probabilidade de ocorrência dos eventos de base que independem da cota nível d’água do reservatório e que resultam no alargamento do *pipe*.

Evento base	Enquadramento aos critérios de Foster & Fell	Classificação o Foster & Fell	Classificação adotada	Probabilidade
Potencial de erodibilidade decorrente do TIPO DE SOLO utilizado na construção do maciço	Argilas plásticas ($I_p > 15$)	Muito pouco provável	Existem boas chances de que NÃO ocorra o alargamento do <i>pipe</i> por erosão em decorrência do tipo de solo utilizado.	0,35
Potencial de erodibilidade decorrente da COMPACTAÇÃO realizada	Realizada no intervalo de 95-98% do grau de compactação normal.	Neutro	Existem boas chances a erosão NÃO progredir devido à qualidade da compactação realizada.	0,35
Capacidade de limitação do fluxo devido ao PREENCHIMENTO DOS VAZIOS por materiais carreados de montante	Barragens homogêneas. Zona de montante com material coesivo.	Mais provável	É muito provável que a erosão não progrida, pois o tipo de barragem e o material do maciço favorecem o preenchimento das trincas existentes.	0,20

Tabela 5.25 - Continuação

Evento base	Enquadramento aos critérios de Foster & Fell	Classificação o Foster & Fell	Classificação adotada	Probabilidade
RESTRIÇÃO do fluxo PELO ZONEAMENTO DE MONTANTE	Zoneamento homogêneo, sem elementos que limitem a permeabilidade à montante.	Mais provável	Como não existem proteções no talude de montante que formem uma barreira extra à formação de fluxo concentrado, certamente o alargamento irá ocorrer.	0,99
Capacidade de suporte do teto do <i>pipe</i> devido à PRESENÇA DE FINOS	Mais de 15% de material passante na peneira #200.	Mais provável	É muito provável que o material do maciço seja capaz de manter o teto do <i>pipe</i> íntegro, sem desabamentos, propiciando o alargamento do mesmo.	0,80
Capacidade de suporte do teto do <i>pipe</i> em função do GRAU DE SATURAÇÃO do material do maciço	Material do maciço encontra-se saturado.	Muito pouco provável	Existem boas chances de ocorrer o desabamento do teto do <i>pipe</i> , impedindo sua progressão, em decorrência do material do maciço se encontrar saturado.	0,35

Para o evento Gradiente, que se enquadra no grupo de variáveis que são função do NA do reservatório, foi necessário analisar o grau de variação destas em função dos NAs operacionais da barragem. Para obtenção dos resultados, agrupados na Tabela 5.26, adotou-se o seguinte procedimento:

- Utilização das mesmas faixas de cota de NA descritas e explicadas na Tabela 5.17;
- Uso da cota do limite superior de cada intervalo como representativa do intervalo;
- Simulação da percolação do fluxo através da barragem para cada uma dessas cotas;
- Análise da saída gráfica do programa e adoção do gradiente hidráulico de referência como sendo 80% do maior valor obtido na direção horizontal no material do maciço à montante do filtro vertical e 80% do maior valor obtido na direção vertical no material do maciço de jusante na região próxima ao dreno de pé (ao se adotar 80% do valor dos gradientes, procura-se representar, de modo simplificado, o gradiente médio de uma região);

O procedimento adotado deve ser entendido como uma forma que foi encontrada para se considerar a variável gradiente nos estudos, mas que, ao se avançar nos estudos, métodos mais confiáveis devem ser considerados ou até mesmo elaborados. Deve-se lembrar que os gradientes hidráulicos costumam sofrer alterações significativas à medida que o processo de *piping* avança.

Tabela 5.26 – Gradientes hidráulicos (*i*) máximos atuantes na barragem

Cota de referência	<i>i_x</i> (maciço montante)		<i>i_v</i> (maciço jusante)	
	Valor máximo	Valor adotado (80% do máx.)	Valor máximo	Valor adotado (80% do máx.)
1067,60	0,64	0,51	0,40	0,32
1072,15	0,72	0,58	0,98	0,78
1072,45	0,75	0,60	0,98	0,78
1073,00	0,79	0,63	0,99	0,79

Os valores dos gradientes obtidos foram confrontados com valores de gradientes críticos, os quais foram estabelecidos segundo os seguintes critérios:

- Para a determinação *i_{cya}* na direção vertical ascendente, utilizou-se a seguinte equação:

$$i_{cya} = \frac{f_{Pr.}}{\gamma_w} \quad (5.5)$$

Onde: *i_{cya}* é o gradiente hidráulico crítico na direção vertical ascendente;

f_{Pr} é a força resistiva à força de percolação (adotado como o peso específico efetivo do solo, γ');

γ_w é o peso específico da água;

- Para a determinação *i_c* na direção horizontal e na direção vertical descendente, baseou-se na recomendação usual para dimensionamento de núcleo de barragens, que se fundamenta na experiência adquirida, que preconiza uma relação mínima entre a largura do núcleo (L) e sua altura (H) de 1/3, portanto, *i_{cx}* e *i_{cyl}* seriam igual a 3.

Tabela 5.27 - Avaliação dos gradientes obtidos na simulação numérica com os valores críticos

Cota de referência	<i>i_x</i> (maciço montante)		<i>i_{va}</i> (maciço jusante)	
	Valor adotado (80% do máx.)	<i>i_{cx}</i>	Valor adotado (80% do máx.)	<i>i_{cya}</i>
1067,60	0,51	3	0,32	0,8
1072,15	0,58	3	0,78	0,8
1072,45	0,60	3	0,78	0,8
1073,00	0,63	3	0,79	0,8

Os resultados obtidos demonstraram que a variável “gradientes” praticamente não se altera para cotas superiores a 1072,15 m e que mesmo para cotas mais elevadas, o valor de *i* fica

próximo ao valor de i_c , assim, adotou-se como valores de probabilidade do solo os valores mostrados na Tabela 5.28.

Tabela 5.28 - Resultado da análise da capacidade de material resistir a erosão decorrente de gradientes hidráulicos elevados.

Faixa de cotas (m)	Correspondência com a descrição da Tabela 5.13	Probabilidade de erosão em função dos gradientes obtidos
1060,60 – 1072,15	É muito provável que NÃO ocorram erosões como consequência de gradientes hidráulicos elevados	0,20
1072,16 – 1073,00	O processo erosivo tem boas chances de NÃO ser resultante de gradientes hidráulicos elevados	0,35

O resultado da análise da probabilidade do processo erosivo progredir e resultar no alargamento do *pipe* (tubo) (Tabela 5.25) foi disposto pelos ramos da árvore de falhas da Figura 5.50 e encontra-se ilustrado na Figura 5.51.

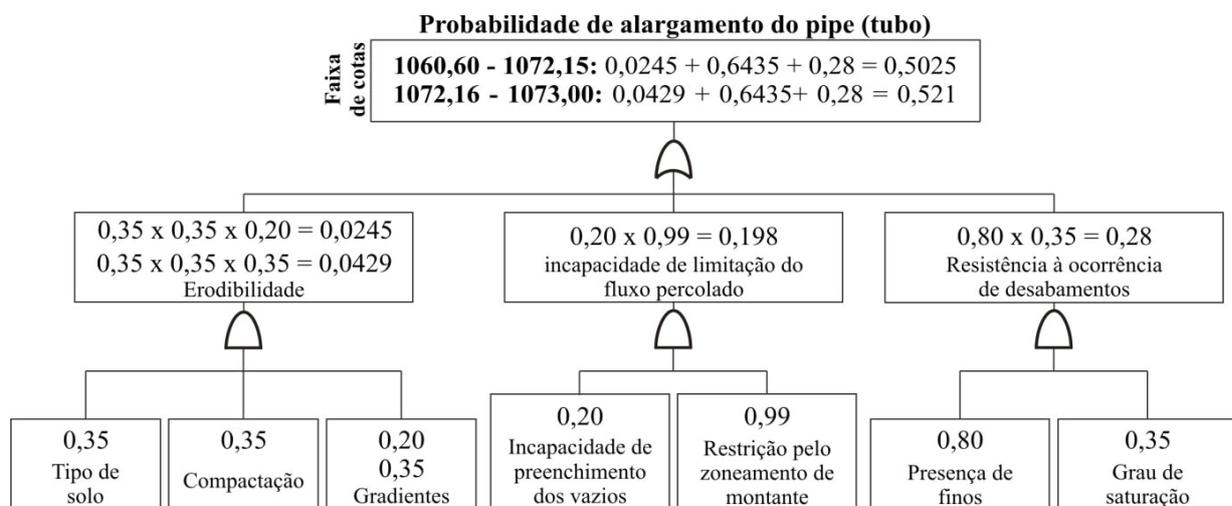


Figura 5.51 - Árvore de falhas contendo a probabilidade do processo erosivo progredir e resultar no alargamento do *pipe* (tubo)

Os valores predeterminados, para cada faixa de cotas, foram considerados como sendo a melhor estimativa para a probabilidade de alargamento do *pipe* para a respectiva faixa. Para representar a imprecisão inerente ao processo de obtenção destes números, também se admitiu uma variabilidade em torno da melhor estimativa da faixa. A forma adotada para representar estas variabilidades foi por meio de distribuições triangulares, ilustradas na Figura 5.52 e na Figura 5.53, onde os valores, mínimo e máximo, correspondiam respectivamente a uma

redução e um aumento de 20% do valor médio. As distribuições foram utilizadas como dados de entrada na árvore de eventos representando o comportamento da probabilidade da variável.

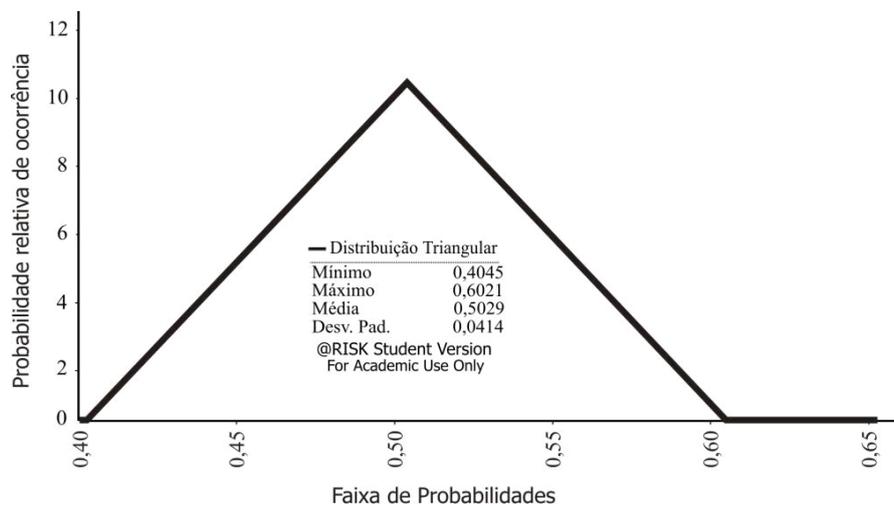


Figura 5.52 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do alargamento do *pipe* para cotas situadas entre a Elev. 1060,60 e 1072,15 m

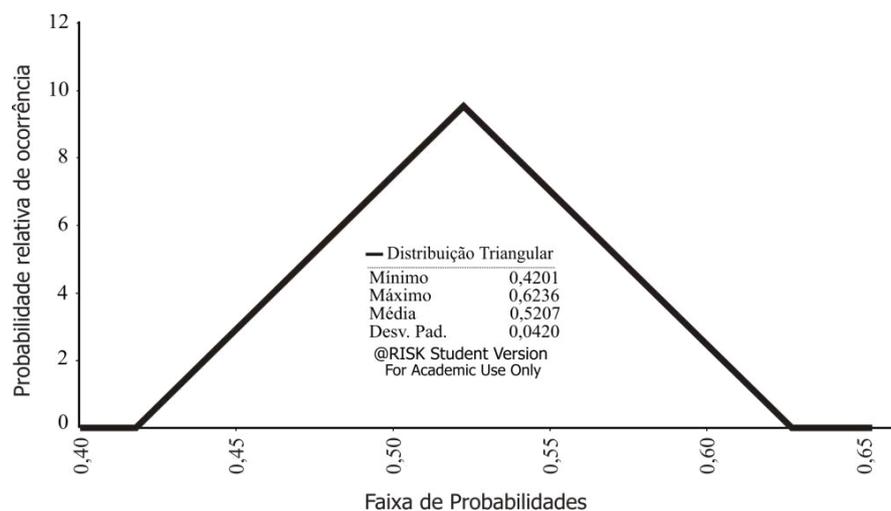


Figura 5.53 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do alargamento do *pipe* para cotas situadas entre a Elev. 1072,16 e 1073,00 m

Para que as informações contidas nas distribuições pudessem ser utilizadas como dado de entrada na árvore de eventos, simulou-se como seriam os resultados de probabilidade, com base no histórico de cotas de NA do reservatório da barragem de referência, resultante da combinação das duas distribuições triangulares, respeitadas as faixas de cotas pré-estabelecidas na Tabela 5.28.

Nesta simulação foram utilizadas as mesmas amostras de NA gerada para o estudo da probabilidade de Ocorrência de Trincas no Maciço e Formação do Fluxo Concentrado e Início do Processo Erosivo. Para representar o comportamento desta variável, optou-se por ajustar uma nova distribuição de probabilidade, matematicamente conhecida, que pudesse ser utilizada como dado de entrada na árvore de eventos. O histograma e a distribuição de ajuste encontram-se ilustrados na Figura 5.54.

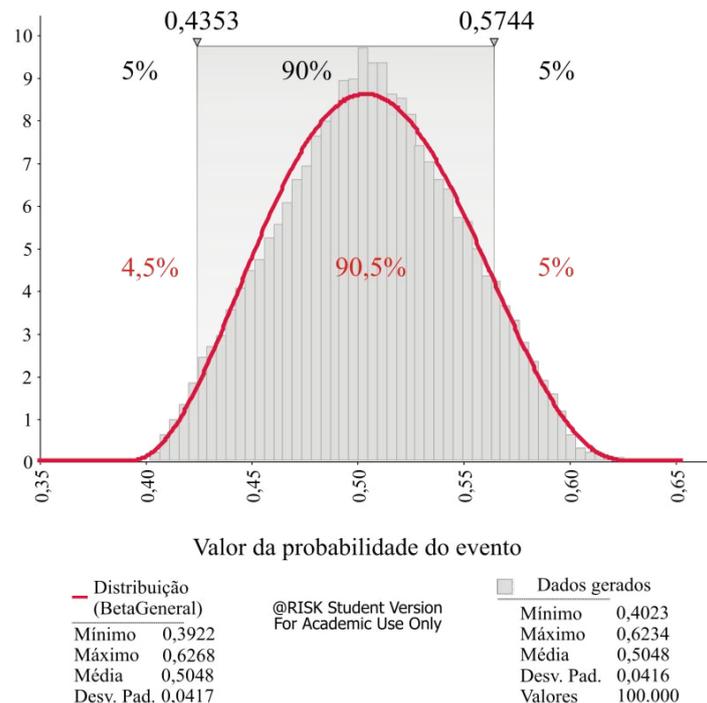


Figura 5.54 - Distribuição de probabilidade adotada

Para este ajuste foi utilizada a distribuição que melhor respeitasse os valores mínimo, médio e máximo obtidos no histograma e que desse a melhor aderência pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Colapso do *pipe*, desabamento da crista e abertura da brecha de ruptura

O *pipe*, após atingir uma certa dimensão, colapsa. Com seu desmoronamento, adotou-se duas situações como passíveis de ocorrer:

- O material, resultante do desabamento, é carregado pela força da água, o fluxo aumenta progressivamente e é formada a brecha de ruptura;
- Após o desabamento, o fluxo é interrompido e o processo erosivo cessa.

Para a quantificação do evento, ou seja, se após o colapso do *pipe* a brecha de ruptura se forma ou se o processo erosivo é interrompido, recorreu-se novamente ao julgamento de engenharia. Para a correspondência entre a descrição verbal e um valor numérico, que representasse a probabilidade do evento, utilizou-se da relação listada na Tabela 5.13.

Considerou-se que a primeira situação terá maiores chances de ocorrer, uma vez que um processo de *piping*, que atinja tal grau de avanço, possivelmente resulte em ruptura. A Tabela 5.29 agrupa o evento analisado, sua descrição na árvore de eventos, a descrição da chance de ocorrência, de acordo com a Tabela 5.13 e sua probabilidade associada.

Tabela 5.29 - Determinação da probabilidade de ocorrência do colapso do *pipe* e formação ou não da brecha de ruptura.

Evento analisado	Descrição do evento na árvore da Figura 5.28	Correspondência com a descrição da Tabela 5.13	Probabilidade associada
O material, resultante do desabamento, é carregado pela força da água, o fluxo aumenta progressivamente e é formada a brecha de ruptura	Colapso do <i>pipe</i> , desabamento da crista e abertura da brecha de ruptura	O evento tem boas chances de ocorrer	0,65
Após o desabamento, o fluxo é interrompido e, conseqüentemente, o processo erosivo	Colapso do <i>pipe</i> , afundamentos na crista, mas desabamento interrompe processo erosivo	O evento tem boas chances de NÃO ocorrer	0,35

O valor obtido, 0,65, foi considerado como sendo a melhor estimativa para a probabilidade de colapso do *pipe*, desabamento da crista e abertura da brecha de ruptura. Para representar a imprecisão inerente ao processo de obtenção deste número, admitiu-se uma variabilidade em torno do valor médio (melhor estimativa). A forma escolhida para representar esta variabilidade foi por meio de uma distribuição triangular, ilustrada na Figura 5.55 e na Figura 5.56, onde os valores, mínimo e máximo, correspondiam respectivamente a uma redução e um aumento de 15% do valor médio, para o primeiro valor, e de 20% para o segundo do valor médio.

A distribuição foi utilizada como dado de entrada na árvore de eventos para representar o comportamento da probabilidade da variável.

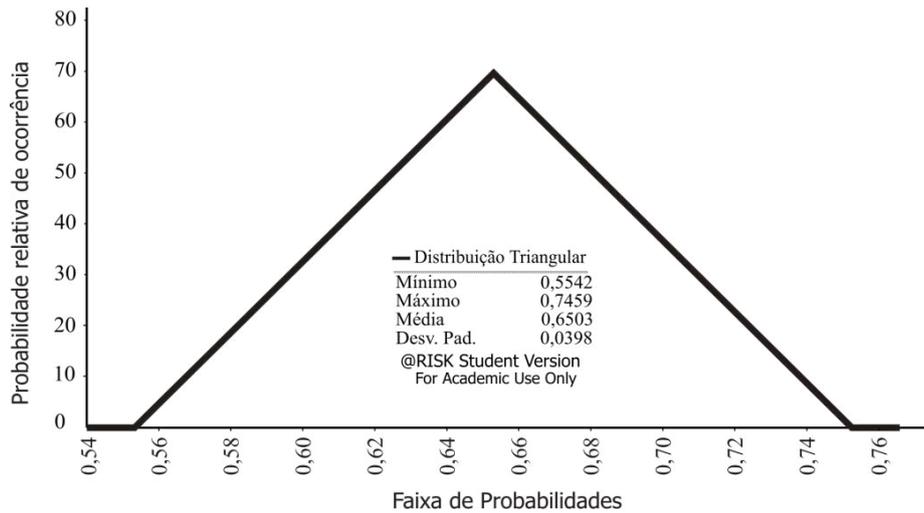


Figura 5.55 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do colapso do *pipe*, desabamento da crista e abertura da brecha de ruptura para *piping* no maciço

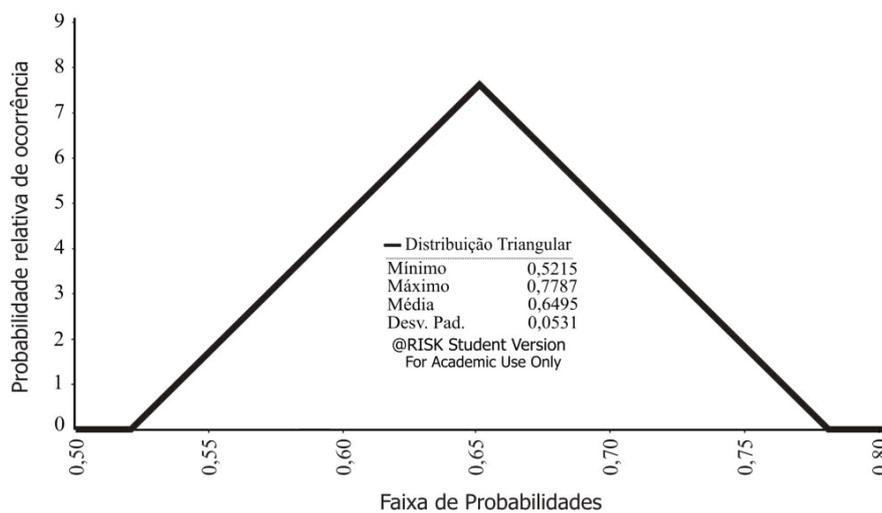


Figura 5.56 - Distribuição triangular adotada para representar a variação de valores de probabilidade do colapso do *pipe*, desabamento da crista e abertura da brecha de ruptura para *piping* na interface maciço / galeria

5.7. Síntese do procedimento adotado

O procedimento adotado até então permitiu a identificação de possíveis modos de falhas, determinação da sequência de eventos que levam a esta falha, escolha da melhor estimativa para a probabilidade de ocorrência de cada um destes eventos e a consideração da incerteza destes valores. Todo esse conjunto de informações encontra-se, portanto, agrupado em dois produtos: a árvore de eventos e as distribuições de probabilidade obtidas para cada um dos

eventos que compõe seus ramos. Com esse material disponível, o procedimento para o cálculo da probabilidade de ocorrência de cada cenário passa a ser matemático e pode ser realizado com o auxílio de planilhas eletrônicas, associadas ao aplicativo @Risk (Palisade Corporation, 2008, versão 5.0). A Figura 5.57 demonstra a árvore lógica utilizada para o cálculo das probabilidades de ocorrência dos cenários.

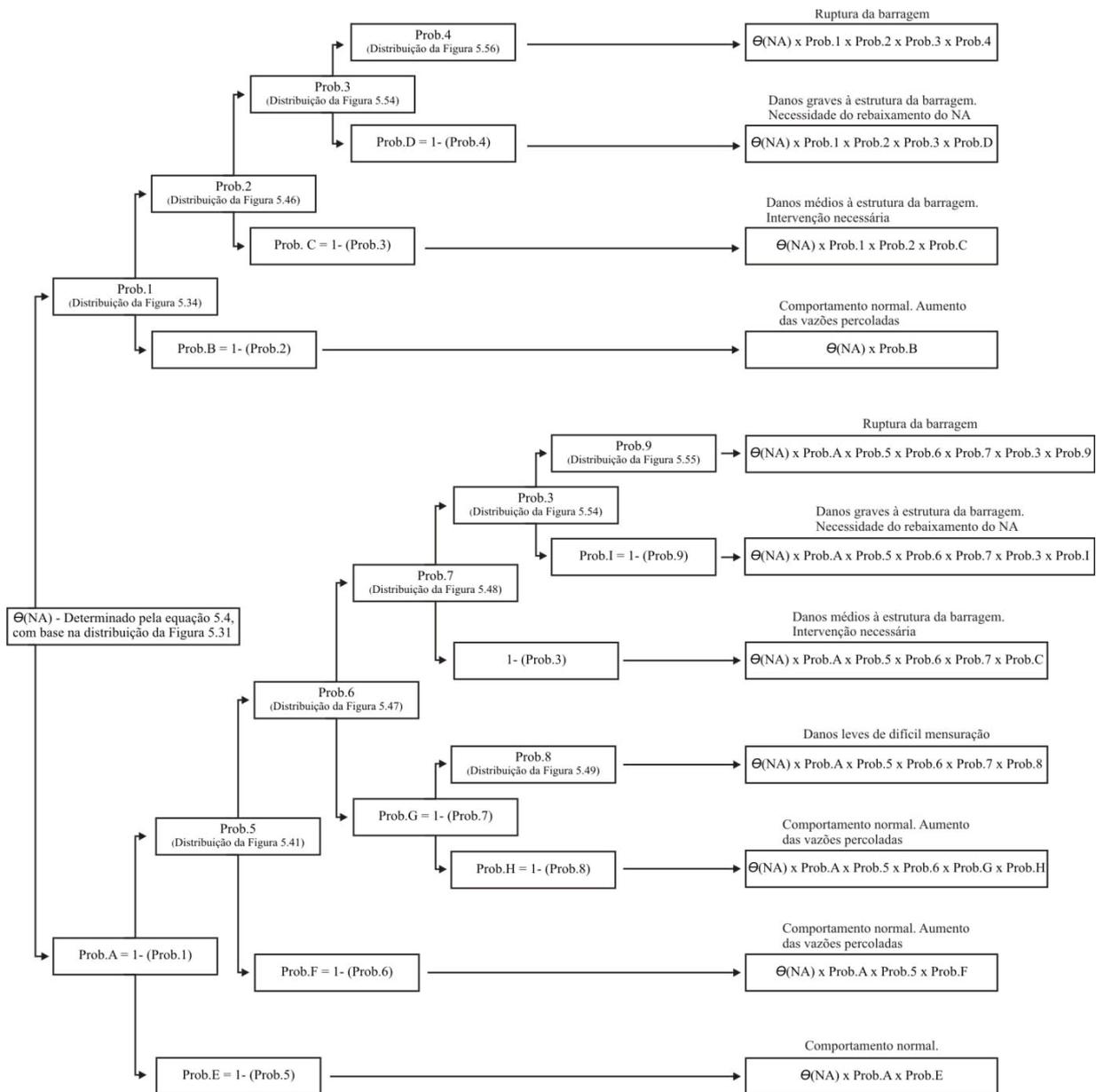


Figura 5.57 - Árvore lógica utilizada para quantificação dos cenários de *piping*

Outro importante ganho do processo adotado é que todo o raciocínio e procedimentos utilizados para a determinação e quantificação das falhas podem ser utilizados para a quantificação da probabilidade de suas consequências.

5.8. Análise dos resultados

Com a árvore lógica, descrita na Figura 5.57, transcrita na forma de planilha eletrônica e cada um dos eventos que a compõe, como distribuição de probabilidade, foi realizada uma simulação, composta de 100.000 iterações, que permitiu combinar os efeitos das incertezas dos dados de entrada e obter os valores de probabilidade de ocorrência dos cenários previstos.

A simulação foi feita com a retirada aleatória, pelo método de Monte Carlo, de um único valor de cada distribuição (que compõe um determinado cenário) a cada iteração. Deste processo resultou um conjunto de valores, um para cada evento, que foram combinados para se obter o valor de probabilidade do cenário. Os resultados dos cenários obtidos a cada iteração foram agrupados na forma de histograma de frequência.

Ao processo de obtenção de valores aleatórios chama-se amostragem e cada recálculo da planilha com uma nova amostragem, iteração. Em cada iteração, todos os ramos da árvore de eventos de *piping* foram calculados simultaneamente, o que permitiu que todas as variáveis, cujo comportamento depende da cota de nível d'água, respeitassem um mesmo valor em toda a árvore de eventos a cada rodada, independentemente do ramo que o evento ocupa.

Os resultados encontram-se ilustrados na Figura 5.58, Figura 5.59 e Figura 5.60 na forma de histogramas de frequência. No primeiro grupo de resultados (Figura 5.58), apresentam-se aqueles referentes a situações ocorridas na região de contato entre o maciço da barragem e a galeria de concreto armado que abriga os condutos de adução, no segundo (Figura 5.59), apresentam-se aqueles referentes a situações ocorridas na região de contato do maciço e, por fim (Figura 5.60), o resultado que representa o comportamento normal da barragem.

Os histogramas de frequência de cada cenário representam os intervalos dos possíveis valores de probabilidade que cada situação descrita tem de ocorrer. Os valores mínimo, médio e máximo são indicados, bem como do desvio padrão. Outra importante informação presente nos histograma é a forma como que os valores encontram-se distribuídos, pois representam o comportamento da variável.

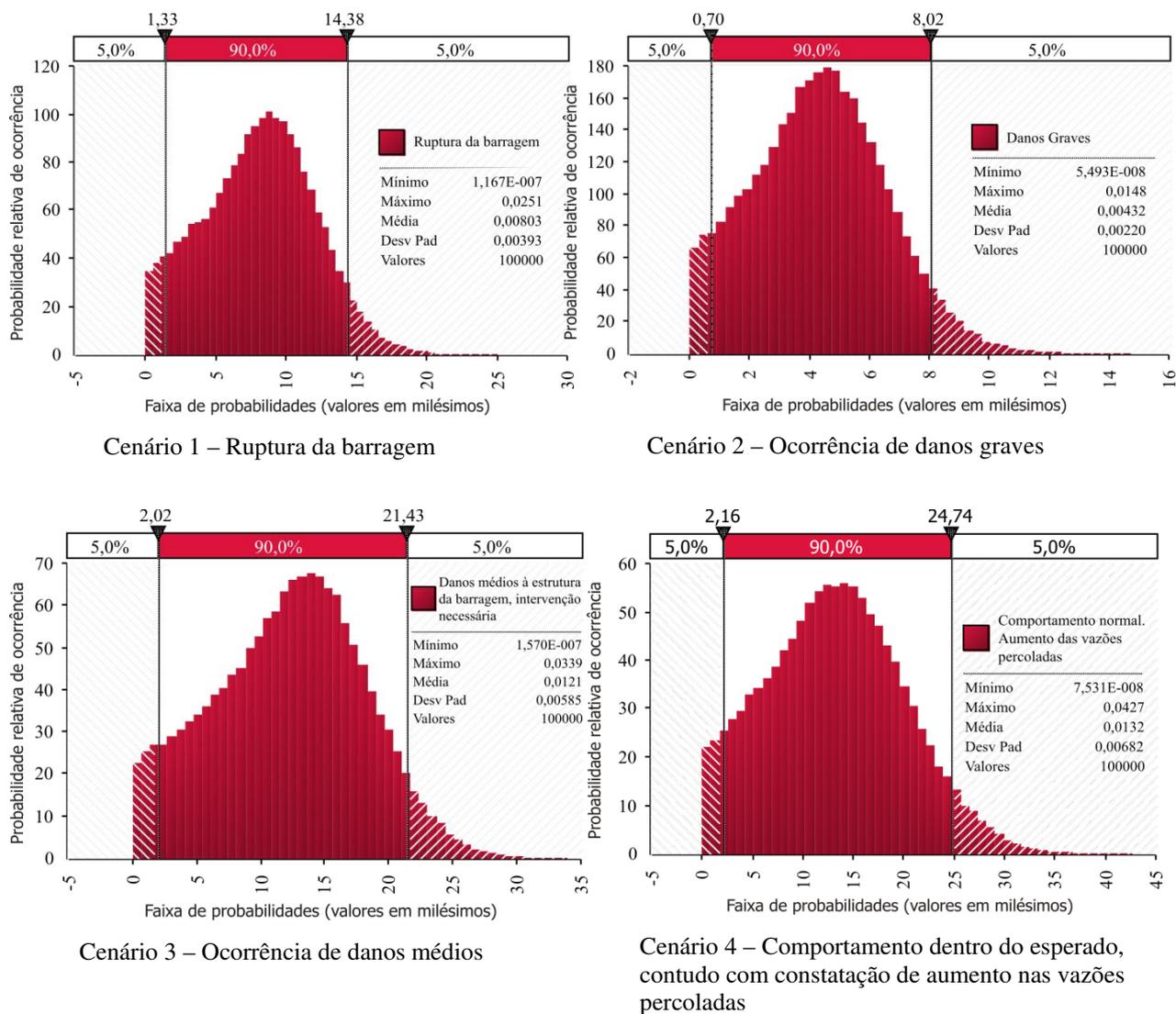


Figura 5.58 – Quantificação da probabilidade dos cenários ocorridos na região de contato do maciço / galeria

Em todos os histogramas da Figura 5.58 é possível observar que a faixa representativa do intervalo onde se situam 90% dos valores obtidos é bastante ampla. Esta abertura da saia do histograma representa a magnitude da incerteza que incide sobre a determinação da probabilidade de ocorrência dos cenários. Este é um comportamento esperado, uma vez que muitos dos processos de determinação e quantificação dos eventos, que compõe cada um destes cenários, partiram de julgamentos subjetivos.

Constata-se também que os valores obtidos se situam em torno de um valor central, o que indica que o valor médio representa bem a probabilidade da variável. Já o comportamento das probabilidades das variáveis representadas nos histogramas para cenários ocorridos na região do maciço são diferentes, conforme observado na Figura 5.59.

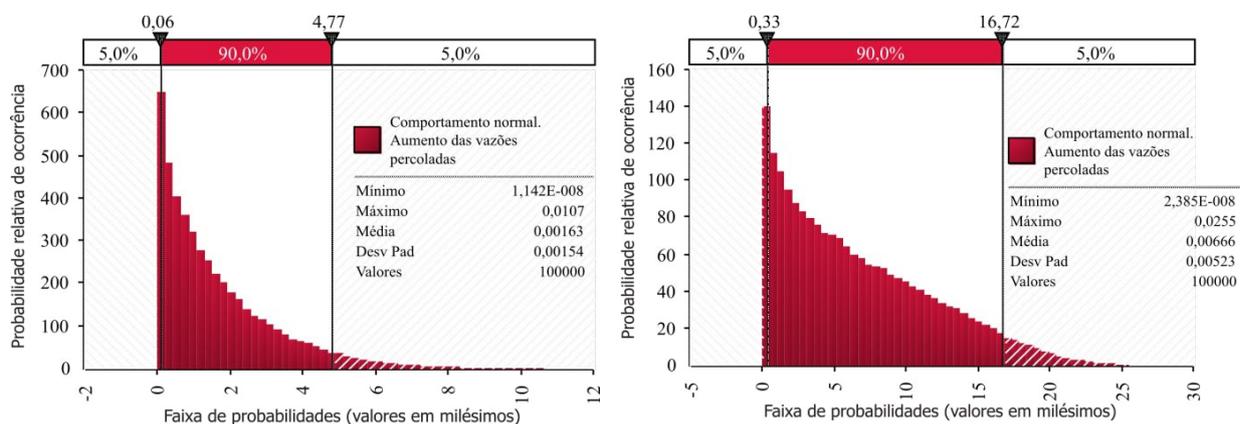
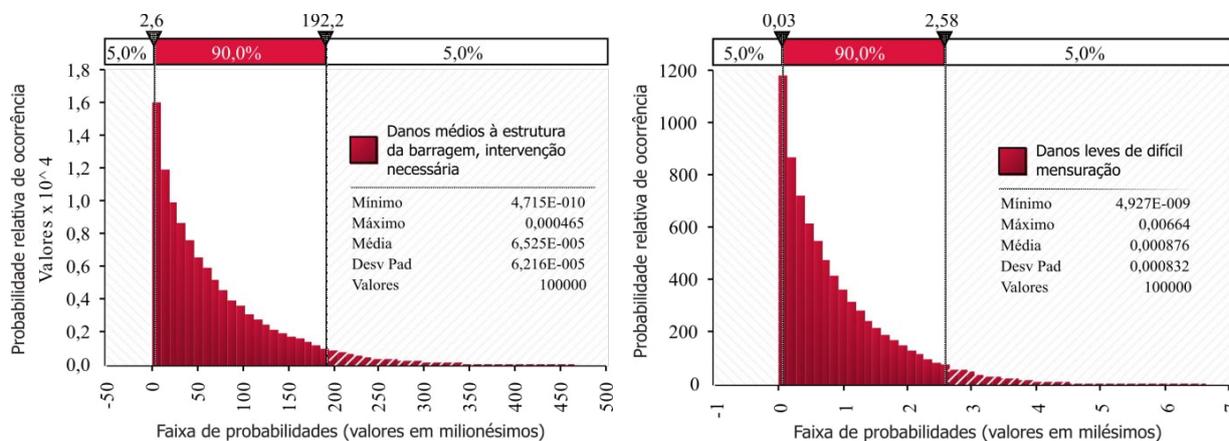
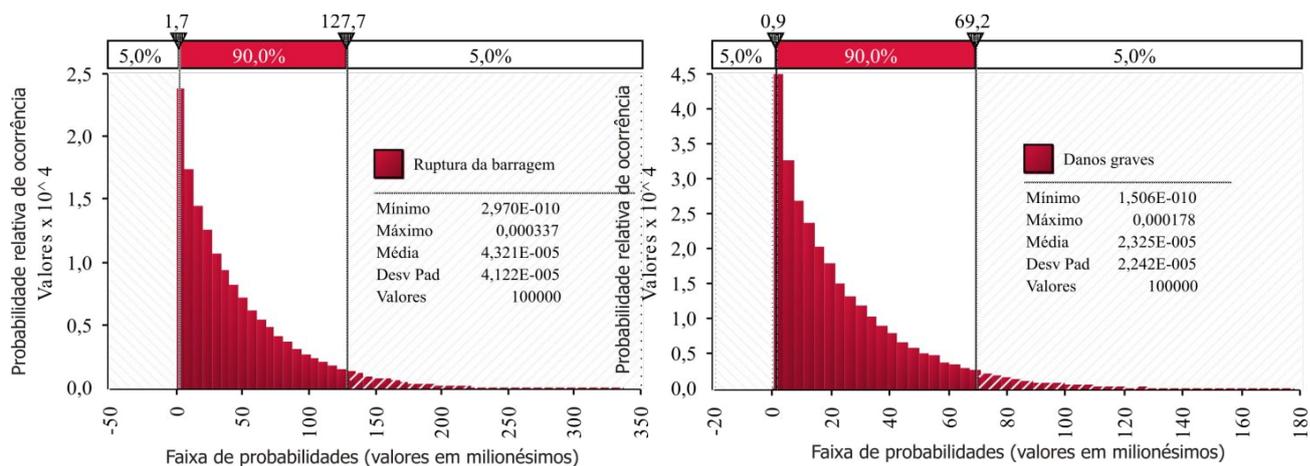
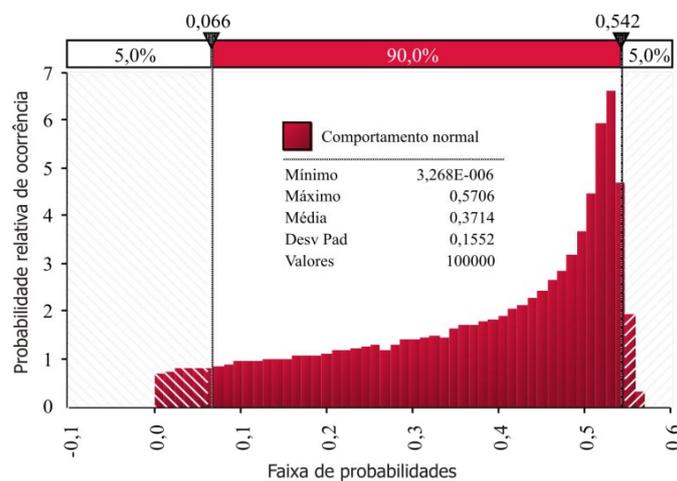


Figura 5.59 – Quantificação da probabilidade dos cenários ocorridos na região do maciço

Dos histogramas da Figura 5.59 nota-se um comportamento distinto daqueles da Figura 5.58, nos quais se observa alguma simetria em torno do valor médio. Para os cenários ocorridos na região do maciço há uma grande frequência de valores próximos ao mínimo. Nestes casos fica claro como a adoção de um modelo determinístico, cujo valor de referência seria a média, poderia maquiar a realidade da variável estudada, uma vez que toda a saia, composta por resultados desfavoráveis, não seria considerada.

O último histograma, apresentado na Figura 5.60, representa a probabilidade de nenhum outro cenário ocorrer, portanto, é muito geral e tem um comportamento bastante uniforme praticamente em toda a extensão dos possíveis valores de probabilidade, com alguma tendência a valores mais favoráveis à segurança da barragem. Contudo tal comportamento praticamente inviabiliza seu uso para algum tipo de análise que envolva decisões.



Cenário 11 – Comportamento normal

Figura 5.60 – Quantificação da probabilidade de não ocorrer nenhuma falha na barragem

Os resultados obtidos indicam que a probabilidade de a barragem se romper estaria muito mais ligada à problemas existentes na região de contato maciço / galeria do que aos existentes no maciço da barragem. A maior razão disso, segundo a análise dos resultados parciais, foi não se considerar nenhuma colaboração da capacidade dos filtros nessa região de contato, assim, uma vez iniciado o fluxo concentrado, ocorreria o processo erosivo que evoluiria até causar a ruptura. Já para problemas ocorridos no corpo da barragem, estes seriam altamente minimizados pela capacidade dos filtros interromperem o processo de transporte de finos.

Observa-se também que a região de contato do maciço / galeria é crítica para a segurança da barragem, uma vez que a probabilidade de ocorrer falhas, que resultam em danos graves e médios, foram mais elevados que os obtidos para aqueles ocorridos na região do maciço. Nesta última, falhas resultariam, na sua maior parte, devido à existência de trincas ou camadas com maior permeabilidade, entretanto, as consequências seriam localizadas, que implicariam em danos leves, como afundamentos e pequenas erosões, e no aumento das vazões percoladas através da barragem.

Em termos globais, a probabilidade de ruptura da barragem seria dada pela probabilidade de a mesma acontecer tanto devido a falhas ocorridas na região de contato maciço / galeria, quanto na região do maciço e, portanto, os resultados deveriam ser combinados conforme relação indicada na Figura 5.61:

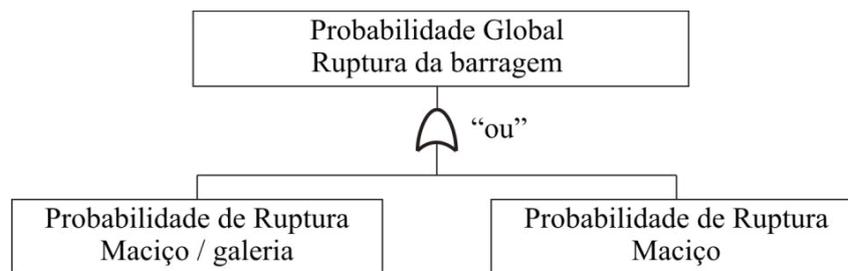


Figura 5.61 – Combinação necessária para determinação da probabilidade global de ruptura da barragem.

Da mesma forma, os danos graves, médios e o comportamento normal com aumento das vazões percoladas foram combinados. Os resultados destes agrupamentos encontram-se ilustrados na Figura 5.62, juntamente com os demais que não necessitam da combinação.

O procedimento utilizado para realizar as combinações destas variáveis foi por meio das mesmas iterações utilizadas para a determinação das probabilidades dos cenários. Para isso atribuiu, a novas células da planilha eletrônica, a orientação para realizar o somatório dos valores obtidos a cada iteração, resultando no histograma de frequência.

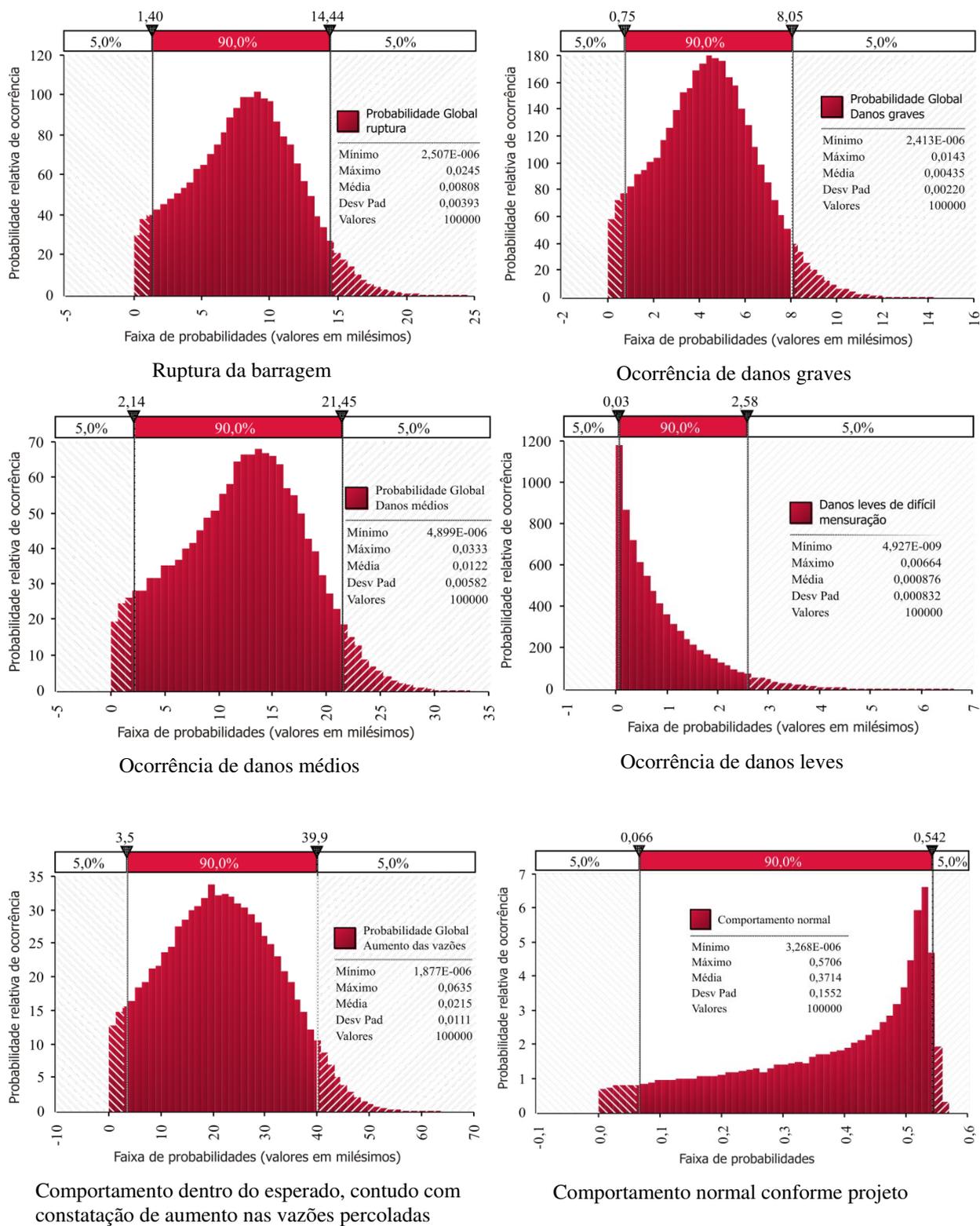


Figura 5.62 – Resultados globais da quantificação da probabilidade de eventos relacionados ao *piping*

Conforme pode ser observado, os histogramas resultantes de combinação se assemelharam muito aos obtidos para os cenários relacionados à região do maciço / galeria, confirmando a relevância de um cuidado maior nesta região.

6. CONCLUSÕES

Um dos resultados deste estudo foi a identificação de vários cenários de eventos relacionados às três maiores causas de acidentes envolvendo barragens: o *piping*, o galgamento e a instabilidade de taludes. Tal realização teve origem na análise de documentação disponível, inspeções de campo e simulações numéricas, fundamentadas em conhecimentos já disponíveis na literatura técnica especializada. O produto final foram as árvores de eventos ilustradas na Figura 5.28, Figura 5.29 e Figura 5.30.

O procedimento adotado mostrou ser viável a montagem de cenários de falhas para barragens de terra, quaisquer que sejam suas peculiaridades construtivas e que esta prática pode ser incorporada à rotina das empresas, quer sejam projetistas, construtores ou empreendedores. Entretanto, ressalta-se a importância de um profissional capacitado para orientar os trabalhos voltados para a gestão de riscos, de maneira a preservar os princípios e fundamentos que a norteiam.

Outro resultado foi a quantificação dos cenários referentes ao *piping*. O procedimento adotado foi o de se estimar um valor, chamado Melhor Estimativa, da probabilidade de ocorrência de cada um dos eventos que compunham um determinado cenário e a ele se atribuir uma variação percentual, para mais e para menos, a qual representaria um intervalo no qual o valor desta probabilidade poderia variar. A frequência com que cada valor neste intervalo poderia ocorrer seria dada por uma distribuição de probabilidades. O motivo de se ter adotado este procedimento deveu-se principalmente à ausência de dados de medições ou de registros históricos que permitissem a quantificação direta do evento.

Acredita-se que a ausência de dados será um problema sempre presente nas avaliações de riscos realizadas para barragens, portanto, a elaboração de distribuições de probabilidade baseadas em informações coletadas da literatura ou moldadas segundo opiniões de especialistas provavelmente será bastante utilizada. Neste trabalho, o próprio analista de riscos, no caso o autor deste trabalho, foi quem julgou as informações e as quantificou. Esta prática, no entanto, não é recomendada, pois pode se obter resultados tendenciosos. A literatura orienta que o julgamento de especialistas deve ser moldado, na forma de uma distribuição de probabilidade, por uma pessoa não envolvida com a barragem e o resultado submetido à aprovação do próprio especialista.

Como apenas dados de medição de vazão e cotas do NA do reservatório eram oriundas de séries históricas de medições realizadas, todos os outros eventos tiveram que ter seus comportamentos estimados, alguns com maior e outros com menor precisão, um cuidado deve ser tomado quando se interpretam os resultados. As probabilidades de ocorrência dos cenários não devem ser analisadas por meio de seus valores absolutos, mas de forma relativa, onde é possível identificar qual evento contribui mais para a ocorrência do cenário, qual é o que possui maior incerteza e necessita maiores estudos, qual cenário é o mais preponderante etc.

É importante se observar que para ser possível estabelecer o risco de uma obra, não basta apenas a identificação e quantificação dos cenários da árvore de eventos, uma vez que por risco se entende a combinação da probabilidade de ocorrência com as suas consequências. No caso estudado, para se chegar à uma análise de risco da barragem, ainda se faz necessário uma análise destas consequências. Por exemplo, quais seriam os danos causados com a ruptura da barragem? Caso ocorresse uma ruptura, fora os danos à estrutura da barragem, poderiam ocorrer danos à obras de infraestrutura, destruição de cidades, mortes etc., neste caso o risco da barragem seria altíssimo. Por sua vez, se a mesma ruptura, só causasse danos à barragem em si, esta poderia ser considerada de baixo risco.

O estudo das consequências não foi realizado, portanto não se avaliou efetivamente o risco da barragem. Portanto, o risco não foi apreciado em relação a nenhum critério de tolerabilidade, necessário para decidir se o risco deve ou não ser mitigado.

6.1. Conclusões sobre o uso da avaliação de riscos em barragens

A ausência de dados históricos detalhados sobre acidentes e rupturas envolvendo barragens dificulta uso na quantificação dos eventos em uma análise de riscos quanto no aprendizado de toda a comunidade técnica a cerca de eventos como, por exemplo, aqueles relacionados ao *piping*. Outra questão é que para obras de terra, além da necessidade por dados, os mesmos só podem ser utilizados nos casos em que se tenham características semelhantes no quesito analisado, o que diminui ainda mais chance de se ter as informações necessárias.

O analista de riscos é obrigado a utilizar métodos de quantificação da variável com base em informações genéricas coletadas da literatura, utilizar constantes julgamentos e utilizar

métodos para representar, em forma de probabilidade, opiniões de especialistas, ou seja, é necessário utilizar-se de inúmeros artifícios para quantificar as probabilidades dos cenários de falhas e sua incerteza.

Os processos erosivos envolvidos em fenômenos de *piping* e galgamento também são pouco compreendidos e muitas das práticas da engenharia de barragem são baseadas em situações exitosas do passado. Outra característica importante na disciplina de barragens é que um acidente é resultado de combinações de inúmeros eventos individuais que no seu conjunto resultam na falha, os quais geralmente são difíceis de serem estimados, compreendidos e quantificados.

Não foi encontrado roteiro metodológico que orientasse a elaboração de uma avaliação de risco para barragem, de fato. Encontra-se varias aplicações, contudo, focadas nos resultados obtidos onde dificilmente tem-se uma ênfase no processo utilizado, impossibilitando interessados no assunto compreender como se chegou aos resultados.

O potencial de aplicação de avaliação de riscos para possibilitar o aumento na segurança de barragens é bastante claro e promissor, contudo maiores estudos ainda necessitam ser feitos neste sentido, principalmente quanto ao tratamento que deve ser dado às variáveis.

A prática de gestão de risco no Brasil ainda não é bem difundida, bem como a utilização corriqueira de abordagens estatísticas e probabilísticas não é um hábito entre os profissionais brasileiros, contudo o ganho qualitativo, que se obteria com esta prática, é enorme. Para tanto, divulgação é necessária.

A própria filosofia da avaliação de riscos envolve realimentação do processo com novos dados, como forma de aprimoramento, portanto, mesmo que se comece com poucas informações e com procedimentos extremamente simples, as percepções resultantes já permitem que aprimoramentos sejam feitos de forma orientada.

Por fim, o princípio de basear as tomadas de decisões de engenharia, com base em estudos estatísticos e apreciá-los segundo valores sociais vigentes vem de encontro a uma tendência internacional de tornar a engenharia mais humana, apesar de extremamente técnica.

6.2. Recomendações para pesquisas futuras

- Estudo dos casos de ruptura de barragens buscando obter elementos que possibilitem o embasamento das abordagens com base nos riscos;
- Elaboração de orientações sobre o tratamento estatístico de parâmetros geotécnicos e moldagem de distribuições probabilísticas para uso em análise de riscos;
- Definição e aprimoramento dos eventos envolvidos nos cenários de *piping*, galgamento e instabilidade de taludes
- Determinação de critérios de tolerabilidade passíveis de serem utilizados em barragens brasileiras.
- Avaliação das consequências dos cenários para a estimação dos riscos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A.B. (2001). Emergências e Gestão do Risco. Curso de exploração e segurança de barragens. INAG, Lisboa, Portugal, 680: Capítulo 7- 1-110.
- AS/NZS (2004). Risk Management. Standards Australia / Standards New Zealand, AS/NZS 4360:2004 Third edition.
- Baecher, G. B.; Christian, J.T. (2008). Spatial variability and geotechnical reliability. Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering - Computations and Applications, Kok-Kwang Phoon (ed.), Taylor & Francis, USA and Canada, Chapter 2, 61, 76-136.
- Bier, V.M. (1997). Monte Carlo Risk Analysis Modeling. Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management, Vlasta Molak (ed.), Vlasta Molak, USA, Chapter I.4.
- Bozkus, Z.; Kasap, A. (1998). Comparison of Physical and Numerical Dam-Break Simulations. Journal of Engineering and Environmental Science, 22, 429-443.
- Bowles, D.S.; Anderson, L.R.; Glover, T.F. (1997). A Role for Risk Assessment in Dam Safety Management. Proceedings of the 3rd International Conference, Hydropower 97, Trondheim, Norway, 9.
- Bowles, D.S. (2001). Dam Safety Risk Assessment. Simpósio de Riscos Associados a Barragens, CBDB, São Paulo, Brasil, 22: 221-243
- Bowles, D.S. (2003). Summary of USSD Emerging Issues White Paper on Dam Safety Risk Assessment: What is it? Who's using it and why? Where should we be going with it?. Working Group on Risk Assessment, USSD Committee on Dam Safety, USA, 12p.
- Bowles, D.S. (2007). Tolerable Risk for Dams: How safe is safe enough? US Society on Dams Annual Conference, USSD, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 24p.
- Chauhan, S.S.; Bowles, D.S. (2003). Dam Safety Risk Assessment with Uncertainty Analysis. Proceedings of the Australian Committee on Large Dams – Risk Workshop, ANCOLD, Launceston, Tasmania, Australia, 17p.
- DSO (1998). Prediction of Embankment Dam Breach Parameters – A Literature Review and Needs Assessment. Dam Safety Office. Dam Safety Research Report. USA. 61p.
- Fell, R.; Bowles, D.S.; Anderson, L.R.; Bell, G. (2000). The Status of Methods for Estimation of the Probability of Failure of Dams for Use in Quantitative Risk Assessment. 20th Congress, ICOLD, Beijing, China, 20p.
- Foster, M.; Fell, R. (2000). Use of Event Trees to Estimate the Probability of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping. 20th Congress, ICOLD, Beijing, China, 23: 237-259.

- Foster, M.; Fell, R.; Spannagle, M. (2000). The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 25: 1000-1024.
- Foster, M.; Fell, R. (2001). Assessing Embankment Dam Filters that Do Not Satisfy Design Criteria. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 10: 398-407.
- Fread, D. L. (1984). DAMBRK: The NWS Dam-break Flood Forecasting Model. National Weather Service, Silver Spring, Maryland, USA, 23p.
- Fread, D. L. (1988 – revised 1991). BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures. National Weather Service, Silver Spring, Maryland, USA, 31.
- Geotécnica (1971). Relatório Final da Barragem do Santa Maria. GB-210-N4/69, Vol. I. Rio de Janeiro.
- Grupo de trabalho de análise de risco em barragens (2005). 1º Relatório de Progresso. CNPGB, 58p.
- IMPACT (2005). Breach Formation Technical Report (WP2). European Commission, FP5 Research Programme. Contract N°. EVG1-CT-2001-00037. www.impactproject.net
- International Standard (2004). Probabilistic Risk Assessment. ISO/WD 16193 - First Draft Issue, 24p.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (2007). Gerenciamento de Riscos Geotecnológicos – Roteiro Metodológico. São Paulo, Brasil. 36p.
- Menescal, R. A. (2009). Gestão da segurança de barragens no Brasil: proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 769p.
- MI (2005). Manual de Preenchimento da Ficha de Inspeção de Barragem. Ministério da Integração Nacional. Brasília-DF, 148p
- MI (2008). Levantamento de Espelhos D'água no Brasil. Relatório Técnico. Ministério da Integração Nacional. Brasília-DF
- Powledge, G.R.; Ralston, D.C.; Miller, P.; Chen, Y. H.; Clopper, P. E.; Temple, D. M. (1988). Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. II: Hydraulic and Design Considerations. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 115, nº 8, 1056-1075.
- Silveira, J.F.A. (2001). Casos Históricos. Simpósio de Riscos Associados a Barragens, CBDB, São Paulo, Brasil, 44: 156-220.
- Stamatelatos, M (2002). Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners. NASA, Washington, DC, USA, 323p.

- USACE (2006). Reliability Analysis and Risk Assessment for Seepage and Slope Stability Failure Modes for Embankment Dams. Engineer Technical Letter N0. 1110-2-561. Washington, D.C, 25p.
- Vose, D. (1997). Na Overview of Probabilistic Risk Analysis for Complex Engineered Systems. Fundamentals of risk analysis and risk management, Vlasta Molak (ed.), Vlasta Molak, USA, Chapter I.5.
- Wilson, R.; Shlyakhter, A. (1997). Uncertainty and Variability in Risk Analysis. Fundamentals of risk analysis and risk management, Vlasta Molak (ed.), Vlasta Molak, USA, Chapter I.3.