

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**

**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM BARRAGEM  
DE TERRA, SOB O CENÁRIO DE EROÇÃO  
TUBULAR REGRESSIVA, POR MÉTODOS  
PROBABILÍSTICOS  
O CASO UHE – SÃO SIMÃO**

**Josias Eduardo Rossi Ladeira**

**Belo Horizonte**

**2007**

**AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM BARRAGEM  
DE TERRA, SOB O CENÁRIO DE EROÇÃO  
TUBULAR REGRESSIVA, POR MÉTODOS  
PROBABILÍSTICOS**

**O CASO UHE – SÃO SIMÃO**

**Josias Eduardo Rossi Ladeira**

**Josias Eduardo Rossi Ladeira**

**AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM BARRAGEM  
DE TERRA, SOB O CENÁRIO DE EROÇÃO  
TUBULAR REGRESSIVA, POR MÉTODOS  
PROBABILÍSTICOS  
O CASO UHE – SÃO SIMÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: MA3.1 – Avaliação de impactos e riscos ambientais

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Terezinha de Jesus Espósito

Co-Orientador: Prof. Mauro da Cunha Naghettini

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

L154a Ladeira, Josias Eduardo Rossi  
Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos [manuscrito] : o caso UHE-São Simão / Josias Eduardo Rossi Ladeira .— 2007.  
xiii, 210 f. , enc. : il.

Orientadora: Terezinha de Jesus Espósito  
Co-orientador: Mauro da Cunha Naghettini

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 178-180

Anexos: f. 184-210

1. Avaliação de riscos ambientais - Teses. 2. Barragens e açudes - Segurança - Teses. 3. Meio ambiente- Teses. I. Espósito, Terezinha de Jesus. II. Naghettini, Mauro da Cunha. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624.136 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Av. Contorno 842 – 7º andar 30110-060 Belo Horizonte – BRASIL

Tel: 55 (31) 3238-1882 Fax: 55 (31) 3238-1882 posgrad@desa.ufmg.br

www.smarh.eng.ufmg.br

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, sob o Cenário de Erosão Tubular  
Regressiva, por Métodos Probabilísticos  
O Caso UHE - São Simão

**JOSIAS EDUARDO ROSSI LADEIRA**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. TEREZINHA DE JESUS ESPÓSITO

Prof. MAURO DA CUNHA NAGHETTINI

Prof. GUSTAVO FERREIRA SIMÕES

Prof. MÁRCIO BENEDITO BAPTISTA

PESQ. M.SC. ROGÉRIO DE ABREU MENESCAL

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Prof. Léo Helier  
Coordenador

Versão Final aprovada por

Prof.ª Terezinha de Jesus Espósito  
Orientadora

Belo Horizonte, 09 de julho de 2007.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo término desta dissertação, pela graça da inteligência, que impulsiona meu ser em busca de respostas aos questionamentos científicos.

Ao meu pai, Joffre Ladeira, e a minha mãe, Maria de Lourdes Rossi Ladeira, que me ensinaram como viver, pelo carinho que sempre conduziram minha criação e me levaram ao caminho da fé.

À minha família, em especial minha esposa Ângela, minha filha Natália, e meu filho Bruno, pela paciência que tiveram e pelo apoio nas horas mais difíceis. Nos momentos de impaciência, agradeço pela harmonia mantida pelo Senhor em meu lar, durante o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus irmãos, Cristina, Maria Amélia, José Orlando, Beatriz, Selma e familiares, que à distância compreenderam minha ausência em momentos que a família desfruta de bom convívio e paz.

Aos professores, Terezinha Espósito e Mauro Naghettini, pelas valiosas aulas e pelas orientações durante o desenvolvimento da pesquisa, pelas lições que ficaram nas entrelinhas, que marcaram minh'alma. Durante o desenvolvimento da pesquisa senti pertencer a uma equipe, com um objetivo comum a ser alcançado, com determinação e objetividade.

Aos professores do programa de Pós-graduação em SMARH, em especial às preciosas orientações da Prof<sup>a</sup> Liséte Celina Lange, a paciência e dedicação do Prof. Celso Loureiro, ao Prof. Gustavo Simões por suas aulas que me despertaram para a geotecnia, e ao Prof. Lúcio Vilar por suas “dicas” para o preparo do exame de seleção ao programa de mestrado em SMARH.

À empresa CEMIG por permitir a disponibilidade de informações publicadas nesta dissertação, em especial a gerente da GA/SM, Teresa Cristina Fusaro, pela paciência e apoio às seguidas revisões de textos, a atenção de Adelaide no esclarecimento de dúvidas e a todos do departamento que contribuíram pelas informações cedidas.

Aos colegas de mestrado, Paulo Mário, Paula Balabram, Ney Procópio e Cláudia Cunha, pelo apoio nas soluções de problemas durante os estudos em equipe e a amizade desenvolvida durante estes anos.

Ao Prof. Robin Fell da University of New South Wales, Sydney, Austrália, por ter cedido os dados sobre incidentes em barragens, que compõem o banco dados ERDATA1, pois sem estes não seria possível a profundidade das análises realizadas nesta dissertação.

Ao Prof. Dr. Hiran Sartori pelo incentivo dado desde a época em que foi meu professor na especialização.

Ao Prof. Dr. Humberto Elias por acreditar em minha capacidade na seleção para a docência, incentivando-me a prosseguir em minha formação acadêmica.

E por fim, tenho especial agradecimento a minha avó, Amélia Fortes Vianna Rossi, que me ensinou a orar, a ter humildade em saber que cada conhecimento adquirido nos remete a simples condição humana de se resignar à grandeza de Deus.

## RESUMO

A pesquisa descreve a avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva (*piping*), por métodos probabilísticos, tendo como estudo de caso a barragem da UHE – São Simão. Os resultados identificaram pontos críticos que merecem mais atenção e ações de prevenção para evitar impactos ambientais decorrentes de ruptura da barragem.

Para avaliar a segurança da barragem em estudo e a respectiva probabilidade relativa de ruptura por *piping*, foram empregados os métodos de análise de performance e de análise por Árvore de Eventos (ETA).

A avaliação de probabilidade de *piping* para o barramento considerou sua seção transversal típica, os seus filtros, o seu tempo de operação, os tipos de solo usado no núcleo, a compactação, a geologia da fundação, a performance da barragem, o monitoramento e a supervisão por 29 anos de operação. O método envolve o ajuste de probabilidades médias históricas de três modos de erosão tubular regressiva: *piping* através do barramento, *piping* através da fundação e *piping* do barramento para a fundação, considerando as rupturas históricas. Os métodos aqui referenciados são denominados UNSW (University of New South Wales) e ETA (Event Tree Analysis).

A base de dados amostrais utilizada para a quantificação de rupturas e acidentes históricos compreendeu 1.462 barragens, as quais correspondem a aproximadamente 13% da população mundial de barragens existentes até 1982.

A probabilidade anual de ruptura por *piping* em grandes barragens é estimada em  $4,5 \times 10^{-4}$  por barragem, a qual se mostrou coerente com o resultado da presente pesquisa.



## ABSTRACT

The research describes the safety assessment for an embankment dam under the scenario of hypothetical backward erosion piping by probability methods, the case study being the embankment dam of the São Simão hydropower plant, in southcentral Brazil. The results identified critical points that justify more attention and prevention actions in order to avoid environmental impacts of embankment dam accidents.

The performance methods for assessing the relative likelihood of piping failure was done by performance analysis and as a checked on event tree analysis (ETA), in order to assess the safety for embankment dam in study.

The likelihood assessment of piping from the embankment took into account the dam zoning, filters, age of the dam, core soil types, compaction, foundation geology, dam performance, and monitoring and surveillance for 29 years of operation. The method involves the adjustment of the historical average probabilities of the three modes of progressive backward erosion: piping through the embankment, piping through the foundation and piping from the embankment into the foundation, by historic failures. The methods employed in this research are referred to as the UNSW method (University of New South Wales) and the ETA (Event Tree Analysis) method.

The data base used to qualify the historical failures is composed by 1462 dams, which correspond to approximately 13% of world population of existing dams until 1982.

The historical annual probability of failure of large embankment dams was estimated in  $4,5 \times 10^{-4}$  per dam per year, which is coherent the research results.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
3.1    Erosão interna.....	6
3.1.1 <i>Controle do fluxo de água.....</i>	8
3.1.2 <i>Aspectos geológico-geotécnicos associados à ocorrência de erosão interna.....</i>	9
3.1.3 <i>Estabilidade das barragens de terra.....</i>	10
3.2    Acidentes em barragens.....	11
3.3    Gestão de riscos.....	15
3.3.1 <i>Aspectos da legislação relativos a risco.....</i>	18
3.3.2 <i>Diretrizes para implementação da norma de gestão de riscos (Norma AS/NZS 4360:2004)...</i>	19
3.4    Análise estatística de rupturas em barragens.....	21
3.4.1 <i>Metodologia de análise do banco de dados.....</i>	27
3.4.2 <i>Estatística de falhas.....</i>	27
3.4.3 <i>Estatística das seções típicas de barragens.....</i>	28
3.4.4 <i>Tipos de geologia da fundação.....</i>	29
3.4.5 <i>Características do núcleo do barramento.....</i>	30
3.4.6 <i>Compactação do núcleo.....</i>	31
3.4.7 <i>Detalhes da fundação e cutoff.....</i>	31
3.4.8 <i>Estatísticas de rupturas.....</i>	32
3.4.9 <i>Tipos de seção em barragens.....</i>	34
3.4.10 <i>Piping através do barramento.....</i>	34
3.4.11 <i>Piping através da fundação.....</i>	39
3.4.12 <i>Piping do barramento para fundação.....</i>	43
3.4.13 <i>Análises sobre as estatísticas de rupturas e acidentes pelo fenômeno de piping.....</i>	47
3.5    Métodos de avaliação de segurança em barragens.....	48
3.5.1 <i>Método de performance histórica.....</i>	49
3.5.2 <i>Método de análise por Árvore de Eventos.....</i>	49
3.5.3 <i>Métodos de avaliação de vulnerabilidade de sistemas.....</i>	51
3.6    Análise por Árvore de Eventos – ETA – Event Tree Analysis.....	57
3.6.1 <i>Fundamentação teórica do método de análise por Árvore de Eventos.....</i>	61
3.6.2 <i>Fundamentação probabilística do método de Árvore de Eventos.....</i>	63
3.6.3 <i>Esquema para mapeamento de probabilidades.....</i>	70
3.6.4 <i>Combinação de probabilidades na análise de vulnerabilidade.....</i>	75
3.7    Exemplo de aplicação de avaliação de segurança por Árvore de Eventos.....	85

<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>90</b>
4.1	Método de avaliação da probabilidade pela performance histórica da barragem .....	90
4.1.1	Aplicação do método UNSW.....	91
4.1.2	Método de estimativa de probabilidades .....	91
4.1.3	Limitações do método UNSW .....	94
4.2	Avaliação da vulnerabilidade em barragens por Árvore de Eventos - ETA.....	94
4.2.1	Processo de construção da Árvore de Eventos .....	94
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DA BARRAGEM SÃO SIMÃO PELO MÉTODO UNSW .....</b>	<b>100</b>
5.1	Caracterização da Barragem.....	102
5.2	Eventos de realização da obra .....	102
5.3	Arranjo geral .....	103
5.4	Aplicação do método UNSW para ocorrência de piping através do barramento .....	104
5.4.1	Dados das seções típicas .....	104
5.4.2	Fator de peso considerando filtros no barramento: Fator de peso $W_{E(filt)}$ .....	113
5.4.3	Fator de peso considerando a classificação dos materiais usados no núcleo: Fator de peso $W_{E(cst)}$ .....	115
5.4.4	Fator de peso considerando a origem geológica dos materiais usados no núcleo: Fator de peso $W_{E(cgo)}$ .....	118
5.4.5	Processo de construção do maciço e controle tecnológico da obra: Fator de peso $W_{E(cc)}$ .....	118
5.4.6	Existência de tubulações ou condutos forçados através do barramento: Fator de peso $W_{E(con)}$ .....	120
5.4.7	Tratamento aplicado na fundação: Fator de peso $W_{E(ft)}$ .....	120
5.4.8	Observações de percolação (aspecto da água): Fator de peso $W_{E(obs)}$ .....	124
5.4.9	Frequência de monitoramento e supervisão: Fator de peso $W_{E(mon)}$ .....	129
5.5	Resumo dos fatores de pesos e cálculo da probabilidade qualitativa de ocorrência de piping através do barramento .....	133
5.6	Aplicação do método UNSW para ocorrência de piping através da fundação .....	134
5.6.1	Dados das seções típicas .....	134
5.6.2	Filtro usado na fundação: Fator de peso $W_{F(filt)}$ .....	134
5.6.3	Tipo de fundação, condições da rocha ou solo (estado de alteração da rocha): Fator de peso $W_{F(fnd)}$ .....	135
5.6.4	Tipo de cutoff: Fator de peso $W_{F(ctr)}$ .....	136
5.6.5	Tipo de geologia da rocha da fundação: Fator de peso $W_{F(rg)}$ .....	137
5.6.6	Observações de percolação pela fundação (aspecto da água) e medidas de poropressões ao longo do tempo: Fator de peso $W_{F(obs)}$ .....	138
5.6.7	Frequência de monitoramento e supervisão: Fator de peso $W_{F(mon)}$ .....	144
5.7	Resumo dos fatores de pesos e cálculo da probabilidade qualitativa de ocorrência de piping através da fundação.....	144
5.8	Piping do barramento para fundação.....	145
5.8.1	Dados das seções típicas .....	145
5.8.2	Filtro usado na fundação: Fator de peso $W_{EF(filt)}$ .....	146
5.8.3	Profundidade do cutoff e características da fundação: Fator de peso $W_{EF(cot)}$ .....	146
5.8.4	Tipo de fundação (rocha ou solo): Fator de peso $W_{EF(fnd)}$ .....	146

5.8.5	Medidas de controle da erosão na fundação do núcleo: Fator de peso $W_{EF(ecm)}$ .....	146
5.8.6	Processo de aplicação de grout na fundação: Fator de peso $W_{EF(gr)}$ .....	146
5.8.7	Tipo de geologia da rocha ou solo da fundação: Fator de peso $W_{EF(rg)}$ .....	149
5.8.8	Origem geológica do solo/materiais usados no núcleo: Fator de peso $W_{EF(cgo)}$ .....	150
5.8.9	Tipo de solo do núcleo: Fator de peso $W_{EF(cst)}$ .....	150
5.8.10	Compactação do núcleo: Fator de peso $W_{EF(cc)}$ .....	150
5.8.11	Tratamento aplicado na fundação: Fator de peso $W_{EF(ft)}$ .....	150
5.8.12	Observações de percolação pela fundação e pelo maciço (aspecto da água): Fator de peso $W_{EF(obs)}$ .....	151
5.8.13	Frequência de monitoramento e supervisão: Fator de peso $W_{EF(mon)}$ .....	151
5.9	Resumo dos fatores de pesos e cálculo da probabilidade qualitativa de ocorrência de <i>piping</i> do barramento para a fundação .....	151
5.10	Cálculo da probabilidade anual de ruptura por <i>piping</i> na barragem UHE São Simão (CEMIG) .....	153
<b>6 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DA BARRAGEM SÃO SIMÃO POR ÁRVORES DE EVENTOS.</b>		<b>158</b>
6.1	Possível ocorrência de <i>piping</i> no barramento .....	158
6.2	Possível ocorrência de <i>piping</i> pela fundação.....	159
6.3	Possível ocorrência de <i>piping</i> do barramento para a fundação.....	161
6.4	Cálculo da probabilidade anual de ruptura por <i>piping</i> na barragem da UHE São Simão (CEMIG):	163
<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>		<b>170</b>
7.1	Considerações finais.....	170
7.2	Ações para se evitar formação de <i>piping</i> .....	171
7.3	Conclusões .....	172
7.4	Recomendações .....	174
<b>APÊNDICE A – LISTA DE VERIFICAÇÃO DE DADOS.....</b>		<b>181</b>
<b>ANEXO A – ERDATA 1 - BASE DE DADOS DE RUPTURAS E ACIDENTES .....</b>		<b>184</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Mecanismo de formação de <i>piping</i> .....	6
Figura 3.2 – Estágios de desenvolvimento de ruptura por <i>piping</i> .....	7
Figura 3.3 – Formação de brecha na barragem Baldwin Hills – vista de montante.....	12
Figura 3.4 – Formação de <i>piping</i> na barragem Teton - Rexburg, Idaho – EUA.....	13
Figura 3.5 – Formação de <i>piping</i> na barragem da Pampulha, Belo Horizonte - MG .....	14
Figura 3.6 – Evolução do risco nas diversas fases da vida de uma barragem .....	16
Figura 3.7 – Análise de riscos. Fluxograma das principais atividades .....	17
Figura 3.8 – Localização do início de formação de <i>piping</i> .....	37
Figura 3.9 – Método Nó Borboleta.....	56
Figura 3.10 – Terminologia aplicada à Árvore de Eventos .....	61
Figura 3.11 – Características da Árvore de Eventos.....	62
Figura 3.12 – Espaço amostral para jogo de dois dados.....	64
Figura 3.13 – Árvore de Eventos para experimento de jogo de dois dados.....	64
Figura 3.14 – Árvore de Eventos para descarga e fluxo de água em um rio .....	65
Figura 3.15 – Alteração de ordem de eventos em uma árvore de eventos.....	66
Figura 3.16 – Árvore de conseqüências como resultado da união de eventos.....	68
Figura 3.17 – Árvore de Eventos e dependências entre probabilidades .....	72
Figura 3.18 – Árvore de Eventos e probabilidades.....	73
Figura 3.19 – Cálculo de probabilidade em ramos da Árvore de Eventos.....	74
Figura 3.20 – Checagem no cálculo de probabilidade em ramos da Árvore de Eventos.....	75
Figura 3.21 – Múltiplos modos de falha.....	77
Figura 3.22 – Sistema de eventos: probabilidades pelo modo de falha unimodal .....	81
Figura 3.23 – Diagrama de Venn: mostra a probabilidade condicional de rupturas.....	83
Figura 3.24 - Árvore de Eventos para alternativa I – erosão interna pela interface C/S.....	87
Figura 3.25 - Árvore de Eventos para alternativa II – erosão interna pela interface C/S .....	87
Figura 3.26 – Árvore de Eventos por <i>piping</i> através do barramento .....	89
Figura 4.1 – Passos na construção da Árvore de Eventos .....	96
Figura 5.1 – Localização de algumas hidrelétricas pertencentes à CEMIG .....	100
Figura 5.2 – O canal de São Simão, antes da construção da barragem de São Simão.....	100

Figura 5.3 – Arranjo geral das estruturas da UHE São Simão.....	103
Figura 5.4 – Vista geral da UHE São Simão .....	104
Figura 5.5 – Barragem de terra da margem direita – BTMD.....	105
Figura 5.6 - Vista da barragem de terra da margem direita (época da construção) .....	105
Figura 5.7 – Vista parcial do espaldar da barragem de terra da margem direita.....	106
Figura 5.8 – Seção típica da BTMD – seção 5 – Estaca 1 + 240,0.....	106
Figura 5.9 – Seção típica da zona de transição nº 1 – seção 6 – Estaca 1 + 440,0.....	107
Figura 5.10 – Vista parcial a jusante da margem esquerda da barragem de terra.....	107
Figura 5.11 – Barragem de terra da margem esquerda – BTME .....	108
Figura 5.12 – Vista aérea da barragem da margem esquerda e ensecadeira a montante.....	108
Figura 5.13 – Seção típica da BTME – seção 5 – Estaca 2 + 780,0 .....	109
Figura 5.14 – Barragem de terra e enrocamento no leito do rio (margem esquerda).....	109
Figura 5.15 – Vista parcial da transição nº 2 e barragem de enrocamento .....	110
Figura 5.16 – Seção típica da barragem de terra e enrocamento – Estaca 2 + 410,0.....	110
Figura 5.17 – Seção típica da transição nº 2 – seção 9 – Estaca 2 + 016,0.....	111
Figura 5.18 – Materiais de granulometria diferenciada, aplicados na construção do maciço.....	111
Figura 5.19 – Preparação da rocha de fundação no leito do rio com jatos de água e ar .....	122
Figura 5.20 – Preparo de fundação no canal do leito do rio .....	123
Figura 5.21 – Perfil longitudinal da fundação da barragem direita .....	123
Figura 5.22 – Perfil longitudinal da barragem esquerda.....	123
Figura 5.23 – Medidor de vazão VV-005 (margem esquerda) .....	125
Figura 5.24 – Medidor de vazão VV-006 (margem esquerda) .....	125
Figura 5.25 – Medidores de vazão (VV001 – VV002) – Barragem de terra da margem direita .....	126
Figura 5.26 – Medidores de vazão (VV004 – VV005 – água de surgências e VV006 – água percolada pela barragem) – Barragem de terra da margem esquerda.....	126
Figura 5.27 – Medidores de vazão (VV010 – VV013) – Barragem de terra da margem esquerda .....	127
Figura 5.28 – Detalhe da obra de tratamento de surgências com canaletas de drenagem .....	128
Figura 5.29 – Tratamento de surgências com canaletas de drenagem em espinha de peixe.....	128
Figura 5.30 – Planta da instrumentação instalada na barragem de terra da margem direita (BD) da UHE São Simão. ....	131

Figura 5.31 – Planta da instrumentação instalada na barragem de terra e na barragem de terra e enrocamento da margem esquerda da UHE São Simão .....	132
Figuras 5.32 – Piezômetro casa grande modificado PC-501 .....	138
Figura 5.33 – Registros típicos das leituras dos piezômetros instalados na BTMD – seção 3 – Estaca 0 + 810. ....	139
Figura 5.34 – Barragem de terra da margem direita – seção 3 – Estaca 0 + 810 m.....	139
Figura 5.35 – Registros típicos de poropressões na BTMD seção 1 – Estaca 0 + 460 .....	140
Figura 5.36 – Barragem de terra da margem direita – seção 6 – Estaca 1 + 440,0 m.....	140
Figura 5.37 – Seção 1 – barragem de terra da margem esquerda – Estaca 3 + 160 m.....	142
Figuras 5.38 - Leitura de piezômetros hidráulicos PHs (margem esquerda) .....	142
Figura 5.39 – Quadro de piezômetros hidráulicos PHs .....	142
Figura 5.40 – Registros típicos das leituras dos piezômetros pneumáticos instalados na BTME – seção 1 – Estaca 3 + 160 m.....	143
Figura 5.41 – Registros típicos de leituras de poropressões – BTME seção 1 – Est. 3+160 m.....	143
Figura 5.42 – Limpeza de rocha da fundação com jato de água.....	147
Figura 6.1 – Fundação em basalto com intemperismo esferoidal (época da construção).....	162
Figura 6.2 – Diagrama de influência para ocorrência de <i>piping</i> através do barramento nas barragens de terra da UHE – São Simão .....	164
Figura 6.3 – Árvore de Eventos – <i>piping</i> através do barramento .....	165
Figura 6.4 – Diagrama de influência para ocorrência de <i>piping</i> através da fundação nas barragens de terra da UHE – São Simão .....	166
Figura 6.5 – Árvore de Eventos – <i>piping</i> através da fundação nas barragens de terra da UHE – São Simão .....	167
Figura 6.6 – Diagrama de influência para ocorrência de <i>piping</i> através do barramento para a fundação nas barragens de terra da UHE São Simão.....	168
Figura 6.7 – Árvore de Eventos – <i>piping</i> do barramento para fundação nas barragens de terra da UHE São Simão .....	169
Figura 7.1 – Representação de causas no processo de <i>piping</i> .....	175
Figura 7.2 – Representação do cenário de avaliação de <i>piping</i> em laboratório e em campo.....	175

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Estatística de rupturas em 13% de grandes barragens até 1982.....	1
Tabela 3.1 – Acidentes por <i>piping</i> em barragens brasileiras até 1989.....	14
Tabela 3.2 – Número de grandes barragens que compõem o banco de dados.....	26
Tabela 3.3 – Altura de barragens, exceto dados da China (ICOLD, 1984).....	28
Tabela 3.4 – Distribuição de seções típicas em grandes barragens construídas até 1982.....	29
Tabela 3.5 – Número de barragens com geologia da fundação conhecida.....	30
Tabela 3.6 – Número de barragens da amostra com origem conhecida dos materiais aplicados no núcleo.....	30
Tabela 3.7 – Origem geológica de materiais aplicados no núcleo.....	31
Tabela 3.8 – Tipo de <i>cutoff</i> usado nas barragens da amostra.....	32
Tabela 3.9 – Estatística de rupturas antes e após 1950 em grandes barragens.....	33
Tabela 3.10 – Idade média de barragens em operação por tipo de seção até 1986.....	35
Tabela 3.11 – Tempo de incidentes após a construção – <i>piping</i> através do barramento.....	37
Tabela 3.12 – Influência de tubulações na formação de <i>piping</i> através do barramento.....	38
Tabela 3.13 – Incidência de <i>piping</i> através da fundação.....	40
Tabela 3.14 – Estatística de incidentes por <i>piping</i> com a presença de filtros na fundação.....	41
Tabela 3.15 – Tipo de geologia do solo em incidentes por <i>piping</i> .....	42
Tabela 3.16 – Geologia de rochas com casos de incidentes através da rocha da fundação.....	42
Tabela 3.17 – Tempo de ocorrência de incidente após a construção.....	43
Tabela 3.18 – Incidência de rupturas e acidentes por <i>piping</i> do barramento para a fundação.....	44
Tabela 3.19 – Características de <i>cutoff</i> na fundação em incidentes na fundação em rocha.....	45
Tabela 3.20 – Tempo de ocorrência de incidentes após a construção.....	46
Tabela 3.21 – Esquema de mapeamento de probabilidades.....	70
Tabela 4.1 – Descrições de incertezas.....	98
Tabela 5.1 – Probabilidade média de ruptura em barragens pelo modo de <i>piping</i> , em função do tipo da seção.....	113
Tabela 5.2 – Estatística de aplicação de filtros em grandes barragens.....	115
Tabela 5.3 – Estatística de tipos de solo usados em núcleos de barragens.....	116
Tabela 5.4 – Fatores de pesos em relação à origem geológica, de acordo com a classificação de solo unificada (Unified Soil Classification - USC) e materiais aplicados no núcleo, em proporções de rupturas e acidentes através do barramento e do barramento para a fundação. $W_{E(cgo)}$ , $W_{E(cst)}$ , $W_{EF(cgo)}$ , $W_{EF(cst)}$ .....	117
Tabela 5.5 – Permeabilidade <i>in situ</i> , método USBR, zonas 5 e 8A das seções.....	119
Tabela 5.6 – Fatores de pesos para compactação do núcleo – <i>piping</i> através do barramento, $W_{E(cc)}$ .....	119
Tabela 5.7 – Fatores de peso para tubulações ou condutos através do barramento – <i>piping</i> através do barramento, $W_{E(con)}$ .....	120
Tabela 5.8 - Fator de peso em tratamento da fundação - <i>piping</i> através do barramento, $W_{E(ft)}$ .....	124
Tabela 5.9 – Valores de vazões nas barragens da UHE são simão.....	125
Tabela 5.10 – Fatores de peso para observações de percolação - <i>piping</i> através do barramento, $W_{E(obs)}$ .....	129
Tabela 5.11 – Instrumentação nas barragens de terra, terra e enrocamento e transições.....	130
Tabela 5.12 – Resumo de fatores de pesos para <i>piping</i> através do barramento.....	133



Tabela 5.13 - Fatores de pesos para filtros na fundação – <i>piping</i> através da fundação, $W_{F(filt)}$ .....	134
Tabela 5.14 – Fatores de pesos para tipo de fundação abaixo do <i>cutoff</i> - <i>piping</i> através da fundação, $W_{F(fnd)}$ ...	136
Tabela 5.15 – Leituras de piezômetros, 24.09.79 e 18.03.05, NA 401,0m.....	141
Tabela 5.16 – Resumo de fatores de pesos para <i>piping</i> através da fundação.....	145
Tabela 5.17 – Fatores de pesos para fundação e detalhes de <i>cutoff</i> - <i>piping</i> do barramento para a fundação. ....	148
Tabela 5.18 – Fatores de pesos para tipos de geologia – <i>piping</i> do barramento para fundação, $W_{EF(sg)}$ $W_{EF(rg)}$ ..	149
Tabela 5.19 – Resumo de fatores de pesos para <i>piping</i> do barramento para a fundação.....	152
Tabela 5.20 – Probabilidade anual de ruptura por <i>piping</i> nas barragens UHE – São Simão (UNSW).....	153
Tabela 5.21 – Resumo de fatores de pesos para ruptura por <i>piping</i> através do barramento.....	154
Tabela 5.22 – Resumo de fatores de pesos para ruptura por <i>piping</i> através da fundação.....	155
Tabela 5.23 – Resumo dos fatores de peso para acidentes e rupturas por <i>piping</i> do barramento para a fundação. .....	156
Tabela 6.1 – Probabilidade anual de ruptura por <i>piping</i> nas barragens UHE – São Simão.....	163
Tabela 7.1 – Resultado de avaliação de segurança das barragens de terra – São Simão.....	173
Tabela 7.2 – Probabilidade de ruptura anual para barragens, baseada em registros históricos.....	173
Tabela 7.3 – Frequência de rupturas por período de construção.....	174
Tabela 7.4 – Frequência média de rupturas em grandes barragens.....	174

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ANCOLD	Australian Committee on Large Dams
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AS/NZS	Standards Australia and Standards New Zealand
BC Hydro	British Columbia Hydroelectric and Power Corporation
BTMD	Barragem de terra da margem direita
BTME	Barragem de terra da margem esquerda
CCA	Common Cause Adjustment
CCR	Concreto compactado a rolo
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CL	Clay low (argila de baixa plasticidade)
CNSB	Conselho Nacional de Segurança de Barragens
ERDATA1	Banco dados da estatística de incidentes com barragens
ETA	Event Tree Analysis
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FMECA	Failure Mode, Effect and Critically Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
GA/SM	Gerência de Segurança de Barragens e Manutenção Civil
HAZOP	Hazard and Operability Analysis
ICOLD	International Commission on Large Dams
IJHD	International Journal of Hydropower and Dams
K	Condutividade hidráulica em meio poroso
$K_h$	Condutividade hidráulica horizontal
$K_v$	Condutividade hidráulica vertical
N.A.	Nível d'água
PAE	Plano de Ações Emergenciais
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
s	Saturação
SANEAGO	Companhia de Saneamento de Goiás S/A
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UHE	Usina Hidrelétrica
UK	Reino Unido
UNSW	University of New South Wales
USACE	United States Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
USCOLD	United States Committee on Large Dams
$\psi$	Sucção em meio poroso

# 1 INTRODUÇÃO

Até a década de 1960, o enfoque dado a projetos e construção de barragens de terra e enrocamento não levava em consideração informações de eventuais problemas e suas respectivas causas em obras similares. Entretanto, com a crescente experiência dos engenheiros e com problemas ocorridos durante e após a conclusão dessas obras, passou-se a valorizar a etapa de projeto e estudos de retroanálise. Esses problemas muitas vezes assumem a proporção de acidentes, culminando com a ruptura da barragem, com situações catastróficas que provocam enormes impactos ambientais.

Entre os possíveis modos de ruptura de uma barragem de terra, podem-se destacar dois casos específicos devido à atuação da água: entubamento (*piping*) e galgamento (*overtopping*). A ruptura pelo entubamento (*piping*) ocorre por erosão regressiva de jusante para montante, formando um tubo (*piping*), com carreamento de partículas de solo pelo maciço, devido ao fluxo de água descontrolado de montante para jusante. Nesse cenário, ocorre deslocamento de partículas do barramento que desestabiliza o equilíbrio de forças na matriz do solo e o respectivo estado de tensões no maciço por onde ocorre esse fluxo. O fenômeno é progressivo até a formação de brecha e colapso da estrutura.

Conforme Seddon (2000), em estatística do ICOLD – International Commission on Large Dams (1998) e IJHD – International Journal of Hydropower and Dams (2000) levantada em 140 países, o Brasil contava com 594 barragens, enquanto China estava em torno de 22.000; EUA, 6.575; Índia, 4.291; Japão, 5.675; Espanha 1.196 barragens, entre outros. Os números ressaltam a importância da segurança em obras de barragem no contexto econômico mundial.

Foster *et al.* (2000a) ressaltam que a ruptura por *piping* é a que tem maior frequência, como mostra a Tabela 1.1, sobre a estatística de rupturas em 1.462 grandes barragens.

**Tabela 1.1** – Estatística de rupturas em 13% de grandes barragens até 1982

Modo de ruptura	% do total de rupturas
<i>Piping</i> através do barramento	31
<i>Piping</i> através da fundação	15
<i>Piping</i> do barramento para a fundação	2
Instabilidade de talude	4
<i>Overtopping</i>	46
Abalo sísmico	2

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998 *apud* Foster, 2000a, p.1025.

Observa-se pela Tabela 1.1 que 48% das rupturas envolvem o fenômeno de *piping*, das quais cerca de 42% ocorrem no primeiro enchimento, e 66% no período dos cinco primeiros anos de operação (FOSTER *et al.*, 1998). Dentro desse contexto, esta dissertação apresenta os estudos de vulnerabilidade e segurança em maciço de barragem, com enfoque probabilístico. O método de análise de segurança com enfoque probabilístico usado para avaliar a possibilidade de ruptura de barragem por *piping* foi denominado ETA (do acrônimo em inglês Event Tree Analysis ou Análise por Árvore de Eventos) sendo também aplicado outro método chamado de UNSW (University of New South Wales), que foi desenvolvido na referida Universidade, em Sydney, Austrália.

A dissertação tem enfoque na avaliação da vulnerabilidade em barragem de terra, pelo fenômeno de erosão regressiva, com formação de entubamento (*piping*). Os capítulos estão organizados na seguinte sequência de assuntos.

No capítulo 1, **Introdução**, é abordado todo o conteúdo desta dissertação, com explicação sucinta sobre cada capítulo.

No capítulo 2, **Objetivos**, são descritos o objetivo geral e objetivos específicos que nortearam a realização da pesquisa e a condução da aplicação de métodos de avaliação de segurança em barragem de terra.

No capítulo 3, **Revisão da Literatura**, apresentam-se conceitos sobre o fenômeno da erosão regressiva (*piping*) sob o enfoque geotécnico. Logo a seguir, são destacados alguns acidentes que ocorreram por esse fenômeno em abrangência nacional e internacional. A ênfase é sobre os impactos ambientais negativos que uma ruptura de barragem provoca a jusante do reservatório de água.

A análise de segurança de maciço de barragem está inserido no conceito de avaliação de risco. Nesse sentido, esta dissertação procurou enfatizar a importância das etapas necessárias à avaliação de risco e sua importância no contexto legal e normativo. Como a diretriz adotada na pesquisa foi restrita à avaliação de vulnerabilidade do maciço da barragem, fez-se necessário fundamentar o conceito de avaliação de segurança com base em dados estatísticos. Esses dados foram analisados, a partir de pesquisa realizada pela University of New South Wales, Sydney, Austrália. A seguir, a revisão bibliográfica procurou mostrar vários métodos disponíveis para a avaliação de segurança. A opção de escolha de método qualitativo de avaliação de segurança foi baseada nas informações de Fell *et al.* (2000), que argumentam

sobre o cuidado na quantificação de probabilidades que, em geral, são muito pequenas. Essas probabilidades são difíceis de serem determinadas pelo estado da arte da engenharia atual. Assim, quando há dificuldade em definir a função densidade de probabilidade, é melhor estimar a frequência de rupturas pela descrição qualitativa, do que probabilidades absolutas; isso é adequado para priorizar medidas de redução de risco. Portanto, para fundamentar a aplicação dos métodos adotados foram demonstrados o aspecto teórico envolvido na construção da Árvore de Eventos e a respectiva fundamentação sobre o uso de probabilidades condicionais, usadas para estimar a vulnerabilidade do sistema. Por fim, o capítulo mostra alguns exemplos de aplicação do método de avaliação pelo uso de Árvore de Eventos.

No capítulo 4, **Metodologia**, é apresentada a seqüência de etapas necessárias à avaliação de segurança de barramento por meio dos métodos de Árvore de Eventos e performance histórica (análise estatística), tal como aplicados ao maciço da barragem em estudo. Há uma explicação sobre como foram estimadas as probabilidades e um alerta sobre as limitações relativas ao uso do método. Nesse capítulo ressalta-se que os eventos de ruptura de barragens são postos como funções de uma infinidade de variáveis de difícil mensuração, explicando por que a análise determinística pura é sujeita ao erro nas respostas aos fatores causais (entradas), sendo necessário considerar fatores probabilísticos. Esta dissertação usou a análise qualitativa de probabilidades, pois o uso dessa técnica em avaliação de riscos aplicados ao gerenciamento de segurança de barragem está se desenvolvendo rapidamente, particularmente nos EUA, Austrália, Canadá, Noruega e Reino Unido. Dentro dessa visão, fez-se uso aqui do método desenvolvido por Foster *et al.* (1998) e Foster e Fell (1999) para estimar a probabilidade relativa de ruptura por *piping*, método que tem sido usado na Austrália para avaliar o risco de ruptura de barragens, cuja base é a lógica ETA (Análise por Árvore de Eventos).

O método de performance histórica foi aplicado, além da Árvore de Eventos, para avaliação do risco de ruptura de uma barragem pela formação de *piping*, desenvolvido por Foster, *et al.* (1998), na University of New South Wales, Sydney, Austrália, denominado método UNSW. O capítulo cita alguns exemplos de aplicação desse método e explica que o uso da Árvore de Eventos tem sido adotado como estudo preliminar para avaliar o início de formação de *piping*, assim como possível ruptura e ações de intervenção.

No capítulo 5, **Aplicação do Método UNSW**, estudou-se o maciço da barragem de São Simão, Minas Gerais, Brasil. Essa barragem foi projetada pelas empresas IESA/IECO (consórcio CIE), construída pelo consórcio Impregilo/C.R. Almeida e desde então operada

pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). O capítulo retrata todo o estudo de dados obtidos por documentos de projeto, construção e operação da barragem. O método envolveu a recuperação de informações de projeto, fatores condicionantes geológicos do local, método construtivo e de controle de qualidade da obra, monitoramento de parâmetros geotécnicos e relatórios de supervisão da obra durante os anos de operação. Descreve-se a avaliação de vulnerabilidade do maciço no cenário de risco de ruptura por *piping* em pontos diferentes da barragem: no barramento, na fundação e do barramento para a fundação.

No capítulo 6, **Avaliação da segurança da barragem São Simão por Árvore de Eventos**, são relatados os motivos que levaram à elaboração de diagramas de influência e como foram elaboradas as árvores de eventos. As árvores de eventos são mostradas nesse capítulo com as respectivas estimativas de probabilidades em cada ramo e também o resultado das probabilidades marginais de possível ocorrência de *piping* pelo barramento, pela fundação e do barramento para a fundação.

O método de análise por Árvore de Eventos foi adotado por identificar, para cada subsistema em análise, os acontecimentos iniciadores que podem conduzir a rupturas que comprometam a segurança de toda a barragem. Dados históricos de barragens foram confrontados com as características da barragem em avaliação, para melhor ajustar a Árvore de Eventos e combinar devidamente as probabilidades dependentes que contribuem para a probabilidade total de ocorrência de *piping*. As respostas foram verificadas pelo método de performance histórica, e revisões foram realizadas.

No capítulo 7, **Conclusões e recomendações**, os resultados de ambos os métodos foram confrontados, e análises conclusivas sobre os principais pontos vulneráveis da barragem foram ressaltados, descrevendo as razões das diferenças e as recomendações para outras pesquisas.

Esta dissertação enfoca ações preventivas que podem ser desenvolvidas para evitar impactos ambientais decorrentes de acidentes de ruptura por *piping* em barragens, com base nos resultados de probabilidade anual de ruptura. Além disso, vale dizer que a gestão de risco em barragem está por ser regulamentada no Brasil por Projeto de Lei 1.181/2003, estando essa pesquisa alinhada com o cenário nacional da Política Nacional de Segurança de Barragens.

## 2 OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo geral avaliar a probabilidade de ruptura de barragem de terra por *piping*, procurando identificar pontos específicos que mereçam mais atenção e ações de prevenção para evitar impactos ambientais decorrentes desta ruptura. Para atender a esse objetivo, aplicaram-se ferramentas de análise qualitativa na avaliação de segurança da barragem em estudo.

Essa pesquisa foi direcionada para esclarecer os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a probabilidade de ocorrência de *piping* em maciço de terra, associado às características geológicas da fundação, materiais e métodos construtivos aplicados e monitoramento executado na barragem,
- Avaliar a probabilidade qualitativa de ocorrência de *piping* por três modos: *piping* através do barramento, *piping* através da fundação e *piping* do barramento para a fundação, pelo método de performance histórica, denominado UNSW (University of New South Wales),
- Avaliar a probabilidade de ocorrência de *piping* pela aplicação do método de Análise por Árvore de Eventos – ETA (Event Tree Analysis) em uma grande barragem.

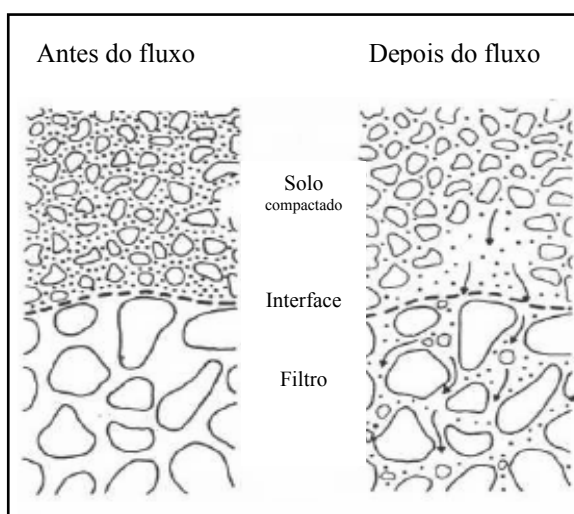
### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são apresentados conceitos geotécnicos relacionados ao fenômeno de erosão regressiva, que se desenvolve na forma de um tubo (*pipe*). A seguir, são apresentadas as estatísticas de ocorrências de rupturas e acidentes pelo fenômeno de *piping*. Essas estatísticas foram levantadas por Foster *et al.* (1998) e compõem parte do banco de dados que fundamentam os fatores de pesos apresentados e aplicados no capítulo 5. Além do tratamento estatístico dos dados, o capítulo mostra vários métodos para avaliação de riscos em barragens, inclusive com dois exemplos de aplicação do método de Árvore de Eventos.

#### 3.1 Erosão interna

A pesquisa objeto desta dissertação foi direcionada para a avaliação da vulnerabilidade de barramento construído em terra e sujeito a falhas. Em especial o enfoque é a falha por erosão interna e seu progresso até formar um tubo de escoamento preferencial, denominado entubamento, conhecido internacionalmente por *piping*. A falha por *piping* é um fenômeno que ocorre por erosão regressiva, onde há formação de um tubo, originado do carreamento de grumos de silte e argila, de jusante para montante no maciço de terra compactada em uma barragem. Esse tubo tende a aumentar seu diâmetro à medida que a água percola pelo solo compactado. O termo sufusão (*suffusion*) refere-se ao início da erosão regressiva em que ocorrem falhas concentradas no maciço, havendo migração interna de grãos finos pelo fluxo de descarga através de solos instáveis.

A Figura 3.1, a seguir, demonstra esquematicamente o processo de formação de *piping*.



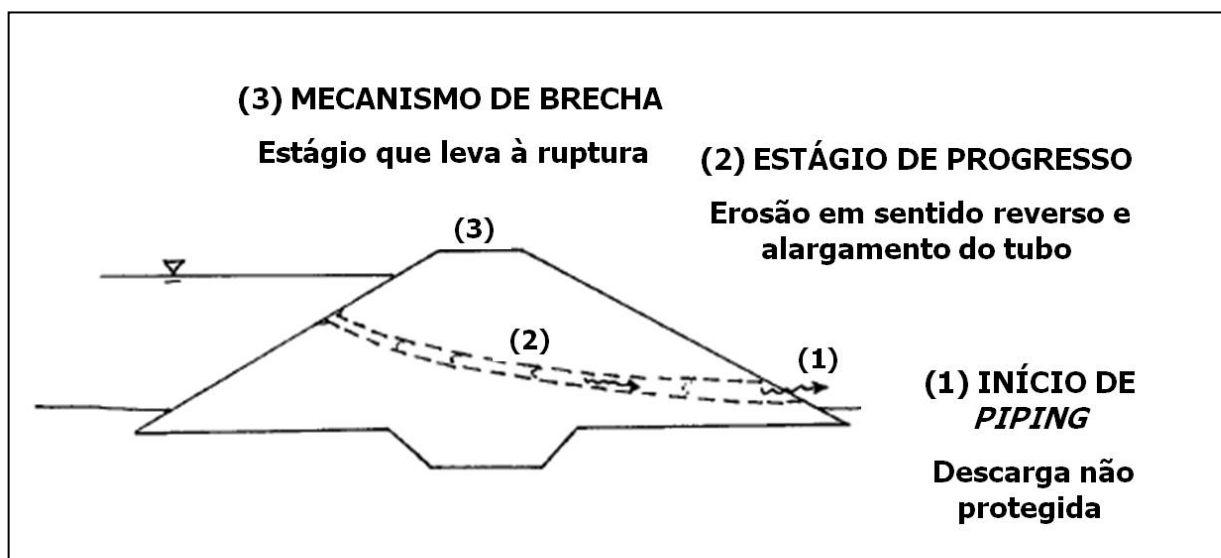
**Figura 3.1** – Mecanismo de formação de *piping*

Fonte: Modificado de RAMOS, 2005, p.4.



Fatores determinantes como o grau de compactação do solo, a adequada graduação no tamanho das partículas de materiais nas áreas de transição de materiais com granulometria diferente e o adequado monitoramento de parâmetros geotécnicos são importantes para evitar o processo de formação de *piping*, como mostrado na Figura 3.1.

A Figura 3.2 mostra o mecanismo de progresso da erosão regressiva, passando à formação de entubamento concentrado no maciço até o progresso e o alargamento na forma de brecha, com conseqüente ruptura da crista e vertimento de toda a água do reservatório.



**Figura 3.2** – Estágios de desenvolvimento de ruptura por *piping*

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, 16p.

O entendimento do processo de progresso do entubamento (*piping*) é fundamental para a avaliação de formação da erosão regressiva tubular em barragens de terra. O escoamento da água em meios porosos é regido por parâmetros físicos que se relacionam em modelo determinístico. Um dos fatores que favorecem a desorganização das linhas de fluxo em sua direção, sentido e velocidade e, conseqüentemente, o início de formação da erosão regressiva, é o aumento de poropressões. Portanto, é fundamental conhecer quais condições favorecem o aumento de poropressões e, conseqüentemente, o desequilíbrio no estado de tensões na matriz do solo.

O regime de fluxo é governado pela condutividade hidráulica no meio poroso,  $K$ , que por sua vez é função da sucção,  $\psi$ . Como a sucção,  $\psi$ , é função da saturação,  $s$ , ou seja,  $\psi(s)$ , conseqüentemente a condutividade hidráulica é também função da saturação  $K(s)$ . Isso pode ser afirmado, pois, quanto maior a sucção, menor a condutividade hidráulica; logo restarão somente os espaços onde os raios de curvatura da matriz do solo são bem pequenos, dificultando o fluxo do líquido no meio poroso.

Portanto, o sentido e a velocidade do fluxo de um líquido em um meio poroso dependem do grau de saturação e da sucção, que é função de raio de curvatura dos espaços vazios.

Cruz (1996) afirma que o fluxo em meios não saturados adquire características complexas, porque o gradiente do fluxo passa a ter dois componentes: o primeiro relativo à carga gravitacional, e o segundo relativo à carga resultante da sucção matricial. As redes de fluxo traçadas para meios homoganeamente isotrópicos não são válidas para maciços de barragens. Como a permeabilidade é variável quase que ponto a ponto, a permeabilidade da fundação é dominante no fluxo e fenômenos de alívio de tensões em cotas elevadas podem levar a estados de incipiente ruptura hidráulica, com respectiva elevação da permeabilidade horizontal.

Outra conclusão é que a rede de fluxo é formada pela relação de condutividade hidráulica horizontal e vertical ( $K_h/K_v$ ), a qual é determinada pelo estado de tensões em cada ponto do maciço.

Conclui-se que o solo selecionado e compactado no maciço de uma barragem comporta-se como um material anisotrópico e heterogêneo, havendo grandes diferenças de resultados, ao longo de distâncias relativamente pequenas.

### **3.1.1 Controle do fluxo de água**

Cruz (1996) afirma que, se valesse a diretriz “a arte de projetar uma barragem é essencialmente a arte de controlar o fluxo”, os engenheiros de projetos estariam mais próximos das obras durante a execução para levar informações a serem incorporadas aos novos projetos. Com isso, evitar-se-ia a execução de obras de drenagem adicionais, executadas às pressas.

Outro fato argumentado por Cruz (1996) é a realização de ensaios em laboratório. Por melhor que seja a representação das condições de campo, há dificuldades em representar os aspectos físicos envolvidos no maciço de uma barragem, ou seja, há dificuldade em identificar os fatores que levam os grumos do solo a se moverem pelo arraste de partículas pela água, levando em consideração os fenômenos de arqueamento, embricamento, componentes de coesão e tração, além da ação combinada das forças de percolação e da força da gravidade.

Após observações de ocorrências de acidentes de ruptura por *piping*, identificou-se que um dos pontos de fragilidade no maciço é a região dos filtros de material granular fino, onde há probabilidade de começar a erosão interna, pois, quando o nível de água neste material rebaixa-se, há formação de pequenas trincas, que pela ação do arraste de flocos ou grumos de argilas e siltes irão prejudicar a função desses filtros e, eventualmente, induzir a colmatação. Esse fato, quando confirmado, promove aumento de poropressões na região.

Em materiais coesivos, as forças de coesão e tração impedem que haja a formação de pequenas trincas pela ação do aumento da sucção. Na área de contato entre o material granular do filtro e o material selante, coesivo, não há boas condições de compactação do material coesivo. Assim, o material coesivo apresenta-se mais desagregado nessa região, possibilitando que haja arraste de material para o interior do filtro.

### **3.1.2 Aspectos geológico-geotécnicos associados à ocorrência de erosão interna**

Tschebotarioff (1978) afirma ser importante a escolha do tipo de barragem em função do local e dos materiais disponíveis para sua construção, de modo a evitar a percolação excessiva ou perigosa de água no corpo da barragem, por sua base ou em torno desta.

A estabilidade da barragem deve ser assegurada pelo conhecimento das pressões transmitidas pela barragem ao solo subjacente, evitando-se a indução de rupturas por cisalhamento, ou recalques, e deformações excessivas que possam comprometer a sua estrutura nas fases de construção, uso e eventual rebaixamento do nível d'água do reservatório.

Portanto, a geologia do material de base disponível já norteia o tipo de barragem, pois barragens de concreto necessitam de fundação em material resistente e impermeável, ou seja, sobre rocha sã.

Quando há material na fundação com permeabilidade favorável e grande área disponível, sugere-se a possibilidade de construção de barragem em terra compactada. Essa configuração permite a distribuição de tensões em grandes áreas na base do terreno e, devido às grandes extensões de percolação sob a barragem, há menor perigo de fluxo de água por percolação que pudessem provocar aumento das poropressões ou *piping*, ou mesmo liquefação do material. Outra característica da barragem de terra é a sua plasticidade que se acomoda às deformações do solo adjacente, o que não ocorre com o concreto.

Em vales montanhosos, onde não há disponibilidade de solo adequado, faz-se a opção por barragens de enrocamento. O enrocamento pode ser impermeabilizado a montante com face de concreto armado ou argila compactada.

### **3.1.3 Estabilidade das barragens de terra**

A estabilidade em barragens é obtida por projetos que consideram as tensões e as forças variáveis nos momentos de construção, primeiro enchimento do reservatório e rebaixamento do nível d'água. Essa oscilação provoca mudanças no estado de tensões do solo. O controle adequado das forças de percolação deve ser feito pela prévia colocação de materiais menos permeáveis a montante e no núcleo da barragem. Essa prática proporciona a dissipação das forças de percolação do interior da massa compactada até a face de jusante da barragem e impede a liquefação dos materiais, assegurando a estabilidade do maciço.

O uso de filtros vertical e horizontal nas barragens tem o propósito de controlar o nível da superfície freática. Os filtros horizontais são empregados para impedir a liquefação do solo, submetido às forças de percolação, dissipando-as até a face de jusante. Por isso, é essencial que se monitore as poropressões, através de piezômetros colocados em pontos estratégicos nas diferentes partes de uma barragem.

Outro fator a ser considerado durante a construção é a escolha de áreas de empréstimo de materiais. Essas áreas devem ser escolhidas a jusante, pois há risco de perfurar camadas impermeáveis naturais quando se utiliza zona de empréstimo a montante do eixo da barragem. Caso ocorra o rompimento de camada de solo de baixa condutividade hidráulica a montante da barragem, pode haver aumento de poropressões na fundação.

Tschebotarioff (1978) considera que os taludes menos íngremes aumentam o caminho de percolação sob a barragem, com conseqüente redução do gradiente hidráulico, havendo menores tensões ao longo das linhas de fluxo que transpassam o maciço.

O dimensionamento de vertedouros deve levar em consideração os estudos hidrológicos de precipitação máxima provável na bacia hidrográfica, pois uma das causas mais freqüentes de ruptura de barragens de terra é a falta de capacidade de essa estrutura suportar volumes afluentes de água que não foram considerados em seu dimensionamento. Isso provoca o galgamento (*overtopping*), erosão no maciço e conseqüente ruptura em barragens de terra. Portanto, os vertedouros devem ser projetados com ampla margem de segurança, para

suportar o maior volume possível de água, de acordo com a estimativa de volume de precipitação máxima provável, ou para descargas máximas com elevados tempos de retorno.

De modo geral, pode-se dizer que a instabilidade de barragens ocasionada por *piping* é decorrente dos seguintes mecanismos:

- Fluxo descontrolado de água que gera percolação nos espaços vazios do solo, reduzindo as forças de tensão superficial entre os grãos,
- geração de pressões hidrostáticas provocadas pelo preenchimento por água em fendas e trincas no solo compactado,
- formação de frentes de saturação que reduzem a resistência do solo pela perda da coesão aparente.

As prováveis causas são: falha na graduação de materiais aplicados na transição entre o filtro e o solo compactado, falta de controle tecnológico na construção do barramento, intemperismo não tratado na rocha de fundação do barramento, falta de monitoramento das poropressões no maciço e descontrole da vazão a jusante do barramento.

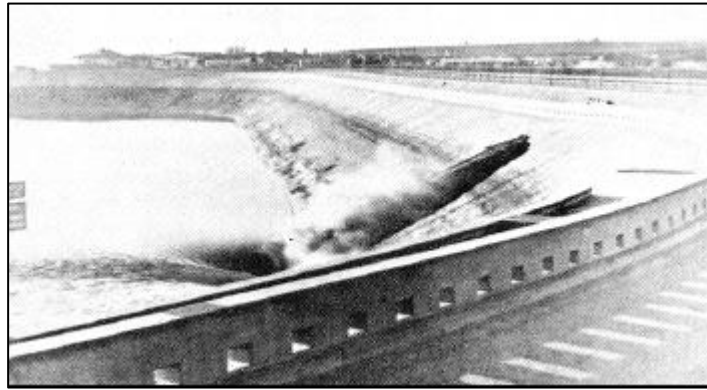
### **3.2 Acidentes em barragens**

A seguir, são apresentados alguns acidentes de rupturas em barragens, pela formação de entubamento (*piping*), em ordem cronológica de suas ocorrências, que se destacaram pela frequência com que foram citados nas publicações técnicas. Alguns acidentes da base de dados, ERDATA1 (Foster *et al.*, 1998), que compõem todas as análises são apresentados no ANEXO A desta dissertação.

#### **3.2.1.1 Barragem Baldwin Hills**

Collischonn (1997) relata que essa barragem foi construída no período de 1947 a 1951, com a função de abastecer a cidade de Los Angeles, Califórnia (EUA). O volume do reservatório era de aproximadamente 0,98 hm<sup>3</sup>. A ruptura ocorreu pelo processo de formação de *piping*, em 14 de dezembro de 1963, após 12 anos de operação. A Figura 3.3 mostra o entubamento em fase adiantada. Os fatores que levaram à erosão regressiva foram o material do maciço, em solo residual dispersivo e o aumento de descarga através da fundação do reservatório.

Graças ao sistema de alarme de deplecionamento do reservatório, as perdas de vidas e outras conseqüências foram evitadas.



**Figura 3.3** – Formação de brecha na barragem Baldwin Hills – vista de montante  
Fonte: Modificado de ICOLD, 1974 *apud* Collischonn, 1997.

### 3.2.1.2 Teton

Essa ruptura é clássica e foi amplamente registrada na literatura técnica. Segundo Rogers e Hasselmann (acesso world wide web em 2007) a barragem foi construída em terra com o objetivo de irrigar 450 km<sup>2</sup> e gerar 16.000 kW de eletricidade, com 93 m de altura, 810 m de comprimento na crista e reservatório de 356 hm<sup>3</sup>. O barramento tinha como principal material um tipo de silte, denominado loesse, que é um sedimento eólico amarelado, sem estratificação, constituído essencialmente de partículas finas de quartzo, angulosas, disseminadas em cimento argiloso, colorido de amarelo pelo óxido de ferro e que, por vezes, encerra partículas calcárias. No sistema de drenagem foram usados cascalho e areia.

A conclusão da obra foi em novembro de 1975, e o acidente desenvolveu-se rapidamente, logo após o primeiro enchimento do reservatório. No dia dois de junho de 1976, foram identificadas duas surgências na ombreira direita, com descarga de água limpa. No dia quatro de junho de 1976, houve a identificação de uma terceira surgência que culminou com o desenvolvimento da erosão regressiva até a formação de entubamento atingindo a crista e posterior formação de brecha, liberando toda a água acumulada, conforme mostra a Figura 3.4. A ruptura ocorreu no dia cinco de junho de 1976, provocou a morte de 11 pessoas, e 25.000 ficaram desabrigadas.

A formação de *piping* ocorreu por falha no tratamento da rocha na ombreira direita, formada por rocha em camadas de riolito, tufo e basalto fraturados. Apesar de muitas juntas terem sido preenchidas com pasta de cimento (*grout*), nenhum material de transição foi colocado entre o tratamento da rocha e o material de enchimento silte (*loess*) nas fendas da ombreira. O programa de tratamento em trincheira, próximo ao ponto onde iniciou a erosão regressiva, foi reduzido a uma única linha de furos, pois a aplicação de *grout* havia consumido mais que o

dobro do que havia sido previsto em projeto. Esse fator associado à diferença de grau de compactação executada em duas etapas, pela mudança de equipamento e respectiva energia de compactação, levou à hidrocompactação do material próximo a base, de mais baixo grau de compactação, com formação de vazios e fratura hidráulica entre as camadas de densidades diferentes, criando uma falha por arqueamento. Isso favoreceu a passagem de água originada de fendas inadequadamente tratadas pela aplicação de *grout*, havendo início de erosão regressiva nesse ponto frágil.



**Figura 3.4** – Formação de *piping* na barragem Teton - Rexburg, Idaho – EUA  
Fonte: Disponível em <http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton%20Dam/Teton%20Dam-Pages/Image0.html>. Acesso em: 24 de abril de 2007.

#### 3.2.1.3 Dique Quail Creek

Foster *et al.* (1998) relatam que Quail Creek era um dique no estado de Utah, EUA. A seção típica era em aterro zoneado, com 24 m de altura. Foi construído em 1984, e a ruptura ocorreu em 1988.

A ruptura ocorreu por descarga através da fundação em rocha fraturada, levando à formação de *piping* do barramento para a fundação, pois as irregularidades da fundação foram preenchidas por material erodível. A brecha formou-se pelo processo de erosão regressiva, havendo perda de 50 casas, 100 apartamentos, estragos em um gasoduto e danos em uma pequena barragem.

A seguir, são apresentados alguns acidentes em barragens brasileiras, organizados de forma resumida na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** – Acidentes por *piping* em barragens brasileiras até 1989

Nome da barragem	Altura (m)	Tipo de seção	Conclusão da obra	Acidente (ano)	Descrição do acidente
Ema	18	Não informado	1932	1940	Houve <i>piping</i> através do barramento e deslizamento do talude de jusante.
Pampulha (Figura 3.5)	18	Solo com face de concreto	1941	1954	Alguma descarga de água havia sido observada e descrita como não alarmante, por estar com volume estável. Houve aumento dessa descarga após quatro dias, e a água ficou com aspecto turvo. O entubamento desenvolveu-se pela descarga de água entre o tubo de drenagem e a laje de concreto até desenvolver a brecha.
Caldeirão	22	Solo homogêneo	1947	1957	Dez anos após o primeiro enchimento, foi observada descarga de água de aspecto turvo, quando o reservatório estava em seu nível máximo. Alguns dias depois, foi observada erosão de material pela fundação. A erosão foi paralisada pela aplicação de <i>grout</i> .

Fonte: Modificado de FOSTER *et. al.*, 1998 - Anexo B.



**Figura 3.5** – Formação de *piping* na barragem da Pampulha, Belo Horizonte - MG



O relato desses acidentes reforça a necessidade do conhecimento de informações sobre acidentes ocorridos, para evitar o mesmo tipo de falha e assegurar a integridade do conjunto de estruturas da barragem. O ANEXO A (Foster *et al.*, 1998) apresenta vários acidentes ocorridos no mundo e que serviram de base nas comparações apresentadas no capítulo 5.

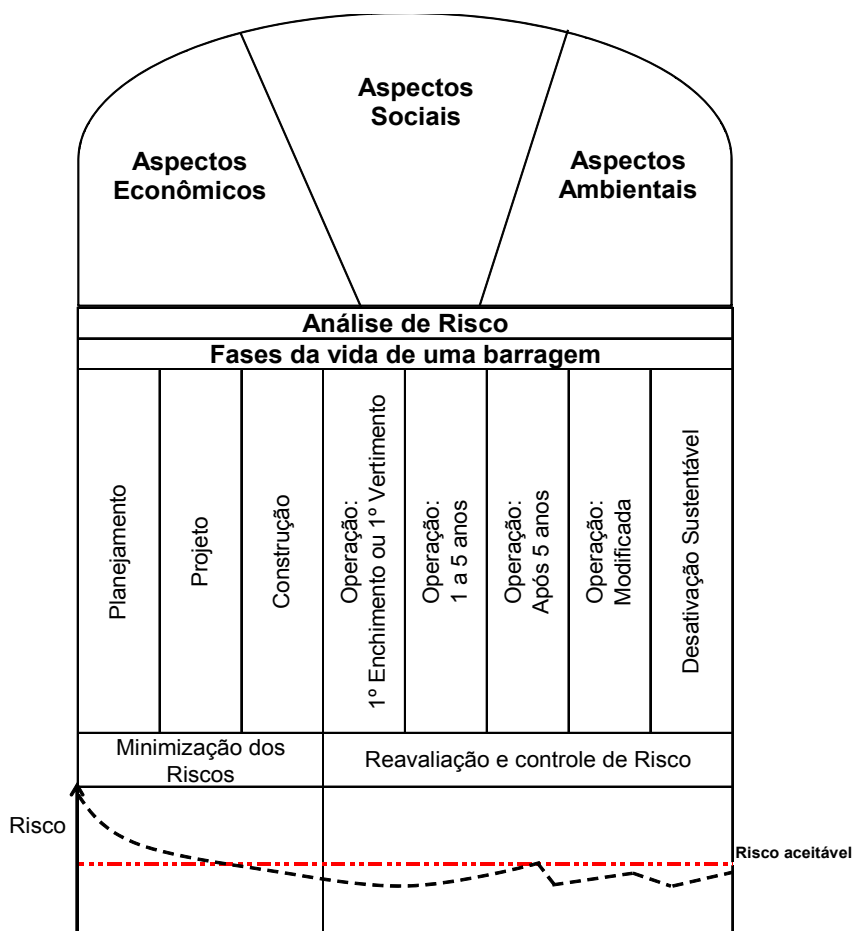
### **3.3 Gestão de riscos**

Menescal (2004) relata a importância de se reconhecerem as ameaças aos empreendimentos, através de metodologia de análise de risco. As metodologias de análise de risco não são determinísticas, trabalham com cenários de incertezas nas diversas fases da vida de uma barragem. Essas incertezas estão associadas a ameaças que, se puderem ser quantificadas, estarão aptas a serem gerenciadas por análise de risco.

As incertezas podem ser tratadas de diversas formas, dependendo da fonte de sua origem. Kreuzer (2000) *apud* Menescal (2004) afirma que as incertezas estão presentes nos momentos de decisões e podem ser originadas e tratadas de diversas formas. Esse autor afirma que os engenheiros tendem a medir incertezas, mas a forma correta é restringir as incertezas pelo aumento da confiança na atribuição de probabilidades dos possíveis eventos, havendo melhor estimativa de conseqüências e quantificação de impactos sociais e ambientais.

Em um empreendimento de barragem, o gerenciamento compreende todas as fases da vida da obra, desde o projeto até a desativação sustentável. A Figura 3.6 ilustra as fases de análise de risco envolvidas ao longo do tempo. Na parte inferior da Figura 3.6, observa-se que o risco é reduzido nas primeiras fases de planejamento, projeto e construção. Após o primeiro enchimento, o risco é controlado por reavaliações e intervenções, necessárias por toda a vida da barragem, até a desativação sustentável. Essas análises de risco devem abranger sistemas ambientais, de segurança, social e aspectos econômicos.

Viotti (1999) *apud* Menescal (2004) observa que a forma correta de se conceberem projetos é a partir da perspectiva geral com a qual se definem as partes individuais, componentes do sistema. Muitos projetistas enfatizam juntar as partes individuais para compor o sistema em geral. Essa pode ser a causa da necessidade de obras emergenciais no transcorrer da obra e durante o primeiro enchimento do reservatório.

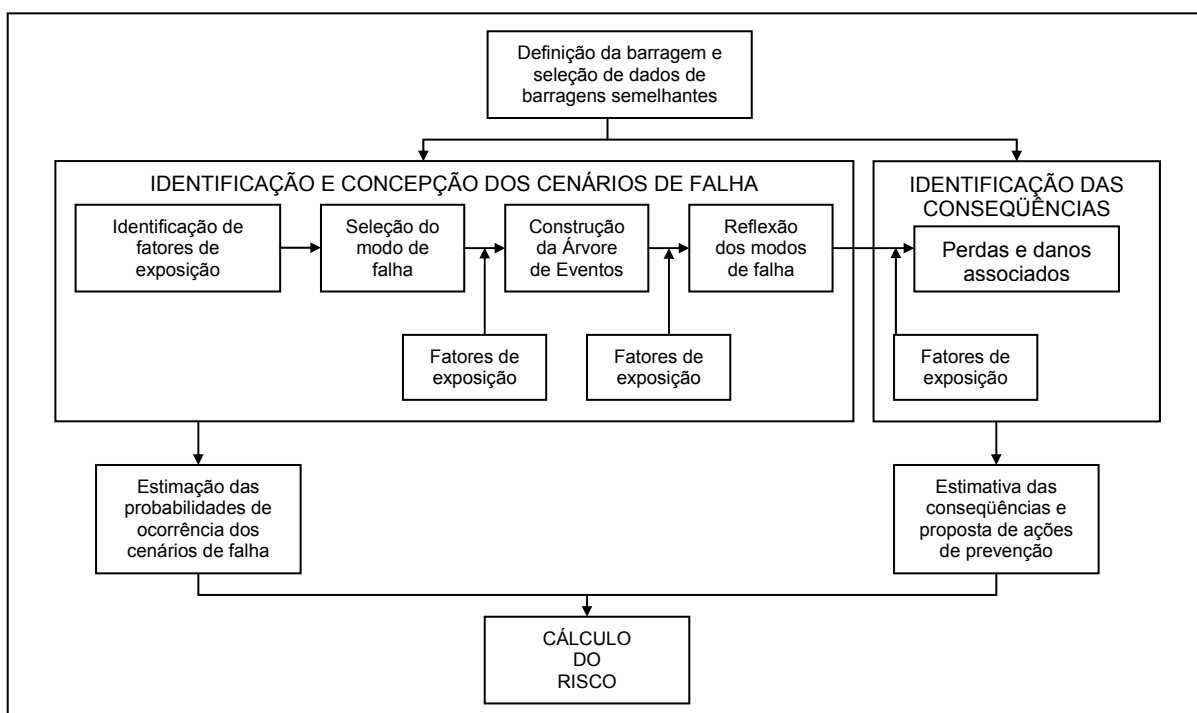


**Figura 3.6** – Evolução do risco nas diversas fases da vida de uma barragem  
 Fonte: Modificado de MENESCAL, 2004, p.21.

A gestão de riscos é uma ferramenta fundamental nas ações de prevenção, devendo ser rápida na predição e sempre atualizada. Segundo Gomes *et al.* (2005), a avaliação do risco deve começar pelo estudo de modos de falhas para estimar as probabilidades e conseqüências associadas a cada um dos riscos identificados.

Em sistemas complexos, como é o caso das barragens, devem-se identificar as possíveis sucessões de acontecimentos iniciadores, os modos de ruptura, as respostas e os resultados nos subsistemas e no sistema, assim como as conseqüências que lhes estão associadas, levando em consideração os vários fatores de exposição intervenientes e as respectivas probabilidades.

A Figura 3.7 apresenta as principais etapas na avaliação de risco.



**Figura 3.7 – Análise de riscos. Fluxograma das principais atividades**

Fonte: Modificado de GOMES *et al.*, 2005, Anexo III, p.4.

O cumprimento dessas etapas é fundamental nas ações de prevenção e gerenciamento de riscos. Na gestão de riscos, um dos fatores a ser considerado é o contínuo monitoramento do maciço, pois é necessária a análise de dados para prever a segurança da obra.

A análise de dados constitui a primeira etapa da fase da avaliação, processo que se desenvolve com a apreciação de informações e, em conjunto com o controle, compreende uma das etapas fundamentais da gestão de riscos. Essa análise deve compreender a identificação de fatores de vulnerabilidade no sistema, o estudo de modos de falhas que podem materializar-se, a estimativa de probabilidades dessa materialização e consequências associadas a cada um dos riscos identificados.

O propósito da avaliação de risco é determinado por muitos aspectos, incluindo tipo, nível e rigor. Alguns propósitos de estudos de avaliação de risco são:

- modelar o risco para um portfólio de barragens,
- assinalar prioridades para investigações sobre a segurança de barragens,
- ajudar na avaliação da segurança de uma barragem existente,
- ajudar na decisão sobre o nível de segurança requerido para uma barragem,
- avaliar opções de redução de risco,
- assinalar prioridades para um programa de ações remediadoras,
- auxiliar na decisão sobre os níveis de segurança para barragens em análise,
- apoiar as decisões sobre ações preventivas em segurança durante a construção de uma barragem,

- formar requisitos de operações e manutenção de barragens,
- determinar procedimentos de gerenciamento de situações de emergência,
- compor um programa de monitoramento e supervisão,
- estabelecer necessidades de garantia de qualidade e treinamento de pessoal (CUMMINS *et al.*, 2003, p.55).

Nesse contexto, Fusaro (2003) apresenta uma metodologia para classificação de barragens baseada nos conceitos de risco, para que a avaliação da vulnerabilidade não seja tão subjetiva. Além da estimativa da vulnerabilidade, Fusaro (2003) descreve o método pelo uso de cinco tabelas que orientam a escolha de índices para compor o cálculo de risco. Essas tabelas são: índices para cálculo da consequência (C), que levam em consideração a capacidade de geração, volume do reservatório e tipo de ocupação das áreas a jusante; índices para cálculo da condição atual das estruturas ( $V_M$ ), baseados em gravidade e urgências; itens de projeto usados na concepção da obra comparados a critérios atualmente recomendados para estruturas de terra, estruturas de concreto e extravasores que definem uma escala de aproximação do projeto usado em relação às recomendações atuais ( $V_P$ ), além do potencial de risco (P), que considera o tipo de barragem, tipo de fundação e idade da obra. Esses dados são adequadamente arranjados de acordo com a Equação 3.1:

$$\text{RISCO} = [P + (V_M + V_P)] \times C \quad (3.1)$$

Onde P é o potencial de risco, V é a vulnerabilidade e C, a estimativa de danos em uma eventual ruptura da barragem.

Ao final, as barragens são classificadas segundo a probabilidade, as consequências e o risco associado. Esse método tem sido utilizado na CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) desde 2003, para mostrar aos gestores quais as barragens necessitam ter prioridade e tratamento dos problemas relevantes para a segurança das estruturas, pois estão correlacionadas às vulnerabilidades do empreendimento.

### **3.3.1 Aspectos da legislação relativos a risco**

No Brasil têm ocorrido vários acidentes ambientais, em especial em barragens de terra para contenção de rejeitos e mesmo em barragens com reservatório de água. Nesse cenário o poder público tem se mobilizado e caminha no sentido de regulamentar situações que envolvam a operação de barragens. Uma das ações é o projeto de Lei 1.181 de 2003 – Comissão de Minas e Energia que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Conselho Nacional de Segurança de Barragens (CNSB) e o Sistema Nacional de Informações

sobre Segurança de Barragens (SNISB), de acordo com informações da COMISSÃO DE MINAS E ENERGIA (2003).

Em seu Art. 6º, estabelece a classificação por categoria de risco em função das seguintes variáveis:

- as características físicas da barragem,
- o estado de conservação da obra,
- a probabilidade de ocorrência de ruptura,
- as conseqüências da ruptura, contemplando aspectos sociais, econômicos e ambientais.

No parágrafo único, define as categorias de risco: alto, médio e baixo, deixando abertura para o órgão fiscalizador estabelecer graduação para cada categoria.

O Art. 7º, em seu parágrafo único, determina que o projeto construtivo deve detalhar informações em função da categoria de risco da barragem, devendo conter desenhos, especificações construtivas, estudos hidrológicos, hidráulicos e geológicos.

Em seu Art. 9º, III, que trata do plano de segurança da barragem, define no inciso 3º que o órgão fiscalizador poderá determinar a elaboração de Plano de Ações Emergenciais (PAE) em função da categoria de risco. Esse plano se torna exigência quando a barragem é classificada de alto risco.

Uma inspeção de segurança especial deve ser feita por equipe multidisciplinar de especialistas, em função da categoria de risco da barragem, nas fases de construção, primeiro enchimento e vertimento, operação e desativação. Os procedimentos de instrumentação e de monitoramento deverão ser estabelecidos pelo órgão fiscalizador em função da categoria de risco de barragem.

O Art. 16º, VI, determina que o empreendedor da barragem deva manter serviço especializado em segurança de barragens quando ela for classificada nas categorias de médio e alto risco.

### **3.3.2 Diretrizes para implementação da norma de gestão de riscos (Norma AS/NZS 4360:2004)**

A gestão de risco é a maneira de lidar com o risco de determinadas atividades e suas relações no cenário em que estão inseridas. Assim, o risco pode ser visto como resultado positivo ou

negativo e pode ser previsto de forma qualitativa e/ou quantitativa. Para que a avaliação de risco seja válida, é necessário que seja realizada por especialistas técnicos com o comprometimento dos gestores que têm autonomia para tomada de decisões.

Nesse sentido, a norma AS/NZS 4360:2004 foi desenvolvida e tem sido aplicada na Austrália desde a década de 1990 e está fundamentada na ênfase da gestão de ações que procuram conhecer aspectos intervenientes de atividades em um contexto no qual o risco precisa ser entendido, gerenciado e, por vezes, evitado.

A estrutura da norma consiste em conhecer o escopo, benefícios e aplicação da gestão de riscos. Essa gestão depende da definição de critérios qualitativos das atividades em análise. Após a análise dos contextos, necessita-se conhecer as partes componentes do risco, as possíveis conseqüências e probabilidades de ocorrências. Além desses conhecimentos, deve-se saber como minimizar as incertezas, analisar as oportunidades, preparar planos de tratamento de risco e formas de estabelecimento da gestão eficaz.

O processo de avaliação de risco é lógico e precisa ser sistemático para apoiar a tomada de decisões, de modo a melhorar a eficiência do desempenho em um sistema. Cicco (2005) afirma que a análise de risco deve ser vista como função independente e preferencialmente realizada por especialistas técnicos.

A gestão de riscos pressupõe ameaças e oportunidades. Para que a gestão desenvolva-se de forma adequada, deve-se conhecer a lógica das ameaças para haver melhor aproveitamento das oportunidades, com ações que evitem ou reduzam as possibilidades de que algo saia errado. Portanto, a gestão de riscos estimula a ação proativa, em vez da reação.

Alguns benefícios da gestão de risco são: redução de surpresas, capacitação de pessoas para gerenciar ameaças e oportunidades, aumento da habilidade de capitalizar oportunidades, possibilidade de mitigar resultados negativos e obtenção de melhor desempenho, evitando-se custos desnecessários para recuperar perdas.

Outro benefício é a conscientização das partes envolvidas, que passam a compreender por que determinadas ações são tomadas.

Entre as várias aplicações da gestão de risco, destacam-se:

- planejamento estratégico,
- planejamento de recursos,
- projeto e responsabilidade pelo produto,
- desenvolvimento de políticas públicas,
- avaliação de impactos ambientais,
- estudos de viabilidade,
- operações de sistemas de manutenção.

Cicco (2005) ressalta a importância das avaliações de risco serem sistematizadas segundo critérios definidos por norma. O Brasil está no início dessa caminhada, evidenciados pelo Projeto de Lei 1.181 e cadastramento das barragens existentes no país.

### **3.4 Análise estatística de rupturas em barragens**

A natureza aleatória de todos os fatores envolvidos na ruptura de barragens pode induzir a erros na modelagem da ruptura por *piping*, se tratado somente por método determinístico. Esse método traz consigo parcela de erro, traduzido em fator de segurança, com resultado conservador. Muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar os riscos de ruptura por *piping* unicamente do ponto de vista geotécnico de forma determinística. Entretanto, são raros os estudos de avaliação dos riscos que levam em consideração o aspecto probabilístico.

Alves e Maria (2001) alertam sobre o enfoque de as análises e decisões de engenharia geotécnica fundamentarem-se em tratamentos estatísticos e probabilísticos, pois o próprio ato de determinação de parâmetros introduz incertezas devido ao processo de amostragem, além da variabilidade intrínseca da natureza. Via de regra, as teorias e os modelos aplicados em geotecnia são determinísticos, portanto, ao considerar a parcela de erro que não se enquadra diretamente ao modelo determinístico, ela deveria ser pesquisada para definir a distribuição probabilística que melhor representa o fenômeno.

Segundo Cruz (1996), as observações de rupturas ocorridas no passado demonstram que o fenômeno de *piping* é regido pela estatística dos extremos, ou seja, a resistência à tração ou coesão é que condicionam a formação desse fenômeno. Nos laboratórios, as condições para determinação do fator de segurança estão sob controle, e os ensaios são submetidos a cenários de estatística das médias, o que não ocorre no ambiente real das barragens. Alves e Maria

(2001) afirmam que a análise de risco deve ser consciente e deve respeitar o seguinte princípio:

[...] a abordagem probabilística permite ao engenheiro um tratamento racional da variabilidade dos parâmetros, completando o cálculo determinístico e constituindo-se em valioso auxílio ao processo de decisão. (ALVES e MARIA, 2001).

Cuidado deve ser tomado no tratamento estatístico de dados, quanto à qualidade das fontes que os fornecem, para evitar distorções e/ou viés na aleatoriedade desses dados, prejudicando as interpretações.

A acurácia da estimativa de parâmetros estatísticos de uma variável aleatória aumenta com o tamanho da amostra. Mas, para grandes amostras, há elevados custos. Assim, deve-se conciliar a acurácia desejada com o custo da amostragem.

Hill *et al.* (2003) alertam que a maioria dos guias de avaliação de risco recomenda a estimativa de probabilidade total de falha para o reservatório sem considerar a combinação de probabilidades individuais de falha de cada estrutura componente desse sistema. Na maioria dos casos, os modos de falha de vários componentes de uma barragem não são independentes, o que faz com que as probabilidades de falha não sejam simplesmente combinadas de forma aditiva. As probabilidades de diferentes modos de falha em seções do barramento necessitam ser cuidadosamente combinadas sobre todos os tipos de eventos iniciais e relacionadas para se estimar a probabilidade total. O tratamento impróprio dessas combinações de probabilidades pode levar a viés na avaliação e justificativas inadequadas para melhorias propostas no sistema da barragem.

Os dados levantados por Jansen *et al.* (1986) em rupturas e acidentes em obras de barragens mostram que o motivo mais freqüente de acidentes é a erosão interna (*piping*). Foster *et al.* (2000b), em um estudo que compreendeu análise de 1.462 grandes barragens (13% das existentes no mundo até 1982), demonstram que a freqüência de rupturas de barragens por *piping* aumentou de 43% para 54% após 1950, em relação aos outros motivos de rompimento. Ressalta-se que esse tipo de ruptura está concentrado em barragens de terra. As conseqüências dessas rupturas são impactos ambientais a jusante e, às vezes, perdas de vidas. Diante dos dados expostos, ações devem ser priorizadas para controlar os fatores causais que têm maior probabilidade de ocorrência.



Os dados apresentados por Foster *et al.* (1998) demonstram as variáveis envolvidas em incidentes com barramentos de grandes barragens que ocorreram especificamente por erosão interna (*piping*).

A ênfase dada ao estudo foi direcionada aos seguintes fatores:

- compilação de dados de incidentes em barragens, incluindo a presença ou ausência de filtros, geologia da fundação, características do material aplicado no barramento, tais como tipos de solo do núcleo e método de compactação,
- análise de dados de incidentes em comparação com os dados de barragens existentes (catalogadas). O trabalho consistiu em estimar probabilidades de rupturas por diferentes modos de falha e identificação de fatores como geologia da fundação, características do núcleo do barramento que têm maior influência na ruptura da barragem por *piping* e modos de falha que instabilizam os taludes do barramento.

A classificação de acidentes, rupturas e incidentes foi feita da seguinte forma, conforme ICOLD (1974) *apud* Foster *et al.* (1998):

- ACIDENTE TIPO 1 (A1): é o acidente no qual a barragem foi usada por algum tempo, mas a formação da brecha é contida por medidas remediadoras imediatas, incluindo a possibilidade de rebaixamento do nível d'água,
- ACIDENTE TIPO 2 (A2): é o acidente observado em uma barragem durante o primeiro enchimento do reservatório e no qual foi prevenida a formação de brecha por medidas remediadoras, incluindo o rebaixamento do nível d'água,
- ACIDENTE TIPO 3 (A3): é o acidente durante a construção, por exemplo, recalques de fundação e taludes observados antes de represar a água, com tomada de ações para segurança do reservatório,
- RUPTURA, segundo ICOLD (1995) *apud* Foster *et al.* (1998): colapso ou movimento de parte de uma barragem ou suas fundações, situação em que a barragem não pode reter água. Em geral o resultado de uma ruptura é a liberação de grande quantidade de água, impondo riscos às pessoas ou propriedades a jusante.

Incidentes em barragens durante a construção são considerados como rupturas quando grande quantidade de água foi involuntariamente liberada a jusante.

As rupturas são descritas em duas categorias, segundo conceito de ICOLD (1974) *apud* Foster *et al.* (1998).

- RUPTURA TIPO 1 (F1): A ruptura envolve o completo abandono da barragem,
- RUPTURA TIPO 2 (F2): É a ruptura em que o tempo tem sido pequeno, mas permite que a extensão de danos sejam reparados completamente e a barragem possa ser usada novamente,
- INCIDENTE: É uma ruptura ou acidente que requer reparos.

Foster *et al.* (1998) compilaram dados de incidentes em grandes barragens no mundo, baseados nos seguintes levantamentos:

- catálogos de desastres, rupturas e acidentes em barragens, levantamento de Baab e Mermel (1968) *apud* Foster *et al.*(1998),
- bibliografia da história de rupturas em barragens, trabalho realizado por Vogel (1993) *apud* Foster *et al.*(1998),
- estudos do ICOLD (ICOLD 1974, 1983 e 1995) *apud* Foster *et al.*(1998).

Além dessas fontes foram feitos estudos por:

- Inglês (1984) e Ancol (1992) *apud* Foster *et al.*(1998), sobre incidentes com barragens australianas,
- USCOLD (1975); USCOLD (1988) e USCOLD (1996) *apud* Foster *et al.*(1998), listagem de incidentes em barragens dos EUA, contém algumas descrições de acidentes,
- Middlebrooks (1953) e Hatem (1985) *apud* Foster *et al.*(1998), que demonstram listas de incidentes em barragens dos EUA,
- Olwage e Vosthuizen (1984) *apud* Foster *et al.*(1998), listagem de incidentes na África do Sul,
- Charles e Boden (1985) *apud* Foster *et al.*(1998), listagem de incidentes no Reino Unido,
- Gomes Laa *et al.* (1979) *apud* Foster *et al.*(1998), listagem de acidentes em barragens espanholas,

- Takase (1967) *apud* Foster *et al.*(1998), análise estatística de incidentes com barragens no Japão,
- Junchun (1984) *apud* Foster *et al.*(1998), análise estatística de incidentes na China.

Outros estudos de análise estatística de incidentes com barragens foram realizados, considerando-se a altura da barragem, ano de construção e descrição básica do tipo de barragem (distinguindo barragens de terra e barragens de enrocamento), como fatores determinantes de seu porte. A seguir, é descrita a metodologia utilizada na compilação de dados de incidentes em barragens.

Foster *et al.* (1998) usaram três critérios para seleção de incidentes:

- ruptura no barramento da barragem por todos os modos de acidentes em grandes barragens,
- causas de rupturas no barramento (não necessariamente grande barragem) por *piping* e modos de falha que instabilizam o maciço,
- causas de incidentes envolvendo somente *piping*, instabilidade do maciço e modos de descarga que provocam acidentes.

As fontes de dados foram fundamentadas em descrições do ICOLD (1974 e 1983), USBR – United States Bureau of Reclamation, British Columbia Hydroelectric and Power Corporation (BC Hydro), Norwegian Geotechnical Institute e Alberta Dam Safety, fontes citadas por Foster *et al.* (1998).

Essas informações foram armazenadas em um banco de dados, denominado ERDATA1 e cedido, na forma de tabelas e planilhas, pelo emérito professor Robin Fell (UNSW – Austrália) para ser utilizada nesta dissertação.

Os dados foram divididos em seis fatores:

- detalhes da barragem, por exemplo, nome da barragem, país, altura, ano de construção.
- tipo de seções e descrições de filtros usados,
- tipo de *cutoff* na fundação,

- geologia da fundação da barragem,
- características do núcleo da barragem de terra,
- detalhes de incidentes.

A Tabela 3.2 mostra a representatividade dos dados da amostra que compõe o banco de dados de grandes barragens distribuídas na Austrália, Nova Zelândia, EUA, Noruega e artigos técnicos publicados pelo ICOLD.

**Tabela 3.2** – Número de grandes barragens que compõem o banco de dados

<b>Origem da amostra de grandes barragens</b>	<b>Número de barragens</b>
Austrália	356
Nova Zelândia	44
US <i>Bureau of Reclamation</i>	246
Noruega	174
Artigos de Congressos do ICOLD até 1982	642
<b>Total</b>	<b>1.462</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 10.

Essa amostra representa aproximadamente 13% de grandes barragens no mundo até 1982.

Um dos parâmetros usados no banco de dados é a forma da barragem e características como:

- país,
- faixa de altura (< 20m; 20 – 29 m; 30 – 49 m; > 50m),
- período de construção (< 1900; 1900 – 29; 1930 – 49; 1950 – 69; 1970 – 82).

Essas três características foram consideradas influentes na tendência de projeto e forma/seção da barragem. Outro fator de representatividade do banco de dados é a coleta de dados técnicos de grandes barragens dos países: Austrália, França, Índia, Japão (após 1950), Nova Zelândia, Noruega, EUA e outros, exceto China.

A China foi excluída devido ao aparente viés em registros de incidentes. O relatório ICOLD (1995) *apud* Foster *et al.*(1998) relata que a China tem aproximadamente o mesmo número de barragens que o resto do mundo, entretanto, somente 3 (três) rupturas em barragens foram oficialmente relatadas ao ICOLD, enquanto 180 foram registradas por outros países e reportadas ao ICOLD, no mesmo período.

As barragens japonesas construídas até 1950 foram também excluídas, devido às falhas nas informações da literatura.

### 3.4.1 Metodologia de análise do banco de dados

A filosofia de análise dos dados foi estabelecida em modos de falha para acidentes e rupturas, em comparação às causas dessas. O método é compatível com a análise por Árvore de Eventos, em que as probabilidades de rupturas são estimadas para vários modos de falha em uma barragem.

Os principais modos de falhas usados para classificação são:

- galgamento (*overtopping*),
- falha no vertedouro,
- entubamento por erosão regressiva (*piping*),
- instabilidade em taludes,
- abalo sísmico e liquefação de material do maciço.

Os modos de falha por *piping* foram divididos em três categorias: *piping* através do barramento, *piping* através da fundação e *piping* do barramento para fundação.

### 3.4.2 Estatística de falhas

As probabilidades de falhas são estimadas pelo número de incidentes comparado ao número total de barragens, dado pela probabilidade média de falhas sobre a vida em operação da barragem, ou comparado ao número total de anos de operação de barragens, o que resulta na probabilidade anual de falha.

Foram realizadas análises estatísticas das seguintes características:

- tipo de seção da barragem,
- material do barramento e filtros,
- detalhes de *cutoff* da fundação,
- tipo de geologia da fundação,

- característica do núcleo do barramento, tipo do solo, origem geológica e grau de compactação,
- canais de descarga.

A Tabela 3.3 a seguir mostra que a grande maioria das barragens tem altura entre 15 e 30 m, e uma minoria tem altura superior a 60 m.

**Tabela 3.3** – Altura de barragens, exceto dados da China (ICOLD, 1984)

Altura de barragens	% Barragens
15 – 30 m	78,0 %
30 – 60 m	17,1 %
60 – 100 m	3,75 %
100 – 150 m	0,95 %
150 – 200 m	0,17 %
> 200 m	0,05 %

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 18.

Em relação ao ano de construção de barragens, o levantamento mostrou forte aceleração em número de barragens após 1950, ou seja, mostra que 25% das barragens catalogadas por ICOLD (1995) *apud* Foster *et al.*(1998), exceto China, foram construídas antes de 1950. Nesse levantamento, dos anos de 1700 a 1986 havia 11.192 grandes barragens em operação.

Em relação aos tipos de barragens, essas são classificadas como: barragem de terra (TE – *earthfill embankment*) e barragem de enrocamento (ER – *rockfill embankment*). A classificação adotada no banco de dados considera barragem de enrocamento se houver uma seção de enrocamento de volume não especificado a jusante do eixo da barragem.

### 3.4.3 Estatística das seções típicas de barragens

O levantamento compreendeu barragens construídas até 1982, baseadas em dados do ICOLD, (1984) *apud* Foster *et al.*(1998), excluindo-se China com 17.305 barragens e 721 barragens japonesas, construídas antes de 1930. Os dados compreendem 10.232 grandes barragens e demonstram que a seção com materiais de solo (terra) é a mais comum, representando 35,9% do total de barragens. Barragens de terra, homogênea e somente de enrocamento não são comuns, como pode ser observado na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4** – Distribuição de seções típicas em grandes barragens construídas até 1982

<b>Tipo de seção</b>	<b>% Barragens</b>
Barragem de terra, homogênea	9,5
Terra com filtro	15,0
Terra com enrocamento de pé	6,1
Materiais de solo, areia e cascalho	35,9
Materiais de solo e enrocamento	9,3
Núcleo central de terra e enrocamento	8,4
Solo e face de concreto	4,1
Enrocamento e face de concreto	2,8
Solo e núcleo de argila em camadas	4,7
Solo com núcleo em parede	2,4
Enrocamento com núcleo em parede	0,9
Núcleo hidráulico	0,9

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 19.

Os projetos de barragens são variados em diferentes países, como nos EUA, Reino Unido, França, Nova Zelândia e Índia, que têm poucas barragens de enrocamento, possivelmente devido à dificuldade de rochas ígneas ou dificuldade de equipamentos adequados. Nesses países são mais comuns barragens de terra, exceto França e Reino Unido.

O Reino Unido adota predominantemente barragens com núcleo de argila em camadas, em torno de 75% das barragens existentes no país. A Noruega tem quase todas as barragens em enrocamento. A Austrália tem alta percentagem de barragens de enrocamento, compreendendo 40% das barragens desse país.

#### **3.4.4 Tipos de geologia da fundação**

A Tabela 3.5 representa a amostra de 800 barragens, na qual 594 tiveram identificação confiável da geologia da fundação, ou seja, 74% da amostra.

**Tabela 3.5** – Número de barragens com geologia da fundação conhecida

País	Número de barragens	Nº de barragens com geologia conhecida
EUA	320	278
Austrália	356	241
Nova Zelândia	44	25
Reino Unido	22	18
Índia	21	10
Canadá	37	22
<b>TOTAL</b>	<b>800</b>	<b>594</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, apêndice E.

O estudo compreendeu análise da geologia dessas barragens e identificou um fato interessante, ou seja, em 57% da amostra, a geologia da fundação foi caracterizada como solo aluvial (FOSTER *et al.*, 1998).

As barragens são freqüentemente construídas em vales de rios, onde os depósitos aluviais são comuns. Portanto, nesse tipo de solo pode haver a necessidade de *cutoff* até a rocha. A pesquisa mostrou que somente 15% das barragens têm *cutoff* não penetrante na rocha.

Países com clima tropical tais como Brasil, Chile e México, em que as rochas sofreram intemperismo profundo, são propensos ao uso de solos residuais na fundação. O banco de dados referenciado identificou solo residual com representatividade de 8% da amostra.

### 3.4.5 Características do núcleo do barramento

A pesquisa compreendeu os países enumerados na Tabela 3.6, em barragens construídas até 1982.

**Tabela 3.6** – Número de barragens da amostra com origem conhecida dos materiais aplicados no núcleo

País	Número de barragens
EUA	57
Reino Unido	13
Índia	4
Canadá	24
Outros países	117

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, apêndice F.



Os dados da Tabela 3.7 mostram que o tipo de solo mais usado em núcleo de barragens é de origem residual, 38,3% entre os demais.

A distribuição percentual de solos usados em núcleos de barragens, segundo classificação unificada, em 432 barragens e 669 tipos de solos, demonstra que argilas de baixa plasticidade (CL) são aplicadas em aproximadamente 1/3 (34,2%) das barragens. Silte e areias argilosas (SM, SC) também são representativas em aproximadamente 1/3 (35,1%) das barragens, conforme mostra a Tabela 5.3 do capítulo 5.

**Tabela 3.7** – Origem geológica de materiais aplicados no núcleo

	% estimado de tipos de geologia usados no núcleo de barragens								
	USA	Índia	Grã-Bretanha	Canadá	Austrália	Noruega	Nova Zelândia	Outros países	Distribuição no mundo <sup>(1)</sup>
<b>Eólica</b>	12	5	0	0	1	0	5	4	7,0
<b>Aluvial</b>	25	30	10	15	24	8	5	20	22,1
<b>Coluvial</b>	8	0	0	0	12	0	5	7	6,3
<b>Glacial</b>	25	0	70	75	2	84	25	15	22,0
<b>Lacustre</b>	4	5	5	7	1	0	0	0	2,4
<b>Marinho</b>	0,5	0	0	3	1	0	0	0	0,3
<b>Residual</b>	25	60	15	0	61	8	35	50	38,3
<b>Vulcânico</b>	0,5	0	0	0	0	0	25	3	1,7
<b>% de barragens <sup>(2)</sup></b>	<b>39,0</b>	<b>8,1</b>	<b>3,5</b>	<b>3,1</b>	<b>2,2</b>	<b>0,9</b>	<b>0,3</b>	<b>43,0</b>	<b>100</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 28.

Notas:

- (1) Porcentagens de distribuição no mundo de tipos de núcleo, determinados por soma de pesos das distribuições em percentuais de barragens de cada país.
- (2) Percentuais de grandes barragens construídas até 1982, informadas por ICOLD (1984) *apud* Foster *et al.*(1998)

### 3.4.6 Compactação do núcleo

Os dados informados na pesquisa de Foster *et al.*(1998) mostram que as barragens construídas a partir de 1930 e, mais acentuadamente, a partir de 1950 passaram a ter melhor controle de compactação.

### 3.4.7 Detalhes da fundação e *cutoff*

A pesquisa em 1.462 barragens mostrou que em 449 não houve condições de identificar características de *cutoff*, ou seja, de 1.013 barragens, dessas 84,2% têm *cutoff* completamente penetrante até a rocha, conforme mostra a Tabela 3.8.

**Tabela 3.8** – Tipo de *cutoff* usado nas barragens da amostra

<b>Tipo de <i>cutoff</i> na fundação</b>	<b>Nº de barragens</b>	<b>% de barragens (casos conhecidos)</b>
<i>Cutoff</i> parcialmente penetrante ( <i>Cutoff</i> usado na fundação em solo)	160	15,8 %
<i>Cutoff</i> completamente penetrante ( <i>Cutoff</i> usado na fundação em rocha)	853	84,2 %
Tipo de <i>Cutoff</i> não conhecido	449	-
<b>TOTAL</b>	<b>1462</b>	<b>100 %</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 33.

### 3.4.8 Estatísticas de rupturas

A estatística compreendeu o levantamento em grandes barragens, com altura > 15m, até 1986, excluindo barragens construídas no Japão antes de 1930 e barragens da China. Nesse levantamento, constatarem-se 171 rupturas, sendo que 12 dessas rupturas ocorreram durante a construção, conforme informa Foster *et al.* (1998).

A probabilidade média histórica de rupturas de grandes barragens é estimada em 1,2% sobre a vida de 11.192 barragens construídas até 1986, correspondendo a  $4,5 \times 10^{-4}$  por barragem ao ano.

Os dados da Tabela 3.9 mostram que a probabilidade média de rupturas para barragens construídas até 1950 é maior que barragens construídas após 1950.

**Tabela 3.9** – Estatística de rupturas antes e após 1950 em grandes barragens

<b>Modo de ruptura</b>	<b>% Total de rupturas (modo de ruptura conhecido)<sup>(1)</sup></b>	<b>% Rupturas antes de 1950<sup>(2)</sup></b>	<b>% Rupturas após 1950<sup>(2)</sup></b>
Galgamento ( <i>overtopping</i> )	34,2 %	36,2 %	32,2 %
Vertedouro	12,8 %	17,2 %	8,5 %
<i>Piping</i> através do barramento	32,5 %	29,3 %	35,5 %
<i>Piping</i> do barramento para a fundação	1,7 %	0 %	3,4 %
<i>Piping</i> através da fundação	15,4 %	15,5 %	15,3 %
Deslizamento do talude a jusante	3,4 %	6,9 %	0 %
Deslizamento de talude a montante	0,9 %	0 %	1,7 %
Abalo sísmico	1,7 %	0 %	3,4 %
<b>Total <sup>(3)</sup></b>	<b>102,6 %</b>	<b>105,1 %</b>	<b>100 %</b>
Total de galgamento e falhas em equipamentos de acessórios	48,4 %	53,4 %	40,7 %
Total de <i>piping</i>	46,9 %	43,1 %	54,2 %
Total de deslizamentos	5,5 %	6,9 %	1,6 %
Nº total de barramentos de barragens que romperam (exceto durante a construção)	124	61	63
Nº em anos de operação de barramentos de barragens em operação (até 1986)	300.524	71.000	229.400
Probabilidade anual de ruptura	$4,1 \times 10^{-4}$	$8,6 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 38.

Notas:

- (1) Porcentagens são baseadas na % de casos em que o modo de ruptura é conhecido.
- (2) Porcentagens de rupturas nas barragens em operação, de onde foram excluídos dados de rupturas durante a construção.
- (3) Porcentagens não necessariamente somam 100%, pois algumas barragens romperam por múltiplos modos de falha.

### 3.4.9 Tipos de seção em barragens

A estatística do banco de dados, segundo Foster *et al.* (1998), mostrou que os tipos de seção que têm maior proporção de casos de rupturas são:

- barramento de terra homogêneo,
- barramento de terra e enrocamento a jusante,
- barramento de terra com face de concreto,
- barramento de solo com núcleo em parede de concreto,
- barramento com núcleo hidráulico.

Esses tipos de barragens são caracterizados por:

- seção do barramento relativamente uniforme com inadequado controle de vazão na descarga e falta de controle das poropressões no barramento e na fundação,
- seções em que não havia filtro na maioria das vezes,
- seções tipicamente antigas e obsoletas.

Barragens que usam enrocamento (por exemplo, terra com enrocamento, enrocamento com núcleo argiloso, enrocamento com face de concreto e enrocamento com núcleo em parede) são tipos de seções que têm proporcionalmente poucos casos de rupturas.

Barragens de enrocamento têm baixa probabilidade de ruptura por *piping*, porque a probabilidade de o entubamento progredir para brecha é pequena. Isso ocorre porque barragens de enrocamento possuem alta capacidade de descarga e inerente estabilidade na ocorrência de grandes fluxos de água, bom controle de poropressões a jusante e alta resistência às tensões pelo material de enrocamento.

### 3.4.10 *Piping* através do barramento

Foster *et al.* (1998) levantaram informações que demonstram a ocorrência de 39 rupturas em grandes barragens (altura > 15m), o que representa 38% de todas as rupturas. A probabilidade média histórica é de  $3,5 \times 10^{-3}$  (39 falhas entre 11.192 barragens), conforme dados do ANEXO A.

A probabilidade anual histórica é de  $1,3 \times 10^{-4}$ , sendo determinada pelo resultado do quociente entre o número de rupturas e a quantidade em anos de operação nas 11.192 barragens, o que corresponde a 300.524 anos de operação, conforme Tabela 3.10. A quantidade acumulada em anos de operação foi obtida pelo somatório do produto da quantidade de barragens por cada tipo e a média estimada em anos de operação até 1986.

**Tabela 3.10 – Idade média de barragens em operação por tipo de seção até 1986**

TIPO DE SEÇÃO	Nº de barragens	Idade média até 1986	Total em anos até 1986
Terra homogênea	1.030	34,9	35.947
Terra com filtro na fundação	1.704	18,9	32.205
Terra com enrocamento de pé de talude	676	24,9	16.832
Terra zoneada	4.051	21,9	88.716
Terra zoneada e enrocamento	1.052	22,2	23.354
Núcleo central de terra e enrocamento	977	16,2	15.827
Terra e face de concreto	452	29,8	13.470
Enrocamento com face de concreto	317	26,1	8.274
Terra com núcleo impermeável	480	91,5	43.920
Terra, com núcleo em concreto	255	48,6	12.393
Enrocamento, com núcleo em concreto	105	32,5	3.412
Aterro hidráulico	89	69,0	6.141
Outras	4	8,3	33
<b>TOTAL</b>	<b>11.192</b>		<b>300.524</b>

Fonte: Modificado de FOSTER, *et al.*, 1998, p. 22.

Foster *et al.* (1998) relatam que a probabilidade média histórica de início de *piping* através do barramento, combinado entre rupturas e acidentes é de  $1,0 \times 10^{-2}$  [(39 rupturas + 80 acidentes) ÷ 11.192], conforme dados do ANEXO A.

Em relação ao uso de filtros no barramento, aproximadamente 30% de acidentes ocorreram em barragens sem filtros. Em 21 dos 31 acidentes em que se constatava a presença de filtros, o início de *piping* ocorreu devido ao fato de o material de filtro ser grosseiro ou segregado (não graduado), colocado junto a outros materiais no filtro sem a devida área de transição.

Quanto à propriedade de materiais aplicados em núcleos de barramento, a pesquisa no banco de dados mostra que as barragens construídas com argilas dispersivas são suscetíveis a falhas

por *piping*, com uma estatística apresentando uma frequência de 18% de casos ( 9 entre 51 casos) de rupturas por *piping*.

Em relação à combinação de fatores, as tabelas 5.21, 5.22 e 5.23, do capítulo 5, mostram os fatores estimados a partir das estatísticas. Nessas tabelas os fatores são classificados de acordo com o tipo de seção da barragem, a origem geológica de materiais usados no núcleo do barramento, a geologia da fundação e a compactação do maciço, dentre outros fatores.

Essas tabelas identificam características que determinam um grau de probabilidade qualitativa, classificados como:

- muito mais provável,
- mais provável,
- neutro,
- menos provável,
- muito menos provável.

A estatística de incidentes indica que a combinação de muitas características classificadas como “muito mais provável” têm maior risco de formação de *piping* do que aquelas que têm uma ou duas características classificadas com esse grau de probabilidade qualitativa.

Por exemplo, a presença de solos dispersivos por si só não necessariamente influencia a probabilidade de ruptura. Entretanto, uma barragem construída com solos dispersivos, compactação ruim e, além disso, seção homogênea, provavelmente terá maior possibilidade na formação de *piping*.

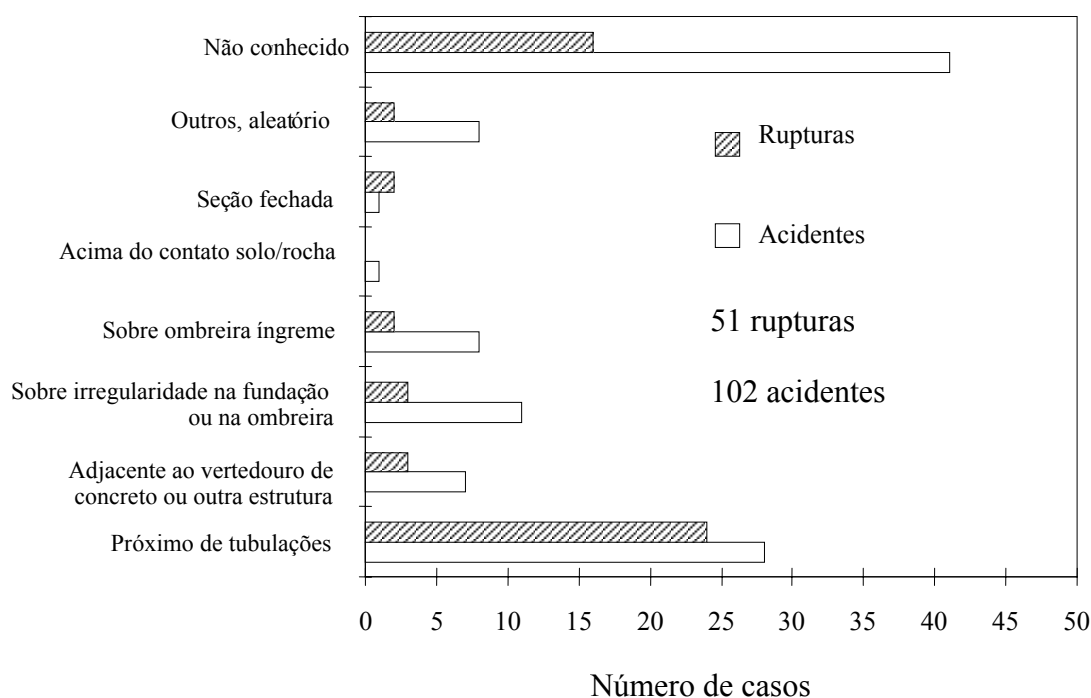
Outro fator considerado na estatística é o tempo de ocorrência de incidente após a construção. Sobre esse fator os dados da Tabela 3.11 mostram que *piping* através do barramento ocorre com maior frequência no primeiro enchimento do reservatório e nos primeiros 5 (cinco) anos de operação.

**Tabela 3.11** – Tempo de incidentes após a construção – *piping* através do barramento

Tempo de incidente após a construção	Nº de casos		% de casos (conhecidos)	
	Rupturas	Acidentes	Rupturas	Acidentes
Durante a construção	1	0	2	0
Durante o primeiro enchimento	24	26	47	25
Após o primeiro enchimento e durante os primeiros cinco anos de operação	7	13	14	13
Após os primeiros cinco anos de operação	18	60	35	59
Não conhecido	1	3	2	3
<b>Nº total de casos de <i>piping</i></b>	<b>51</b>	<b>102</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fonte: Modificado de FOSTER, *et al.*, 1998, p. 57.

Quanto à localização do início de *piping*, a estatística do banco de dados, sintetizada na Figura 3.8, mostra que a localização de início de *piping* ocorre com maior frequência na área próxima as tubulações ou condutos forçados através do barramento e/ou através de trincheiras



**Figura 3.8** – Localização do início de formação de *piping*

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 60.

Os dados estatísticos mostram que o *piping* ocorre próximo a tubulações em 46% dos casos das rupturas e em 27% dos casos de acidentes. Ressalta-se que o uso de tubulações, através do

barramento ou através de trincheira na fundação, é estimado ser aplicado em 505 barramentos da população de barragens (FOSTER *et al.*, 1998)

A Tabela 3.12 mostra a influência de tubulações ou condutos forçados em relação ao tipo de seção do barramento.

**Tabela 3.12** – Influência de tubulações na formação de *piping* através do barramento

<b>Tipo de seção da barragem</b>	<b>% de incidentes por <i>piping</i> originados em áreas próximas a tubulações ou condutos forçados</b>
Terra homogênea	45%
Terra com filtro na fundação	67%
Terra com enrocamento de pé de talude	36%
Terra zoneada	21%
Terra zoneada e enrocamento	13%
Núcleo central de terra e enrocamento	14%
Terra e face de concreto	50%
Enrocamento com face de concreto	0%
Terra com núcleo impermeável	28%
Terra, com núcleo em concreto*	50%
Enrocamento, com núcleo em concreto	33%
Aterro hidráulico	0%

Incidentes com *piping* = rupturas por *piping* + acidentes por *piping*

\* Somente dois casos de incidentes em barragens de terra com núcleo de concreto.

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 61.

As possíveis causas potenciais, para ocorrência de *piping* devido à presença de estruturas como tubulações ou condutos forçados são:

- inadequada compactação de materiais próximo às laterais das tubulações ou trincheiras escavadas de forma irregular na fundação,
- tendência a condições de baixa tensão e fraturas hidráulicas, quando a tubulação é localizada em profundidade e em trincheiras estreitas na fundação,
- trincas nas tubulações devido à deterioração ou recalque diferencial da estrutura da mesma.

Foster *et al.* (1998) relatam que o *piping* ocorre próximo a tubulações em cerca de 40% dos casos nos seguintes tipos de barragens: barragens de terra homogênea, barragem de terra com filtro na fundação, barragem de terra com face de concreto e barragens em terra com núcleo em parede.



Barragens de terra com núcleo central e enrocamento têm baixa proporção de incidentes envolvendo *piping* próximo às tubulações (14%). Entretanto, muitas dessas barragens são grandes e possuem túneis de passagem ao invés de tubulações.

Em menor frequência, o *piping* ocorre na interface entre o barramento e as estruturas de concreto, como vertedouros (6% a 7%), sobre as irregularidades da fundação ou nos limites do barramento (áreas de interface e transição entre materiais), e sobre as ombreiras com grande inclinação (4% a 8%). Nota-se que esses locais são de difícil compactação dos materiais e têm características suscetíveis à fratura hidráulica e/ou ao recalque diferencial.

#### **3.4.11 *Piping* através da fundação**

Incidentes por *piping* através da fundação são classificados em várias categorias, dependendo da natureza da erosão interna: *piping* através do solo da fundação, *piping* do solo da fundação para dentro da rocha da fundação, *piping* associado com fundações de vertedouros tubulares e fundação de dissipadores de energia e ainda em fundação em areia que sofreu liquefação.

O levantamento estatístico realizado por Foster *et al.* (1998) computou no banco de dados 21 rupturas em barramentos associados ao *piping* através da fundação, sendo que 19 dessas rupturas foram em grandes barragens. Sendo assim, a probabilidade média histórica de rupturas em grandes barragens é de  $1,7 \times 10^{-3}$  (19 rupturas em 11.192 barragens construídas até 1986). Enquanto a probabilidade média histórica é  $6,3 \times 10^{-5}$  por ano de operação, calculado pelo quociente entre 19 rupturas e 300.524 anos de operação até 1986.

Em relação aos acidentes, a Tabela 3.13 permite observar que ocorreram 85 casos de acidentes. Foster *et al.* (1998) informam que 70 deles ocorreram em grandes barragens, até 1986, conforme dados do ANEXO A. A probabilidade média histórica nesse caso é  $6,2 \times 10^{-3}$ , pois ocorreram 70 acidentes entre 11.192 barragens.

Foster *et al.* (1998) relatam que há tendência em ocorrer interrupção no processo de formação de *piping* pela fundação, de forma natural. Essa é uma das razões de o número de rupturas ser pequeno, havendo registro de apenas 19 casos.

**Tabela 3.13** – Incidência de *piping* através da fundação

Tipo de <i>piping</i>	Ruptura		Acidente	
	Nº de casos	%	Nº de casos	%
1. <i>Piping</i> através da fundação em solo				
- fundação da barragem	7	-	16	-
- ombreira	1	-	10	-
- fundação do reservatório	1	-	3	-
<b>Subtotal =</b>	<b>9</b>	<b>43%</b>	<b>29</b>	<b>34%</b>
2. <i>Piping</i> da fundação em solo para a rocha				
- fundação da barragem	0		5	
- fundação do reservatório	0		1	
<b>Subtotal =</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>6</b>	<b>7%</b>
3. <i>Piping</i> através da fundação em rocha	6	28%	7	8%
4. <i>Piping</i> na fundação do vertedouro	1	5%	10	12%
5. <i>Piping</i> da fundação em solo para os drenos de alívio no pé do talude	0	0%	9	11%
6. Liquefação na fundação	0	0%	22	26%
7. Não conhecido	5	24%	2	2%
<b>TOTAL =</b>	<b>21</b>	<b>100%</b>	<b>85</b>	<b>100%</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 66.

Os dados da Tabela 3.13 permitem observar que:

- as fundações em solo têm tido maior frequência de *piping* através da fundação,
- as fundações em rocha não têm muita frequência de acidentes e rupturas por *piping*. Os acidentes correspondem a 8%, e as rupturas a 28% dos casos,
- em 23% de acidentes as ocorrências foram em sistemas de drenagem na fundação da barragem ou na fundação de vertedouros.

Quanto ao tipo de seção da barragem, os dados de frequências de incidentes mostrados na Tabela 5.1 (capítulo 5) permitem concluir que não é tanto o tipo de seção que influi na frequência de acidentes e rupturas através da fundação, mas o tipo de *cutoff* e a geologia da fundação. Outro fator que influencia a ocorrência de *piping* através da fundação é o controle do fluxo de descarga e as poropressões nos materiais da fundação da barragem.

Foster *et al.* (1998) informam que a estatística sobre as barragens de enrocamento têm probabilidade média anual de ruptura menor que  $2 \times 10^{-5}$ . Isso se deve à baixa probabilidade

de progresso de *piping* para erosão com alargamento do entubamento e conseqüente brecha, devido a:

- tendência de construção de barragens de enrocamento em fundações de rochas que são menos suscetíveis a *piping* pela fundação,
- maior proporção de barragens de enrocamento construídas recentemente, se comparada com outro tipo de seção.

A presença de filtro na fundação tem alguma influência na probabilidade de início de *piping*, mas não é significativa. A estatística informada por Foster *et al.* (1998) mostra que 26 barragens usam filtros na fundação, e os dados da Tabela 3.14 mostram que houve 43% de casos de acidentes e rupturas em barragens sem filtros na fundação.

**Tabela 3.14** – Estatística de incidentes por *piping* com a presença de filtros na fundação

Presença de filtros na fundação	Nº de casos	
	Rupturas	Acidentes
Nenhum filtro na fundação	13	33
Um filtro na fundação	1	23
Dois filtros na fundação	0	2
Não conhecido	7	27
<b>TOTAL</b>	<b>21</b>	<b>85</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 69.

Com esse modo de *piping* analisado em relação ao tipo de *cutoff*, em especial quando este não é penetrante na rocha, há maior possibilidade de formação de *piping* no solo da fundação. Foster *et al.* (1998) afirmam que *cutoffs* parcialmente penetrantes têm 15 vezes mais probabilidade de rupturas do que quando são completamente penetrantes na rocha.

O fator geologia da fundação é crítico quando o solo é do tipo aluvial, pois apresenta os maiores percentuais de casos de ruptura e acidentes de *piping*, representando 56% dos solos da amostra de barragens pesquisadas nos seguintes países: EUA, Índia, Canadá, Austrália e Nova Zelândia (FOSTER *et al.* 1998).

A Tabela 3.15 mostra que os tipos de solo coluvial e glacial têm maior frequência de casos de acidentes (29% + 16% = 45%) em relação aos respectivos tipos de solos nos casos de ruptura (10%). Isso demonstra que o *piping* inicia, mas não progride, pois há autocicatrização do

entubamento. As barragens que tiveram rupturas na fundação em solo residual apresentam solos dispersivos (FOSTER *et al.* 1998).

**Tabela 3.15** – Tipo de geologia do solo em incidentes por *piping*

Tipo de geologia do solo	Casos de rupturas		Casos de acidentes		Amostra
	Nº de casos	%	Nº de casos <sup>(1)</sup>	%	% <sup>(2)</sup>
Aluvial	5	50%	10	32%	56%
Glacial	1	10%	9	29%	19%
Eólico	0	0%	3	10%	6%
Coluvial	0	0%	5	16%	7%
Lacustre	0	0%	2	6%	3%
Residual	3	30%	1	3%	8%
Vulcânico	1	10%	1	3%	<1%
Não conhecido	0	-	2	-	-
<b>Nº total de casos de incidentes</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>	<b>29</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 73.

Notas:

(1) Casos de incidentes com mais de um tipo de geologia do solo.

(2) Dados relacionados aos países: EUA, Índia, Canadá, Austrália e Nova Zelândia.

A Tabela 3.16 mostra que o *piping*, através da fundação em rochas, ocorre quando elas são sedimentares. Nesta tabela, observa-se que barragens com fundação em rocha calcária são suscetíveis a incidentes por *piping*, registrando 8 casos entre 13 ocorrências.

**Tabela 3.16** – Geologia de rochas com casos de incidentes através da rocha da fundação

Tipo de formação geológica	Nº de casos de rupturas	Nº de casos de acidentes
Arenito	1	0
Areia xistosa	1	1
Calcário	3	5
Não conhecido	1	1
<b>TOTAL =</b>	<b>6</b>	<b>7</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 74.

Quanto ao tempo de ocorrência do incidente após a construção da barragem, os dados da Tabela 3.17 mostram que as rupturas por *piping*, através da fundação, ocorrem 25% das vezes até o primeiro enchimento e 75% delas ocorrem nos primeiros cinco anos de operação.

**Tabela 3.17 – Tempo de ocorrência de incidente após a construção**

Tempo de incidente após a construção	Nº de casos		% de casos	
	Rupturas	Acidentes	Rupturas	Acidentes
Durante a construção	1	0	5	0
Durante o primeiro enchimento	4	23	20	30
Após o primeiro enchimento e durante os primeiros cinco anos de operação	10	19	50	24
Após os cinco primeiros anos	5	36	25	46
Não conhecido	1	7	-	-
<b>Nº total de casos de <i>piping</i></b>	<b>21</b>	<b>85</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 75.

Foster *et al.* (1998) relatam que dolinas e liquefação ocorrem em casos de acidentes pelo aumento da vazão de descarga, sendo que a água apresenta-se com coloração turva e barrenta. Esse fato é comum entre os casos de rupturas e acidentes.

#### 3.4.12 *Piping* do barramento para fundação

Os dados apurados até 1986 constataram três rupturas por *piping* do barramento para fundação, e o levantamento do ICOLD até 1995 identificou mais duas barragens, que não foram classificadas como grandes barragens (FOSTER *et al.*, 1998).

Foster *et al.* (1998) mostram que a probabilidade média histórica é de  $1,8 \times 10^{-4}$  (duas rupturas entre 11.192 barragens construídas até 1986). Entre os três modos de ruptura, esse representa 1,6% das rupturas ocorridas em grandes barragens. Outro fato interessante demonstrado na estatística levantada por esses autores é que a frequência de ruptura é de  $6,7 \times 10^{-6}$  por ano de operação da barragem (duas rupturas em 300.524 anos de operação em barragens até 1986).

A Tabela 3.18 mostra a ocorrência de *piping* em relação ao tipo de fundação. Nesta Tabela observa-se que os acidentes são mais frequentes que as rupturas, sendo que o tipo de *piping*

pela rocha da fundação destaca-se em relação ao tipo de fundação em solo. As razões podem ser:

- que a identificação de *piping* pela rocha da fundação é mais fácil de se fazer do que *piping* dentro do solo da fundação; ou
- provenientes da presença de juntas abertas em algumas fundações em rochas tratadas.

**Tabela 3.18** – Incidência de rupturas e acidentes por *piping* do barramento para a fundação

<b>Tipo</b>	<b>Ruptura</b>	<b>Acidente</b>
<i>Piping</i> na fundação em solo	1	7
<i>Piping</i> na fundação em rocha	3	24
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>31</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 80.

Em relação aos tipos de seções de barragens, os dados informados na Tabela 5.1 (capítulo 5) mostram que a seção não tem significativa influência na formação desse modo de *piping*. Entretanto, deve-se estar atento à capacidade de descarga a jusante da barragem. Por isso é importante a escolha de materiais adequados nas zonas de transição de descarga do fluxo d'água.

Foster *et al.* (1998) relatam que filtros no barramento e/ou na fundação têm limitada influência na probabilidade de formação de *piping* do barramento para a fundação, pois esses estavam presentes em 10 barragens de 31 casos de acidentes registrados e dois entre quatro casos de ruptura desse modo de *piping*.

Quanto ao fato de haver *cutoff* na fundação, a Tabela 3.19 mostra equilíbrio entre barragens que usam *cutoff* em trincheira profunda e *cutoff* em trincheira mais rasa. A ocorrência desse modo de *piping* está relacionada à dificuldade de compactação de materiais e assim pode gerar pontos fracos com áreas de baixa compactação adjacentes à fundação. O uso de *cutoff* em trincheiras profundas pode ser indicativo de alta permeabilidade na área da fundação.

Outro fato observado é a maior quantidade de acidentes do que rupturas, pois o *piping* autocicatrizava-se na maioria das ocorrências (FOSTER *et al.*, 1998).

**Tabela 3.19** – Características de *cutoff* na fundação em incidentes na fundação em rocha

Características de <i>cutoff</i>	Nº de casos		% de <i>piping</i> incidentes	% da amostra	
	Acidente	Ruptura			
<i>Cutoff</i> em trincheira	Raso	9	2	52 %	66 %
	Profundo	9	1	48 %	34 %
	Não conhecido	6	0		
<i>Grouting</i>	Sem <i>grout</i>	12	1	54 %	42 %
	Com <i>grout</i>	9	2	46 %	58 %
	Não conhecido	3	0		
<b>TOTAL =</b>		<b>48</b>	<b>6</b>		

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 83.

Medidas de controle de erosão na interface entre fundação e núcleo reduzem a probabilidade de início de *piping* do barramento para a fundação. No estudo realizado por Foster *et al.* (1998) foi relatada a dificuldade em se obterem informações de projeto sobre o uso de medidas de controle de erosão. Houve registro de 21% de barragens da amostra que utilizam medidas de controle da erosão na interface entre a fundação e o núcleo do barramento.

Em relação à geologia da fundação, apesar de poucos casos registrados, conforme estudo de Fell *et al.* (1992) *apud* Foster *et al.* (1998), constataram-se a presença de rocha altamente fraturada e juntas abertas em 10 casos pesquisados.

As ocorrências de *piping* em solo da fundação, relatadas na pesquisa realizada por Foster *et al.* (1998), ocorreram em solos glaciais, coluvionares e aluviais. Todos esses são caracterizados pelo potencial de grande variabilidade, alta permeabilidade e grande amplitude em tamanho de grão. Com base nesses dados estatísticos, percebe-se que barragens com fundação em solo de origem glacial são cerca de 2,5 vezes mais prováveis de terem formação de *piping* do que a média de incidentes. Outro fato observado na pesquisa realizada pelos autores referenciados foi a constatação de que solos coluvionares são cinco vezes mais suscetíveis a esse modo de incidente do que a média histórica. Os solos aluviais são menos prováveis do que a média, pois representam 56% dos solos usados em fundações, e a estatística de incidentes com esse tipo de solo é 25% dos casos.

As características do núcleo do barramento, como a origem geológica dos materiais são relacionadas na Tabela 5.18, no capítulo 5, a qual mostra que os materiais de origem glacial são duas vezes mais propícios a incidentes do que a média registrada. Nenhum dos incidentes

progrediu para ruptura, por esse modo de *piping*. Isso pode ser em parte pelo potencial de rochas fraturadas que têm passado pela glaciação. Nove entre onze incidentes envolveram *piping* em materiais de origem glacial. Os materiais de solo residual mostram-se menos suscetíveis a esse tipo de incidente. Os dados da Tabela 5.18 (capítulo 5) mostram que materiais de origem eólica têm efeito neutro na probabilidade de incidentes (FOSTER *et al.* 1998).

A localização do início de *piping* é influenciada pelas irregularidades no perfil da fundação ou nas áreas de contato de diferentes materiais. Esses locais são propícios ao início de *piping* do barramento para fundação. Essas características podem proporcionar condições de baixa resistência, aumentando a probabilidade de fratura hidráulica através do maciço. Outro fator como irregularidades no perfil de vales e alto grau de fraturas abertas por tensões nas juntas podem proporcionar aumento da probabilidade desse tipo de incidente.

Incidentes por *piping* junto a tubulações e adjacentes a estruturas de vertedouro não são comuns nesse modo de incidente se comparados a *piping* através de barramento.

Quanto ao tempo de ocorrência de incidente após a construção, a Tabela 3.20 mostra que a frequência de acidentes no período dos primeiros cinco anos de operação é menos da metade dos casos.

**Tabela 3.20** – Tempo de ocorrência de incidentes após a construção

Tempo de incidente após a construção	Nº de casos		% de casos	
	Rupturas	Acidentes	Rupturas	Acidentes
Durante a construção	0	0	0	0
Durante o primeiro enchimento	2	6	50	20
Após o primeiro enchimento e durante os primeiros cinco anos	2	8	50	27
Após os primeiros cinco anos	0	16	0	53
Não conhecido	0	1	-	-
<b>Nº total de casos de <i>piping</i></b>	<b>4</b>	<b>31</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1998, p. 92.

Esses dados sugerem que esse modo de *piping* ocorre mais tarde na vida de operação da barragem. Os dados mostram que a ocorrência de acidente não progride para ruptura ou



brecha à medida que a idade da barragem avança. Segundo Foster *et al.* (1998), a maior frequência é no período de 50 – 90 anos de operação, ou seja, esse tipo de *piping* pode se desenvolver por processo degenerativo das estruturas.

### **3.4.13 Análises sobre as estatísticas de rupturas e acidentes pelo fenômeno de *piping***

Os incidentes que envolvem *piping* correspondem a aproximadamente 90% dos modos de rupturas estruturais em grandes barragens, e *piping* através do barramento equivale a dois terços dos casos de *piping*. Outro tipo de incidente, como o escorregamento de taludes de barragens, representa estatisticamente 4% das rupturas em barragens, havendo somente um registro desse tipo de ruptura em uma grande barragem (FOSTER *et al.*, 1998).

Segundo Foster *et al.* (1998), a probabilidade de rupturas em barragens mais antigas é bem maior do que em barragens mais novas. A probabilidade de ruptura em barragens construídas antes de 1950 é 7,5 vezes maior que barragens construídas após esse ano.

Os resultados demonstram que o controle inadequado do fluxo de descarga e das poropressões na barragem e na fundação são os principais fatores que desencadeiam o *piping* e a instabilidade de taludes. Os tipos de barragens com essas características são:

- barragem de terra, homogênea,
- barragem de terra com filtro, particularmente filtro na fundação,
- barragem de terra com enrocamento de pé de talude,
- barragem de terra com face de concreto,
- barragem de terra com núcleo em parede de concreto,
- barragem de terra com argila compactada em camadas.

Barragens com enrocamento a jusante têm baixa probabilidade de rupturas por todos os modos de *piping*. Nesse tipo de barragem, há alta proporção de casos de acidentes, mas menos prováveis em se progredir para brecha, se comparado às seções com solo a jusante. Isso se deve à estabilidade e à grande capacidade de fluxo de descarga na seção com enrocamento a jusante.

O levantamento estatístico realizado por Foster *et al.* (1998) conclui que barragens com fundação de origem geológica glacial são particularmente suscetíveis a incidentes por *piping*.

Outra informação importante relacionada às estatísticas referenciadas é que a maior probabilidade de ocorrência de *piping* é nos primeiros cinco anos de operação, com a proporção de dois terços das rupturas pelos três modos de *piping*.

Os dados apresentados neste capítulo serviram de base para as análises e escolha dos fatores de pesos que influenciam a probabilidade de ruptura por *piping*. Essas análises são apresentadas no capítulo 5 desta dissertação.

### **3.5 Métodos de avaliação de segurança em barragens**

Segundo Fell (2000), o uso de técnicas de determinação quantitativa de riscos (QRA- Quantitative Risk Assessment) aplicados ao gerenciamento de segurança de barragem está se desenvolvendo rapidamente, particularmente nos EUA, Austrália e Canadá.

O método de determinação quantitativa de risco inclui:

- identificação dos modos de rupturas,
- análises para estimar a probabilidade de rupturas de barragens,
- cálculo das perdas ambientais, econômicas, e perdas de vida nos eventos de ruptura em barragem,
- comparação do risco projetado com o risco determinado.

Nesse sentido, a análise de risco é uma ferramenta que apóia a engenharia no gerenciamento de segurança de barragens. Na Austrália, a avaliação de risco tem se desenvolvido com base em normas regulamentadoras para avaliar probabilidade de rupturas, conforme AS/NZS – 4360 (2004) e ANCOLD (1994) de acordo com informações de Fell *et al.* (2004). Essa norma orienta que a probabilidade anual de ocorrência deve ser expressa em unidade de  $(\text{ano})^{-1}$ .

Em avaliação de riscos, os eventos são relacionados e suas probabilidades devem ser expressas como probabilidades condicionais. Para condução dessas avaliações, a identificação de modos de ruptura deve ser feita por engenheiros experientes em barragens e geólogos, inclusive com equipe composta de pessoas que monitoram a segurança de barragens. O resultado de uma lista de modos de ruptura potenciais e seus efeitos no desempenho do projeto é uma Árvore de Eventos.

Existem duas amplas categorias para estimar a probabilidade de eventos:

- método de performance histórica,
- método de Árvore de Eventos.

### **3.5.1 Método de performance histórica**

Esse método é aplicável na determinação inicial de risco e adotado na comparação com os resultados do método de Árvore de Eventos, não devendo ser usado sozinho para estimar probabilidades. O método utiliza estatística histórica de acidentes que são relacionados às características das barragens. São imputados fatores de pesos de acordo com a frequência de ocorrências de acidentes e rupturas. Esses fatores são usados no ajuste da probabilidade histórica anual por cada modo de ruptura para determinar a probabilidade total. É um método de avaliação que usa atribuições de valores de pesos para estimar probabilidades qualitativas. Portanto, o resultado obtido não significa o valor exato de risco, mas sim a ordem de grandeza dos números que podem ser comparados com outro método para análises e priorização de ações.

### **3.5.2 Método de análise por Árvore de Eventos**

Esse método tem a vantagem de identificar os mecanismos iniciais de falha, podendo modelá-las. Por exemplo, de que modo e em que medida o nível do reservatório e os detalhes da fundação da barragem podem influenciar a falha e contribuir para ações de prevenção de ruptura.

Alguns desses objetivos básicos são úteis para a estimativa de possibilidades condicionais em Árvore de Eventos, portanto são considerados em conjunto com julgamentos subjetivos. Assim, é necessário relacionar a performance histórica de dados em paralelo à avaliação por Árvore de Eventos, para prover credibilidade aos resultados.

No contexto da avaliação de risco, são caracterizadas duas vertentes na estimativa de probabilidades. São elas:

- análise determinística – aquela na qual os resultados são usados para fundamentar as estimativas de probabilidades em análise de risco, podendo ser usada para estimar o limiar de ruptura de uma barragem de gravidade em concreto,

- análise estocástica – inclui o método Monte Carlo. Não é usada de forma sistemática em análise de risco de segurança em barragens. Pode ser usada para estimar as incertezas associadas a probabilidades estimadas.

Cada situação/cenário em que o sistema da barragem esteja inserido é que determinará qual o método mais apropriado.

Apesar da ênfase dada a abalos sísmicos e *overtopping*, historicamente a maior contribuição para probabilidade de rupturas está associada a outro modo de falha, que é o entubamento (*piping*).

Fell *et al.* (2000) argumentam que a probabilidade de falhas pode alterar-se com o tempo. Portanto, a probabilidade de ruptura por *piping* pode ser baixa em um dado momento, mas pode aumentar com o passar do tempo. Assim, mudanças nos fatores que afetam as rupturas devem ser consideradas em qualquer momento, de forma sistemática.

O método probabilístico formal usado em análises de estabilidade de taludes está bem desenvolvido e pode ser usado para determinar a probabilidade de rupturas. Alguns problemas são relacionados ao uso desse método:

- a análise requer que se estimem as médias e desvios padrão de parâmetros,
- há dificuldade em modelar a ocorrência de poropressões e sua probabilidade anual, que são difíceis de serem avaliadas e medidas,
- as zonas de falha na fundação ou na barragem em superfícies de contato com materiais diferentes, que cortam a fundação, ou zonas de baixa compactação são difíceis de serem definidas, ou seja, esses fenômenos são difíceis de serem percebidos e não são modelados nas análises,
- a deformação da barragem após alcançar um fator de segurança de 1,0 deve ser modelada e comparada com a borda livre de projeto. Isso pode ser feito usando-se métodos simplificados ou modelagem numérica.

Devido a outros fatores intervenientes na estabilidade da barragem, como controles durante a construção, primeiro enchimento ou deterioração no sistema de filtros ou trincas, o método de probabilidade formal não é visto como confiável.

### 3.5.3 Métodos de avaliação de vulnerabilidade de sistemas

Foster *et al.* (1998) e Foster e Fell (1999) *apud* Fell (2000) afirmam que as ocorrências de rupturas por *piping* representam 43% de todos os tipos de rupturas e que esse tipo de ruptura ocorreu em 54% das barragens construídas após 1950, em relação à amostra de 1.462 barragens, conforme Tabela 3.9.

Foster *et al.* (1998) e Foster e Fell (1999) têm proposto um método para estimar a probabilidade relativa de ruptura por *piping*. Esse método tem sido usado na Austrália para determinar o risco e checar o método de Árvore de Eventos. Os autores recomendam o método de performance histórica somente para estudos preliminares em conjunto com o método de Árvore de Eventos.

Gomes *et al.* (2005) estudaram os vários métodos de análises de riscos em barragens. Os estudos foram direcionados sobre os seguintes aspectos:

- funcionalidade – não excedência de estados limites de utilização,
- durabilidade – evitar a deterioração significativa no período de vida útil da obra,
- economia – soluções de estudos que levem em conta o investimento inicial e os custos de exploração.

Os estudos têm constatado que o período de vida útil de obras de barragens tende a aumentar, dos 50 anos, antes estabelecidos, para 100 anos nos atuais projetos.

O relatório apresentado por Gomes *et al.* (2005) foi baseado em dados divulgados pela World Wide Web (WWW) e estudos desenvolvidos pelas seguintes instituições:

- ICOLD – International Commission on Large Dams,
- ANCOLD – Australian Committee on Large Dams,
- USCOLD – United States Committee on Large Dams,
- USBR – United States Bureau of Reclamation,
- USACE – United States Army Corps of Engineers,
- Flood Risk Management Research Consortium (UK),
- Department for Environment Flood and Rural Affairs (UK).

A análise de riscos tem como objetivo apoiar o processo de decisão sobre projetos de barragens. As análises de riscos classificam-se em:

- análises qualitativas,
- análises semiquantitativas,
- análises quantitativas.

Os projetos de barragem inserem uma série de fatores e variáveis que dificultam a implementação da análise de riscos quantitativos. Quanto às análises qualitativas e semiquantitativas, essas têm tido recente aplicação na engenharia de barragens. Os métodos mais utilizados são:

- HAZOP – Hazard and Operability Analysis (Análise dos Perigos e da Operacionalidade),
- FMEA – Failure Mode and Effect Analysis (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos) e FMECA – Failure Mode, Effect and Critically Analysis (Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Severidade),
- ETA – Event Tree Analysis (Análise por Árvore de Eventos),
- FTA – Fault Tree Analysis (Análise por árvore de Falhas),
- Nœud Papillon (Nó Borboleta).

Esses métodos foram desenvolvidos para a aplicação em sistemas mecânicos e/ou eletrônicos, com características bastante distintas das obras de barragens. Para que esses métodos possam ser aplicados na engenharia de barragens, deve-se ter conhecimento dos fatores condicionantes, das características e do comportamento dos componentes das estruturas da obra. Para que esse estudo seja efetivo, é necessário envolver uma equipe com conhecimentos de geologia, geotecnia, hidráulica, hidrologia, estruturas, equipamentos hidromecânicos, instalações elétricas, meio ambiente, sociologia, etc.

A seguir são descritos os princípios de cada um desses métodos.

### 3.5.3.1 HAZOP – Hazard and Operability Analysis (Análise dos Perigos e da Operacionalidade)

A necessidade de analisar desvios no funcionamento de partes de um sistema levou ao desenvolvimento do método no início da década de 1970 pela Sociedade Imperial de Indústrias Químicas (UK) e posteriormente adaptado para diferentes áreas científicas. O foco do método é a análise do comportamento do sistema, suas causas e conseqüências, sendo adequado para a análise sistemática dos desvios de determinadas grandezas.

Para ser aplicado na engenharia de barragens, é necessário que se façam adaptações para uso na fase de construção, atividades de fiscalização, e na fase de operação, no âmbito da análise do comportamento das obras, a partir dos dados de observações. Pode ainda ser aplicado na fase de projeto, permitindo atuar na concepção de determinados componentes da obra.

O método classifica os desvios das grandezas que caracterizam o seu comportamento, determina as causas, as conseqüências de tais desvios e propõe ações corretivas.

O método HAZOP enfoca a resposta dos vários subsistemas e tem como principais vantagens o seu caráter sistemático e sua aplicação relativamente rápida. A princípio, foi desenvolvido para apoiar análises de risco qualitativas, posteriormente foi adaptado para análises semiquantitativas, através da avaliação da severidade dos riscos, recorrendo a escalas de probabilidade e de gravidade.

Sua principal desvantagem é não analisar explicitamente os modos de falha que podem determinar os desvios. Ainda há dificuldade em classificar os possíveis desvios com palavras-chave genéricas, aplicáveis às diferentes grandezas que podem caracterizar o comportamento dos vários subsistemas.

O método pode também fazer uso de escalas de probabilidade de ocorrência dos desvios e de gravidade das conseqüências para apoio à realização de análises semiquantitativas.

### 3.5.3.2 FMEA e FMECA – Failure Mode and Effect Analysis (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos) e Failure Mode, Effect and Critically Analysis (Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Severidade)

Inicialmente desenvolvido para a ser aplicado na indústria de armamento dos EUA, em 1940, o método FMEA (Análise dos Modos de Falha e dos seus Efeitos) tem atualmente grande aplicação em diversas áreas científicas, como é o caso das indústrias química, petrolífera e nuclear.

Esse método é adequado ao estudo das falhas e respectivas conseqüências, passível de ser aplicado a materiais, a equipamentos ou a sistemas mais complexos.

Gomes *et al.*(2005) afirmam que esse método pode ser aplicado na engenharia de barragens transversal em todas as fases, desde concepção e projeto, passando pela construção, primeiro enchimento, até a fase de operação, o que o torna particularmente interessante.

A partir de análises indutivas, o método possibilita avaliar modos de falhas, respectivas causas e seqüência de efeitos, assim como os meios de detecção e prevenção dos modos de falha e de mitigação dos seus efeitos. Quando esse método faz análises semiquantitativas, é denominado FMECA (Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Severidade). Essa modalidade do método usa escalas de probabilidade de ocorrência das falhas e de gravidade dos seus efeitos.

A principal vantagem do método é a sistematização e o caráter metódico de análise dos vários subsistemas, respectivos estados de funcionamento, modos de falha e seqüência de efeitos, que permitem uma reflexão fundamentada sobre os meios de detecção e prevenção e de eliminação dos efeitos.

A necessidade de caracterizar o par, probabilidade de ocorrência do modo de falha e gravidade dos seus efeitos, através de escalas adequadas, constitui uma desvantagem pela complexidade em determinar essa relação, além da morosidade e alto custo de sua aplicação.

### 3.5.3.3 ETA - Event Tree Analysis (Análise por Árvore de Eventos)

O método é indutivo, procura estabelecer relações entre eventos, a partir de um evento iniciador. Ele foi desenvolvido no início da década de 1970 em apoio a implementação de análises de riscos em centrais nucleares. Atualmente é utilizado nas mais diversas áreas técnico-científicas.

Gomes *et al.* (2005) afirmam que o método permite calcular a probabilidade de ocorrência de seqüências de eventos, podendo, assim, ser aplicado no âmbito das análises semiquantitativas e quantitativas.

Um dos pressupostos é a necessidade de se identificarem os subsistemas que compõem os ramos, mas que não têm dependência, enquanto dentro dos ramos, é necessário identificar a seqüência lógica entre os eventos até a possível ocorrência da falha em cada ramo.



Os procedimentos de aplicação do método são os seguintes:

- Identificação do acontecimento iniciador.
- Construção da Árvore de Eventos a partir do pressuposto de que cada ramo da árvore dá origem a dois ramos, que representam um a situação de sucesso e o outro a situação de falha; cada seqüência de eventos culmina numa situação que pode ou não corresponder a uma falha.
- Cálculo da probabilidade de ocorrência de cada seqüência de eventos, ou seja, de todas as situações de falha, através da estimativa de probabilidades de sucesso e falha de cada evento, no caso de análises semiquantitativas ou quantitativas.

Sua aplicação tem sido desenvolvida pela simplicidade e rapidez na obtenção de resultados servindo também de apoio a outros métodos semiquantitativos.

#### 3.5.3.4 FTA – Fault Tree Analysis (Análise por Árvore de Falhas)

Esse método foi inicialmente desenvolvido pela companhia americana Bell Telephone e utilizado no âmbito de estudos de avaliação de riscos de sistemas de lançamento de mísseis, no início da década de 1960. A análise por Árvore de Falhas é talvez o mais utilizado nas mais diversas áreas científicas, nas indústrias aeronáutica, nuclear e química.

Ele pode ser usado em análises qualitativas, semiquantitativas ou quantitativas, pois trata-se de um método dedutivo. Inversamente à Árvore de Eventos, parte do evento final para os eventos iniciadores, procurando identificar as seqüências e combinações entre os eventos.

A análise por Árvore de Falhas é um método gráfico que recorre a um conjunto de símbolos lógicos normalizados que caracterizam a relação entre os vários eventos. Como os demais métodos, pode ser usado em várias fases na engenharia de barragens.

A capacidade em identificar todas as combinações de eventos que conduzem à ruptura do sistema em análise, constitui uma de suas vantagens, o que o torna particularmente adequado ao tratamento de acidentes de grande escala.

A construção e a interpretação da Árvore de Falhas exigem a padronização de símbolos e o uso de programas computacionais, havendo necessidade de se investir tempo por causa das

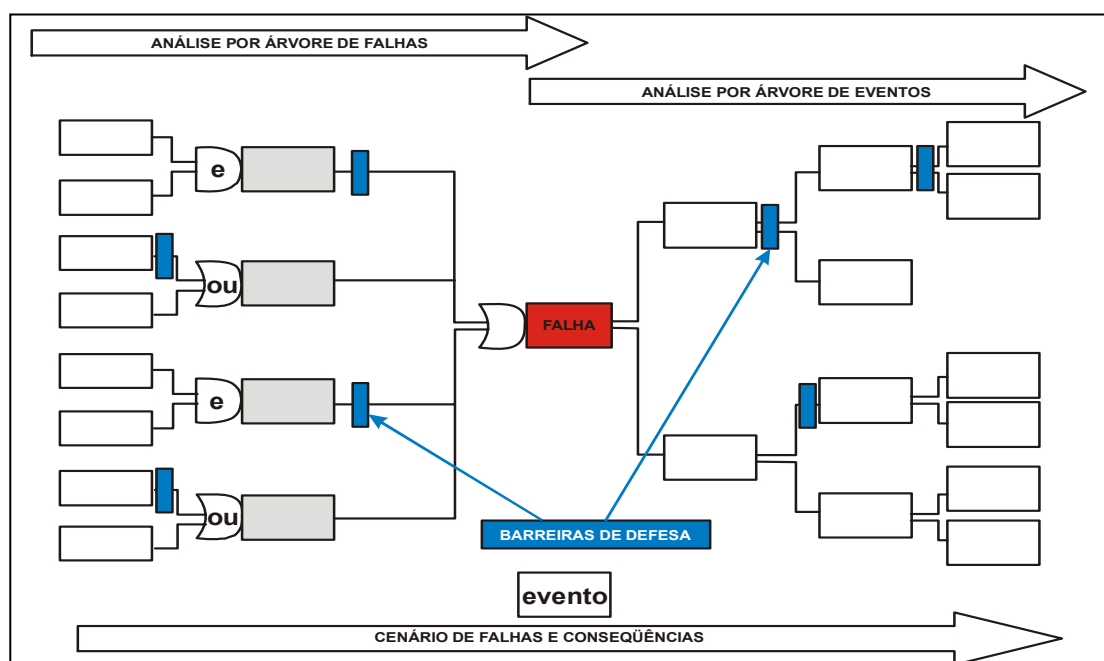
relações complexas entre os eventos. Esse fato torna-o moroso, sendo esta a desvantagem de sua aplicação.

### 3.5.3.5 Nó borboleta

A Figura 3.9 mostra esquematicamente o método denominado Nó Borboleta, que é a união dos métodos de Árvore de Falhas e de Árvore de Eventos. Segundo Gomes *et al.* (2005), este método tem sido bastante utilizado em alguns países da Europa, como a Holanda, e por algumas empresas, como a Shell, que o desenvolveu.

Como pode ser observado na Figura 3.9, a união dos métodos é feita pelo evento central, que constitui uma possível falha do sistema. A parte à esquerda do evento central é uma Árvore de Falhas, que analisa as seqüências e combinações de eventos que ligam os possíveis acontecimentos iniciadores à falha do sistema, e a parte à direita é uma Árvore de Eventos, que analisa os efeitos da falha em análise.

O método sintetiza os dois métodos que o constituem (Árvore de Falhas e Árvore de Eventos) e reúne as respectivas vantagens e desvantagens. Sua aplicação é morosa, recomendado para falhas particularmente críticas para a segurança e/ou a funcionalidade de sistemas.



**Figura 3.9 – Método Nó Borboleta**

Fonte: Modificado de INERIS<sup>1</sup>, 2003 *apud* Gomes *et al.*, 2005, p. 10.

Nota: 1- Institut National de L'Environnement Industriel et des Risques

### **3.6 Análise por Árvore de Eventos – ETA – Event Tree Analysis**

A partir deste item, é descrita em detalhes a fundamentação do método que foi desenvolvido no início dos anos 1970, para apoio à implementação de análises de riscos em centrais nucleares. Trata-se de um método indutivo de análise dos possíveis resultados a partir de um determinado acontecimento iniciador. A Árvore de Eventos é particularmente adequada para a análise de sistemas que integram diversos componentes de segurança. O método pressupõe que se consiga identificar, para cada subsistema em análise, os acontecimentos iniciadores que podem induzir a falhas, particularmente as relevantes para o comportamento global do sistema. O método permite estimar a probabilidade de ocorrência de seqüências de eventos, podendo, assim, ser aplicado no âmbito das análises semiquantitativas e quantitativas.

A aplicação desse método pressupõe o correto entendimento de eventos relacionados ao sistema. O significado do termo “evento” deve ser claramente definido na abrangência do processo em análise e não entendido como a descrição dos estágios de funcionamento desse sistema, para evitar equívocos na aplicação da Árvore de Eventos. Assim, na identificação da seqüência de eventos deve-se evitar a descrição de eventos que não estão relacionados fisicamente ao fenômeno.

O método de Árvore de Eventos foi primeiramente aplicado em barragem com o propósito de avaliação de risco por Whitman (1984) *apud* Hartford e Baecher (2004). Alguns exemplos de aplicação desse método são: análise de risco da barragem de Cousier, estudo feito por BC Hydro (1995) *apud* Hartford e Baecher (2004); estudo de barragem projetada realizado por Landon-Jones *et al.*(1996) *apud* Hartford e Baecher (2004) e estudo de três núcleos de terra em barragem de enrocamento na Noruega elaborado por Johansen *et al.*(1997) *apud* Hartford e Baecher (2004). Nesses estudos, a Árvore de Eventos foi usada em primeira etapa para avaliar o início de *piping* e possível intervenção para se evitar a ruptura das respectivas barragens.

A Árvore de Eventos destaca-se como ferramenta na análise de risco, pois possibilita adequado entendimento por ser gráfica, proporcionando discernimento qualitativo do desenvolvimento do fenômeno em estudo. Pode ser usada para avaliar qualitativamente a confiabilidade do sistema pela comparação com a avaliação realizada por outros métodos e, por fim, o modelo é um meio analítico na obtenção de informação requerida na avaliação de risco. Para que seja efetiva em seu objetivo, é necessário estabelecer como premissa o conhecimento de todos os possíveis resultados.

As vantagens sobre o método de performance histórica são:

- Há ênfase no projeto, na construção e na performance da barragem.
- Considera detalhes de projeto, como uso de filtros.
- O problema é desdobrado em componentes menores, as quais dão a estimativa de probabilidade de forma mais fácil.
- É um meio lógico e gráfico de ilustrar a seqüência de eventos desde o seu início até completar o conjunto de possíveis resultados.
- Nos casos em que a seqüência de eventos é conhecida, o processo de construção da Árvore de Eventos ilustra graficamente o que é conhecido acerca de possíveis modos que o sistema pode desenvolver, dadas as condições de operação e início do evento.
- Por ser um processo de modelagem indutiva, a análise por Árvore de Eventos possibilita identificar situações, nas quais as seqüências de eventos não são conhecidas com certeza, mas podem ser reveladas pelo estudo e conhecimento de especialistas e pessoas que têm relacionamento profissional com a barragem em avaliação. Em tais casos, a Árvore de Eventos é considerada uma estrutura de conhecimentos ou uma estrutura de convicções.

A Árvore de Eventos é um sistema binário, em que os vários eventos ou estágios do sistema, ou ocorrem ou não ocorrem, com o resultado de cada seqüência descrita nos ramos da árvore. O sucesso ou falha de cada estágio deve ser cuidadosamente definido para garantir que o evento em potencial estágio de falha esteja relacionado fisicamente ao desenvolvimento do fenômeno em estudo e não inclua ações relacionadas à operação ou tratamento remediador de eventos desfavoráveis.

Nesse sentido, o conhecimento dos fenômenos físicos relacionados aos eventos em análise devem ser estudados e compreendidos, conforme descrito a seguir.

Hartford e Baecher (2004) ressaltam que, tipicamente, as rupturas em barragens podem ser amplamente agrupadas em três principais modos de ruptura:

- rupturas hidráulicas devido às anormalidades no controle do fluxo da água através do maciço,
- movimento de massa devido a cargas extremas,

- desequilíbrio de tensões no maciço e conseqüente deterioração da matriz do solo, dando condições de ocorrer erosão interna.

Esses três modos de ruptura podem ser iniciados por mais de uma causa, podendo ser construída a Árvore de Eventos para cada combinação de modo de ruptura e modo iniciador.

Durante a construção da Árvore de Eventos, podem ocorrer os seguintes problemas:

- Os resultados dependem da equipe formada e há poucos dados a partir dos quais essa equipe pode estimar as probabilidades de progressão de falhas, assim seu uso é um pouco melhor para cenários de início de *piping*.
- Há pouca base sobre as quais a equipe de especialistas pode estimar probabilidades para o progresso de *piping* até a formação da brecha. O método é mais adequado para se avaliar o início de formação de *piping*. Entretanto, os resultados têm melhorado segundo trabalhos realizados por Wan e Fell (2002 e 2003) *apud* Hartford e Baecher (2004).
- Os resultados originados da avaliação da equipe de especialistas podem ser enviesados em direção às falhas, e assim as probabilidades de *piping* podem se superestimadas.

Fell *et al.* (2000) recomendam o uso de método de Árvore de Eventos por sua característica de se adequar a cada barragem, mas lembram que as respostas devem ser verificadas pelo método de performance histórica e, se forem muito diferentes, as razões dessas diferenças devem ser resolvidas. Os autores argumentam que alguns resultados da estimativa de probabilidades condicionais em Árvore de Eventos são obtidos por julgamentos subjetivos. Assim, é necessário relacionar a performance histórica de dados para prover credibilidade aos resultados.

A probabilidade de falhas pode alterar-se com o tempo. Portanto, a probabilidade de ruptura por *piping* pode ser baixa em um dado momento, mas pode aumentar com o passar do tempo. Assim, mudanças nos fatores que afetam as falhas devem ser consideradas em qualquer momento. A análise dos modos de ruptura, efeitos e severidade são caracterizados através de escalas adequadas, para o par probabilidade de ocorrência do modo de ruptura e gravidade dos seus efeitos.

As informações técnicas pesquisadas e analisadas a partir da revisão bibliográfica conduzem a avaliação de vulnerabilidade do sistema da barragem em estudo de forma qualitativa e quantitativa, citadas a seguir:

- identificação dos modos de rupturas,
- análises para estimar a probabilidade de ruptura da barragem,
- comparação do risco estimado com o risco avaliado.

Uma interpretação qualitativa parte, em geral, do pressuposto de que todos os acontecimentos iniciadores são possíveis de ocorrer. Essa interpretação visa estimar a probabilidade de ruptura em análise e as seqüências e combinações de eventos, a partir da probabilidade de ocorrência dos acontecimentos iniciadores.

Após a elaboração da Árvore de Eventos, é necessário estimar valores para as probabilidades associadas à ocorrência de cada par de eventos nos ramos da árvore, isto é feito por alguns métodos. Hartford e Baecher (2004) citam a existência do método qualitativo que discrimina possibilidades: muito improvável, improvável, provável e muito provável. Outra forma usada para definir probabilidades é a estimação quantitativa que pode ser feita pelos seguintes métodos:

- estimativa estatística (histórica ou empírica),
- modelo de confiabilidade,
- análise por Árvore de Falhas,
- opiniões de especialistas.

Para que o processo de estimativa de probabilidades seja útil e válido, o método deve seguir os seguintes princípios:

- reprodutibilidade,
- tratamento de incerteza,
- validação.

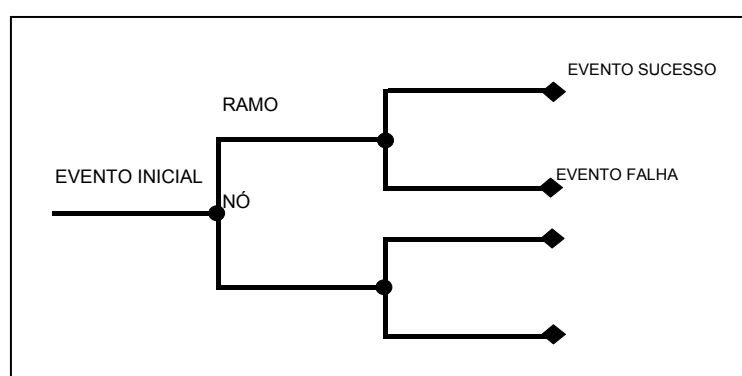
A reprodutibilidade significa que o modelo deve ser reproduzido por outras pessoas e chegar aos mesmos resultados. Portanto, esse modelo deve ser bem especificado, e os dados devem estar disponíveis para as pessoas que o praticam.

A incerteza é o conceito relacionado à estimativa de risco, devendo ser acompanhada de argumentações sobre essas incertezas. As análises devem deixar claras as fontes, natureza e magnitudes de incertezas.

A validação significa que as análises devem ser acessíveis e fáceis de serem entendidas e comprovadas.

### 3.6.1 Fundamentação teórica do método de análise por Árvore de Eventos

A seguir, são tratados aspectos básicos referentes ao método, baseados no guia Risk and Uncertainty in Dam, elaborado por Hartford e Baecher (2004). Basicamente a Árvore de Eventos é composta de evento iniciador, ramos de possibilidades de sucesso e insucesso que se desdobram binariamente em cada possibilidade até o evento final. A notação e a representação gráfica são mostradas na Figura 3.10.

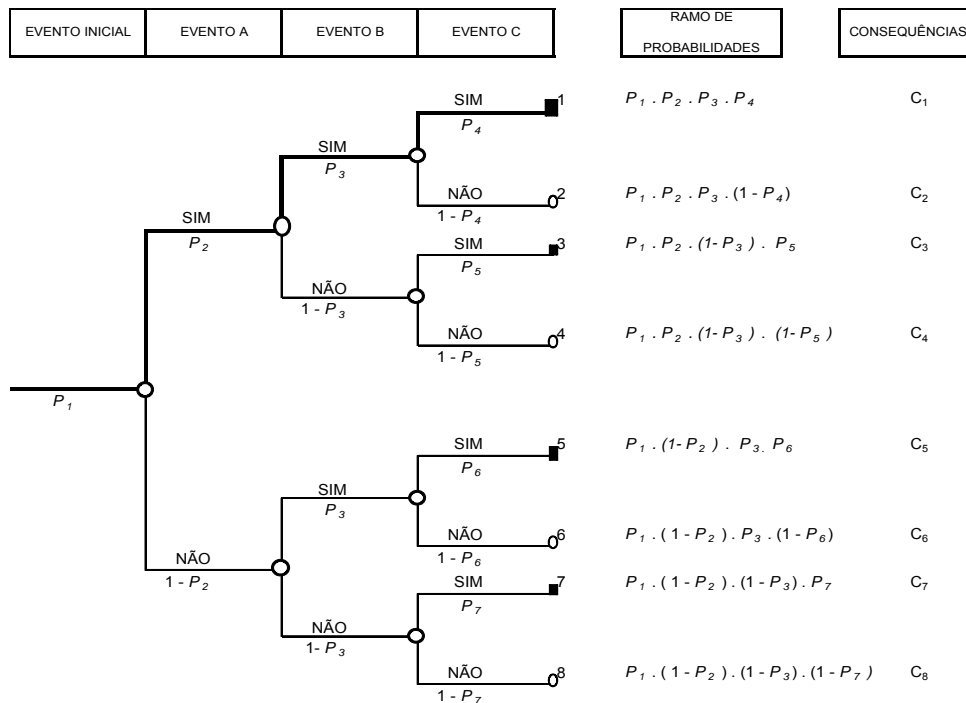


**Figura 3.10** – Terminologia aplicada à Árvore de Eventos

Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 179.

O requisito teórico para os efeitos de cada evento representados na Árvore de Eventos são as ocorrências mutuamente exclusivas e coletivamente completas. O termo *mutuamente exclusivo* significa que dois (ou mais) eventos não podem ocorrer simultaneamente, ou seja, esses eventos não são pontos comuns na amostra. O outro termo, *coletivamente completo*, significa que há no mínimo um evento dentro do grupo de eventos que deve ocorrer, ou seja, que os eventos juntos compreendem todos os pontos do espaço amostral “S”. (HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 166).

A Figura 3.11 mostra o conjunto seqüencial de eventos que são mutuamente exclusivos e que determinam eventos finais e respectivas probabilidades associadas a eles. Essa combinação de eventos procura mostrar a análise de risco, envolvendo falhas internas no sistema, a partir de um evento iniciador e possíveis conseqüências.



**Figura 3.11** – Características da Árvore de Eventos

Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 48.

Em processos de avaliação de risco em barragens, a Árvore de Eventos deve ser construída com cuidado, procurando identificar os possíveis eventos iniciadores que desencadeiam outros eventos até a ruptura do sistema. Normalmente, os eventos iniciais e suas conseqüências são considerados isoladamente em relação aos demais subseqüentes. Isso é feito para se evitarem complexidade na Árvore de Eventos e possíveis erros na seqüência deles. A pesquisa demonstrou que estudos de risco para segurança de barragem são realizados para pequeno número de eventos iniciadores, tais como:

- tempestades extremas que levam ao aumento das aflúências de água para o reservatório,
- terremoto que causa abalo sísmico e instabilidade das estruturas,
- falhas de projeto ou construção, tipicamente associadas a problemas nas linhas de fluxo que passam pelo núcleo ou distúrbios associados aos filtros instalados para proteger o núcleo de qualquer possível erosão,
- falhas de equipamentos,



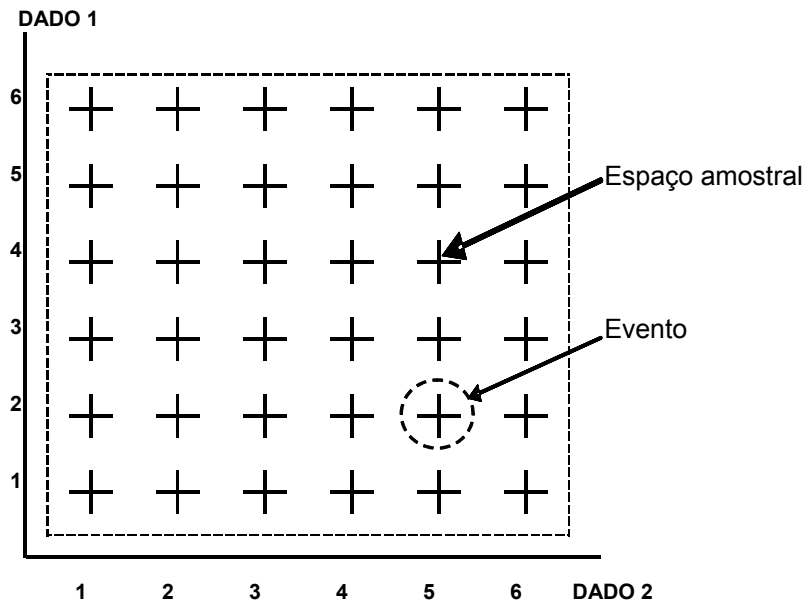
- falha humana, por exemplo, falhas na operação do vertedouro.

Um dos princípios que fundamentam o método é que os eventos iniciais são aleatórios. Os demais eventos devem estar relacionados fisicamente aos acontecimentos, no contexto do sistema. Cuidado deve ser tomado na elaboração da árvore para que ela seja composta somente por eventos associados aos estágios de desenvolvimento do fenômeno. Hartford e Baecher (2004) ressaltam que a suspeita ou a incerteza de falha no controle de qualidade durante a construção da fundação é importante para a probabilidade de a massa se liquefazer, em um abalo sísmico, mas não seria um evento por si mesmo na Árvore de Eventos. A liquefação da crista deveria ser incluída, porque esse evento descreve um estágio físico da barragem. Um evento como “esforço para proteger o enrocamento de pé” não deve ser incluído, porque, mesmo sendo um evento que ocorre no tempo, ele não descreve um estágio físico da barragem. O evento de “demora na detecção da falha” não descreve um estágio físico do sistema, não devendo ser colocado na Árvore de Eventos.

### **3.6.2 Fundamentação probabilística do método de Árvore de Eventos**

A validação do método pressupõe o entendimento dos princípios de probabilidade aplicados ao método. Assim, é fundamental entender os princípios associados ao experimento aleatório simples que demonstra a teoria de probabilidades. Hartford e Baecher (2004) ressaltam alguns pontos no guia sobre riscos e incertezas associados à avaliação de barragens (Risk and Uncertainty in Dam). Os principais fundamentos são apresentados a seguir.

Os eventos mostrados na Árvore de Eventos devem ser aleatórios, portanto, compreender que os eventos representam todo o espaço amostral e a priori não podem ser excluídos por julgamento com base em paradigmas. Esse entendimento compreende associações com situações genéricas para facilitar a compreensão dos conceitos. Considere o experimento com dados, ou seja, o estudo consiste em jogar dois dados e quando os números de cada dado formam um par, é denominado evento. As possibilidades de formação de pares compreendem o espaço amostral, Figura 3.12.

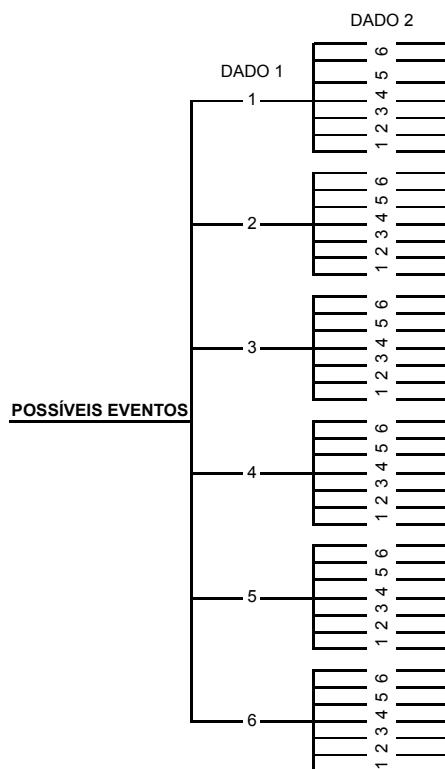


**Figura 3.12** – Espaço amostral para jogo de dois dados

Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHEER, 2004, p. 187.

Os subconjuntos do espaço amostral são chamados de eventos, nesse caso, 36 eventos  $\{(1,1), (1,2), \dots, (6,6)\}$ .

Outra forma de representar esses eventos é através de diagrama de árvore (Figura 3.13), que demonstra todos os possíveis resultados do experimento.

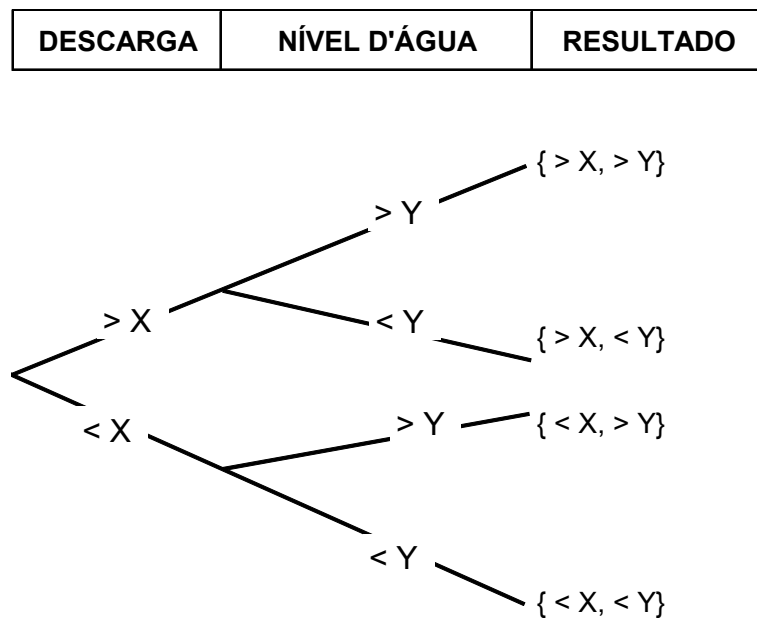


**Figura 3.13** – Árvore de Eventos para experimento de jogo de dois dados

Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHEER, 2004, p. 188.

A Figura 3.13 mostra, de forma visual e gráfica, o conjunto de distribuição de probabilidades associadas às variáveis aleatórias do experimento; essa é a forma de se ver o espaço amostral pela Árvore de Eventos. Pode-se observar também que a ordem das variáveis aleatórias não importa, podendo ser arbitrariamente alterada.

Uma Árvore de Eventos, simples como a da Figura 3.14, mostra a descarga em volume de água por unidade de tempo, ou defluência, pelo nível d'água em um rio. As probabilidades associadas ao primeiro ramo são as probabilidades marginais das defluências tomadas da respectiva curva de freqüência. As probabilidades associadas ao segundo ramo são as probabilidades condicionais de nível d'água para uma dada descarga. A alteração da ordem, pela colocação de nível de água no primeiro ramo da árvore e descarga no segundo ramo, altera as probabilidades dos ramos. O primeiro ramo torna-se agora o estágio de probabilidades marginais, e o segundo ramo torna-se o ramo de probabilidades condicionais de descarga para um dado estágio. Os dois conjuntos podem ser alternados, de probabilidades marginais e condicionais, de um para o outro, de acordo com o Teorema de Bayes. Isso pode ser feito porque o resultado de probabilidades da interseção é o mesmo para os dois casos. Assim, a Árvore de Eventos pode ser interpretada pela forma gráfica de representar as relações entre eventos e suas respectivas probabilidades condicionais.



**Figura 3.14** – Árvore de Eventos para descarga e fluxo de água em um rio  
 Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 188.

Como foi visto a Árvore de Eventos demonstra relações de causalidade, em que a realização do **evento A** influencia a probabilidade do **evento B**; pelo Teorema de Bayes (equação 3.2) a influência de causalidade implica também a reversão de sentido dessa causalidade.

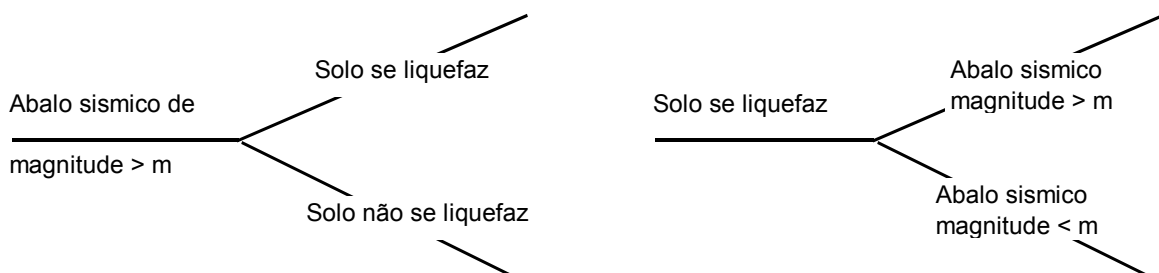
$$P(A/B) = \frac{P(A/B) \cdot P(A)}{P(B/A) \cdot P(A) + P(B/A^c) \cdot P(A^c)} \quad (3.2)$$

A ordem de eventos pode ser rearranjada de acordo com o propósito em estudo. De acordo com a teoria de probabilidades, somente as probabilidades dentro da árvore são condicionais, os eventos não necessariamente necessitam ser de causa e efeito. Esse princípio aplica-se mesmo sabendo que um **evento A** influencia em alguma proporção a ocorrência do **evento B**.

Esse conceito pode ser melhor entendido pela explicação do exemplo mostrado na Figura 3.15, em que a frequência de ocorrência de abalo sísmico de determinada magnitude pode causar liquefação no solo. Observe que a árvore da esquerda, na Figura 3.15, mostra que o solo se liquefaz se houver abalo sísmico maior que  $m$  ocorrências. Nessa situação, o solo provavelmente se liquefaz, com a seguinte notação:  $P(\text{liquefação/abalo} > m)$ . Essa seria a ordem causal de eventos no entendimento de um geólogo. Outro modo de se verem os eventos é mostrado na parte direita da Figura 3.15. A situação de interesse nessa árvore é a probabilidade de abalos serem maior que  $m$  ocorrências dado que houve liquefação do solo, em um estudo pré-histórico (arqueológico).

Nesse caso, a notação é  $P(\text{abalo} > m / \text{liquefação})$ . Essa condição seria a ordem causal para o interesse de estudo arqueológico.

Como foi mostrada, a ordem de eventos na árvore depende do interesse em estudo, relacionada à forma como as pessoas pensam nas relações de causa e efeito, ou na forma de se entender a ocorrência de evento na ordem do tempo. Como esse fato não interfere nos valores de probabilidades marginais, não há importância em se definirem diferentes ordens de eventos em cada ramo da árvore. Então, de acordo com o interesse em estudo, é bom colocar os eventos em ordem lógica, para facilitar o entendimento.



**Figura 3.15** – Alteração de ordem de eventos em uma Árvore de Eventos  
 Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHEER, 2004, p. 189.

Hartford e Baecher (2004) afirmam que Análise por Árvore de Eventos (ETA) é a arte de combinar ciência e probabilidades, com a arte de discernir e julgar os possíveis eventos.

Como afirmado anteriormente, os ramos de uma Árvore de Eventos representam resultados que são mutuamente excludentes e coletivamente completos. Quando os resultados de cada evento são discretos, a distribuição de probabilidades reduz-se à Função Massa de Probabilidades (FMP). Em cada estágio há a probabilidade de ocorrer o evento e o seu correspondente complemento, totalizando probabilidade igual a 1,0 em cada estágio. Por exemplo, em dado ramo de uma Árvore de Eventos, pode haver a probabilidade de aumento das poropressões, estimado em 0,1; a probabilidade para o correspondente ramo de que não há aumento de poropressões no maciço é 0,9 (complemento do primeiro ramo).

Estudos de risco aplicados na avaliação de formação de *piping* podem ser encontrados nas publicações de Vick e Stewart (1996) na barragem de Cousier (BC Hydro); Johansen, Vick e Rikartsen (1997) nas barragens de Viddals, Dravladasls-Svartevatn (NGI); Von Thun (1999) na barragem de Navajo (USBR) e Luehring, Russell, e Mares (2000) na barragem de Como *apud* Hartford e Baecher (2004).

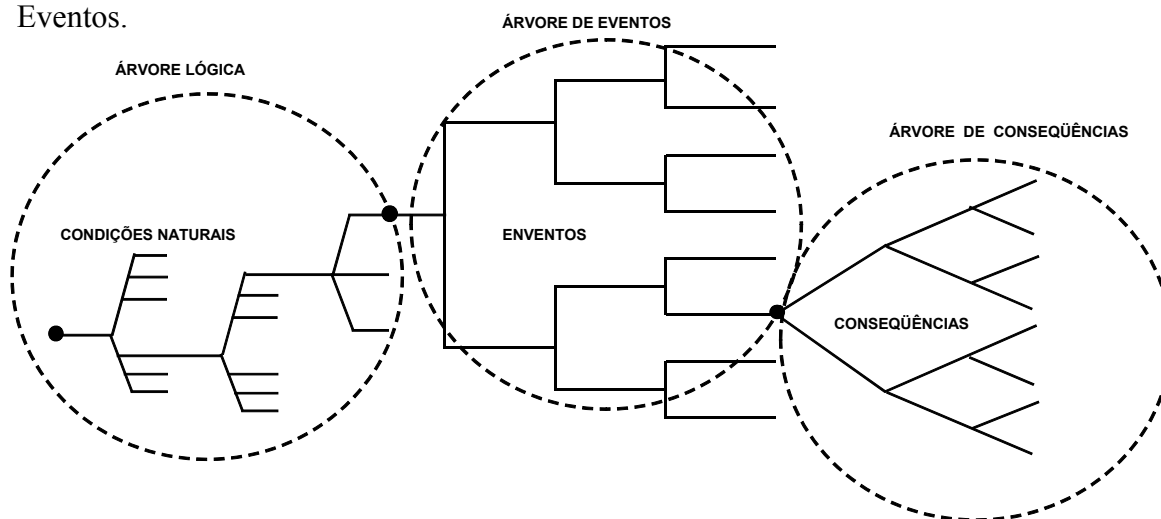
Nesses estudos, foram identificados seis eventos no caminho crítico que leva à formação de *piping*:

- Existência de fluxo concentrado de água no interior do maciço ou na fundação.
- Início de formação de *piping* por gradiente hidráulico crítico ou velocidade de percolação de água suficiente para iniciar *piping*.
- Ocorrência de erosão na base do barramento, ou de que algum outro ponto do maciço venha a erodir, originada pela percolação de água descontrolada.
- Existência de potencial de intervenção, mas este não é praticado no tempo adequado.
- Entubamento contínuo (*pipe*) forma-se no maciço ou na fundação, permitindo acelerar a erosão.
- Ocorrência de brecha pela formação de um canal contínuo ou pelo colapso da crista com vertimento de grande quantidade de água do reservatório.

A avaliação de risco no sistema envolve a construção da Árvore de Eventos, representada pela união de estruturas de resultados da união de eventos. Associada à Árvore de Eventos, é

conveniente que se elabore o diagrama lógico. Completando a avaliação, faz-se a árvore de conseqüências, como mostra a Figura 3.16.

A árvore de conseqüências procura demonstrar eventos que ocorrem depois de ocorrer a ruptura da barragem, como, impactos ambientais associados à ruptura da barragem, perda de vidas ou evacuação de pessoas e impactos físicos sobre o ambiente a jusante do evento. Normalmente, a árvore de conseqüências é tratada de forma independente da Árvore de Eventos.



**Figura 3.16** – Árvore de conseqüências como resultado da união de eventos  
Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 213.

Até aqui a Árvore de Eventos foi tratada sob o ponto de vista qualitativo. Ao se considerar o tratamento quantitativo na condução de estimativas de probabilidades, é conveniente que sejam esclarecidos alguns conceitos relacionados a probabilidades condicionais nos ramos da Árvore de Eventos.

Segundo Cummins *et al.* (2003), é importante esclarecer os conceitos usados na avaliação de riscos em barragens. Os dois principais significados de probabilidade são:

- frequência observada de eventos que ocorrem aleatoriamente (probabilidade objetiva),
- confiança em um resultado, baseado na informação e conhecimento, o qual está disponível (probabilidade subjetiva).

Esses dois significados levam a dois conceitos de incerteza:

- variação aleatória em um processo (incerteza aleatória),

- limitações em conhecimento (incerteza sobre os conhecimentos científicos).

Em determinadas situações, freqüentemente haverá a interseção de incertezas provenientes da variação aleatória e incertezas no conhecimento.

A probabilidade condicional de ruptura em uma barragem é um exemplo de confiança em um resultado significativo de probabilidade.

Os pontos críticos em relação a esse tipo de probabilidade são:

- probabilidade estimada, que é o grau de confiança de um resultado obtido pela análise realizada,
- o grau de confiança, que é baseado em evidência, conhecimento e informação disponível para a avaliação,
- estimativa que pode mudar, conforme o conhecimento e as mudanças de informações.

Esse tipo de probabilidade não objetiva representar a realidade sobre o estado da barragem, ou seja, ela não é a propriedade da barragem, mas o reflexo do melhor entendimento das análises de avaliação, dados o conhecimento e as informações relativas à questão em discussão (KAPLAN, 1997 *apud* CUMMINS *et al.*, 2003).

A questão é se as probabilidades subjetivas são justas e não se elas refletem a realidade (ou se não refletem), mas se elas propriamente refletem o conhecimento das incertezas. Portanto, o estudo deve proporcionar adequado entendimento e reprodutibilidade para as mesmas descrições de incertezas e modelos de análises, ou seja, qualquer número de analistas deve chegar aproximadamente aos mesmos valores de probabilidades subjetivas.

Nesse sentido, faz-se necessário reforçar o entendimento sobre o significado de incertezas, que são quaisquer situações em que existam lacunas sobre a certeza (confiança) em determinado resultado. De acordo com o glossário de *Guidelines on Risk Assessment*, Cummins, *et al.* (2003), incerteza é qualquer situação sem certeza, se esta é ou não descrita por uma distribuição de probabilidades. No contexto de segurança de barragens, a incerteza pode ser atribuída a (I) inerente variabilidade em propriedades naturais e eventos que podem ocorrer, e (II) conhecimento incompleto de parâmetros e relações entre valores de entradas e saídas. A incerteza também é usada para se referir as situações em que as probabilidades de

potenciais resultados não pode descrever a função densidade de probabilidades pelo conhecimento disponível.

Os dois tipos de incertezas são a aleatória e a incerteza sobre os conhecimentos científicos (epistêmica). Esses conceitos devem estar claros para as pessoas envolvidas em avaliação de vulnerabilidade das estruturas da barragem.

### 3.6.3 Esquema para mapeamento de probabilidades

Lind e Thedéen (2001) *apud* Cummins (2003) relatam a dificuldade em designar probabilidades para eventos. O problema com muitos dos esquemas de mapeamento são as descrições de grandeza de frequência, que significam coisas diferentes para diversas pessoas. Para se evitar esse tipo de problema, Barneich *et al.* (1996) *apud* Cummins (2003) propõem o uso de uma tabela da ordem de grandeza de probabilidades associadas às descrições que possuam uma base capaz de ser reproduzida por pessoas diferentes.

A Tabela 3.21 mostra esses descritores e suas respectivas probabilidades em ordem de grandeza. Essa Tabela foi validada por extensa prática, por seguidas revisões em análises probabilísticas em barragens, realizadas por engenheiros e especialistas. O uso da tabela a seguir foi resultado de pesquisa sistemática de dados disponíveis em fontes, como: Foster e Fell, 1999; Foster e Fell, 2000; Foster *et al.*, 2000b; Hinks e Gosschalk, 1993; Idriss *et al.*, 2002; ICOLD, 1973; ICOLD, 1995; Pells e Fell, 2002; Pells e Fell, 2003; USCOLD, 1975 e USCOLD, 2000, referências citadas por CUMMINS (2003).

**Tabela 3.21** – Esquema de mapeamento de probabilidades

Descrição da condição ou evento	Ordem de magnitude da probabilidade
Ocorrência é virtualmente certa.	1
Ocorrências da condição ou evento são observadas na base de dados.	$10^{-1}$
A ocorrência da condição ou evento não é observada, ou é observada em uma ocorrência isolada, na base de dados disponíveis; muitos cenários de rupturas potenciais podem ser identificados.	$10^{-2}$
A ocorrência da condição ou evento não é observada. É difícil cogitar sobre qualquer cenário de ruptura plausível; entretanto, um único cenário seria possível após considerável esforço em pesquisas.	$10^{-3}$
A condição ou evento não tem sido observado, e não seria identificado cenário plausível.	$10^{-4}$

Fonte: Modificado de CUMMINS *et al.*, 2003, p. 74.



É recomendável que a avaliação de probabilidades, mesmo preliminar, seja realizada em conjunto com no mínimo duas pessoas experientes na estimação de probabilidades.

A avaliação envolve o conjunto de definição dos modos de rupturas, seqüência de eventos, identificação das incertezas e probabilidades. As probabilidades são condicionais entre todos os eventos precedentes que se originam do evento dos quais eles emanam, e sua soma total por par de ramos é igual a um, pela propriedade de serem exclusivos e completos.

A Figura 3.17 representa uma Árvore de Eventos de modos de liquefação da fundação em uma barragem. O sucesso seria não haver ocorrência de liquefação na fundação. Os eventos associados com a estrutura da barragem não são relevantes para o evento de ruptura da barragem. Portanto, a probabilidade condicional de performance de sucesso da estrutura da barragem depende de o sistema primário, a fundação, o desempenho de sucesso ou não de se liquefazerem ou de o solo possuir característica de se liquefazer. Os valores numéricos de probabilidades na Figura 3.17 sugerem possíveis diferenças. As probabilidades para cada par de eventos têm a soma igual a 1,0. Esses pares de eventos devem incluir todos os possíveis modos de eventos que poderiam ser obtidos. A probabilidade total para um determinado conjunto de eventos ou ramo da árvore é obtida pela multiplicação da seqüência de probabilidades condicionais.

Assim, a maior probabilidade é:

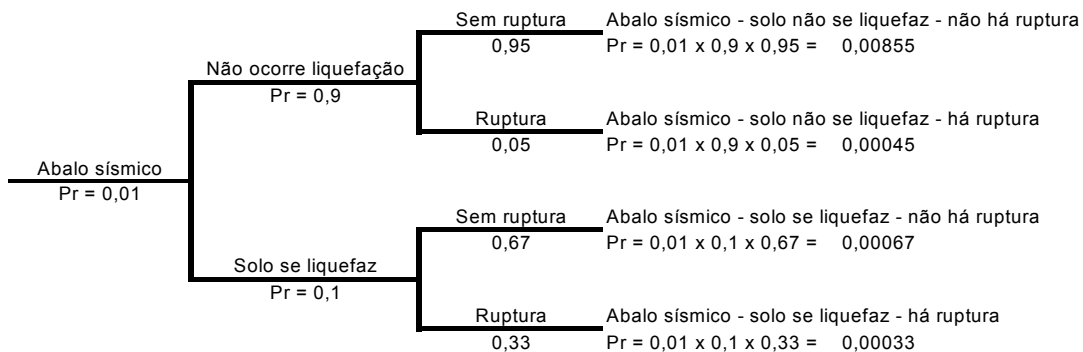
$$\text{Pr [sem ruptura E sem liquefação E abalo sísmico]} =$$

$$= \text{Pr [sem ruptura / sem liquefação E abalo sísmico]} \times \text{Pr [sem liquefação/ abalo sísmico]} \times \text{Pr [abalo sísmico]} \quad (3.3)$$

$$= 0,95 \times 0,9 \times 0,01$$

$$= 0,00855$$

EVENTO INICIAL	LIQUEFAÇÃO DA BARRAGEM	RUPTURA DA BARRAGEM	SUCESSÃO DE EVENTOS
----------------	------------------------	---------------------	---------------------



**Figura 3.17** – Árvore de Eventos e dependências entre probabilidades

Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 216.

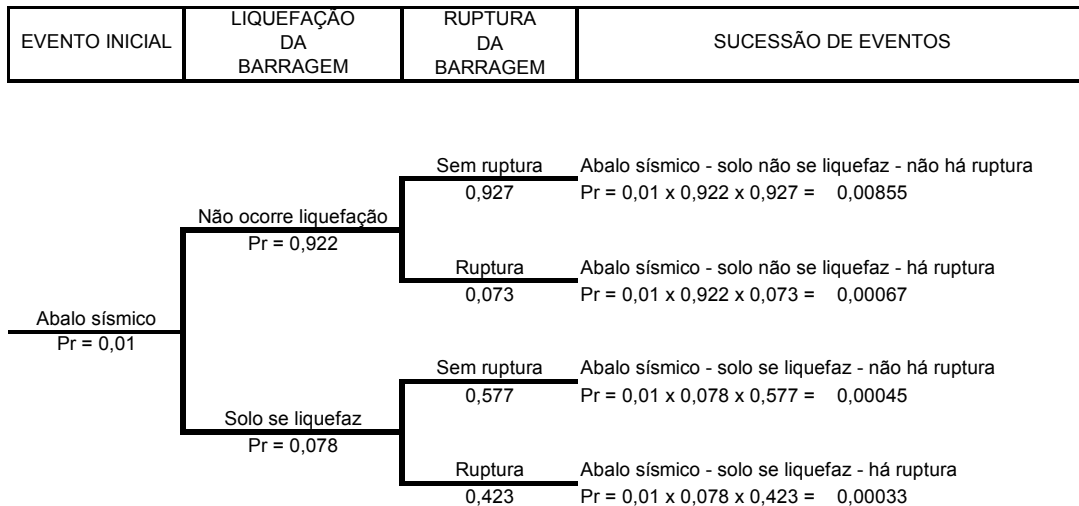
A soma da união de probabilidades de todos os ramos de eventos que emanam de um evento iniciador deve ser igual à probabilidade marginal do evento iniciador. Assim, a soma das probabilidades das conseqüências na árvore é:

$$0,01 = 0,00855 + 0,00045 + 0,00067 + 0,00033$$

Sendo essa a probabilidade marginal do evento abalo sísmico.

As Figuras 3.17 e 3.18 mostram, pelo teorema da probabilidade total (Benjamin e Cornell, 1970 *apud* Hartford e Baecher, 2004), que a seqüência das probabilidades condicionais pode ser invertida, podendo-se escrever a probabilidade da interseção dos eventos da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 & \Pr [\text{não há liquefação do solo } \mathbf{E} \text{ sem ruptura } \mathbf{E} \text{ abalo sísmico}] = \\
 & = \Pr [\text{não há liquefação/ sem ruptura } \mathbf{E} \text{ abalo sísmico}] \times \Pr [\text{sem ruptura/abalo sísmico}] \times \\
 & \Pr [\text{abalo sísmico}] \tag{3.4} \\
 & = 0,927 \times 0,922 \times 0,01 \\
 & = 0,00855
 \end{aligned}$$



**Figura 3.18** – Árvore de Eventos e probabilidades

Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 217.

A probabilidade condicional 0,927 de não ocorrer liquefação do solo, dado que não houve ruptura da barragem como resultado do abalo sísmico, é determinada pelo teorema de Bayes. Conclui-se que a seqüência de eventos na árvore pode ser rearranjada como foi mostrado na Figura 3.18 e de forma semelhante realizado nas probabilidades condicionais, designadas nos ramos que foram rearrajados.

De acordo com Hartford e Baecher (2004), o modelo aplicado na estimativa estatística para ocorrência de eventos iniciais é a distribuição de Poisson, com um único parâmetro “ $\lambda$ ”, que descreve o número médio de ocorrências por unidade de tempo, usualmente um ano. A FMP (Função Massa de Probabilidades) é representada por:

$$f_n(n / \lambda) = \frac{\lambda^n \cdot e^{-\lambda}}{n!} \quad (3.5)$$

Onde  $n$  é o número de ocorrências, e  $\lambda$  é a taxa média de Poisson por unidade de tempo. A média é constante no tempo. O número de ocorrências no tempo contínuo  $t$  é dado por:

$$f_n(n / \lambda, t) = \frac{(\lambda t)^n \cdot e^{-\lambda t}}{n!} \quad (3.6)$$

A média de  $n$  ocorrências é o valor esperado  $E[n] = \lambda t$  e a variância,  $Var[n] = (\lambda t)$ .

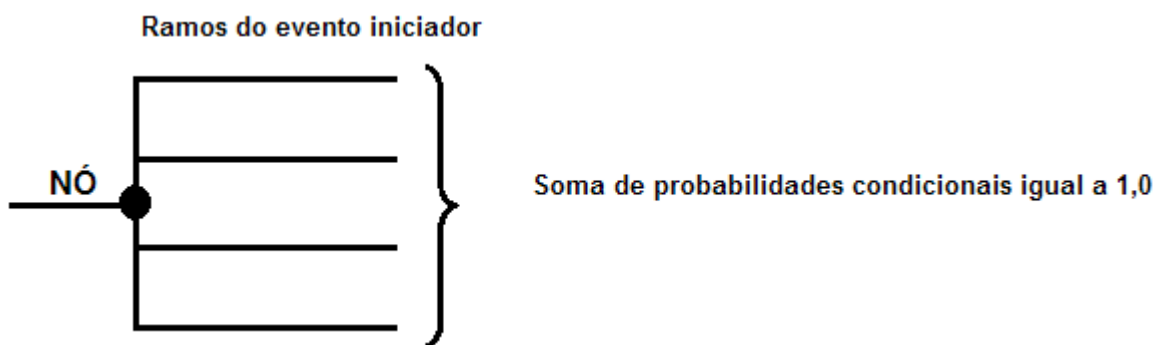
Uma das premissas da distribuição de Poisson é que os eventos ocorram de forma independente um do outro. A ocorrência de um evento não influencia a possibilidade de ocorrência do outro evento no mesmo nó da Árvore de Eventos.

A determinação de probabilidades pela distribuição de Poisson dependeria de dados estatísticos nacionais confiáveis. Como não se dispõe de dados históricos nacionais, ficaria impraticável a determinação do parâmetro dessa distribuição. Optou-se pela avaliação de probabilidades pelo método subjetivo da estimativa através do conhecimento de dados históricos de barragens já estudadas e de dados durante a construção e a operação da barragem em estudo (UHE São Simão - MG).

O cálculo de probabilidades em árvores de eventos envolve a sua simplificação, eliminando ramos que levam a resultados de baixa importância. Se a variabilidade entre ramos é pequena, deve-se reduzi-los a poucos nós. Caso contrário, pode ser necessário desenvolver estudo de sensibilidade para garantir que não haverá significativo erro introduzido na avaliação.

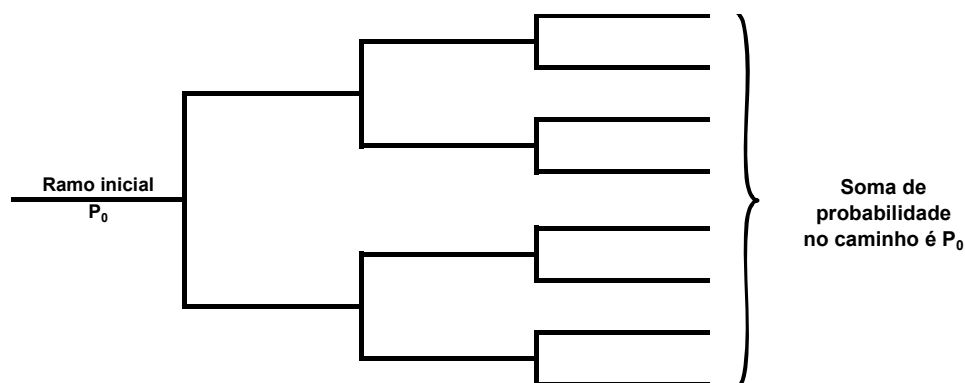
Uma forma de se simplificarem árvores de eventos é parti-las em duas ou mais partes, em ramos que são independentes, mas deixando-se claro que a relevância de seus acontecimentos merece um estudo à parte. Isso facilita a análise e evita-se erros e controvérsias.

Após a simplificação devem-se checar os resultados obtidos pelo princípio de que a Árvore de Eventos é a representação gráfica do espaço amostral de probabilidades. Portanto, a soma de todas as probabilidades e de todos os resultados de um experimento deve ser igual a 1,0, como ilustrado na Figura 3.19. Caso essa propriedade não seja atendida, deve-se verificar por que isso ocorreu e corrigir a deficiência.



**Figura 3.19** – Cálculo de probabilidade em ramos da Árvore de Eventos  
Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 231.

Os eventos que emanam de um nó individual representam eventos mutuamente exclusivos e coletivamente completos. Sabendo-se dessa propriedade, para cada ramo de evento único ou evento iniciador na árvore, a probabilidade total no caminho da união de eventos iniciados naquele ramo e finalizados no nó terminal deveria somar a probabilidade marginal, associada ao ramo iniciador, conforme mostra a Figura 3.20.



**Figura 3.20** – Checagem no cálculo de probabilidade em ramos da Árvore de Eventos  
Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 232.

Outra forma de se checarem os valores de probabilidades na Árvore de Eventos é a comparação com a performance histórica, para mostrar a ordem de grandeza e rever a construção da seqüência de eventos e os valores associados às probabilidades para cada evento. Alguns autores têm estudado e registrado os incidentes e rupturas, tais como Baecher *et al.*, 1979; Foster *et al.*, 2000a; Gruetter, 1982; Gruner, 1967; Jansen, 1980; Serafim, 1984 referências citadas por Hartford e Baecher, 2004.

### 3.6.4 Combinação de probabilidades na análise de vulnerabilidade

A confiabilidade de um sistema de multicomponentes é essencialmente um problema que envolve múltiplos modos de falhas. As falhas de diferentes componentes em uma barragem são constituídas de distintos e diferentes modos de falhas do sistema. A consideração de múltiplos modos de falhas, entretanto, é fundamental para o problema de confiabilidade do sistema. Durante a identificação do modo de falha individual e a avaliação das respectivas probabilidades de falha, pode ocorrer dificuldade em sua determinação. Essa dificuldade está nos conceitos associados à dependência entre probabilidades em cada um dos nós de eventos. A relação de dependência entre probabilidades é explicada em estudo baseado nas argumentações do Teorema do Limite Unimodal de Ang e Tang (1990), transcritas a seguir.

Considere um sistema com  $k$  potenciais modos de falhas e que os diferentes modos de falhas têm diferentes funções de performance. Suponha que a respectiva função de performance possa ser representada como:

$$g_j(X) = g_j(X_1, X_2, \dots, X_n); \quad j = 1, 2, 3, \dots, k \quad (3.7)$$

Para um certo modo individual de falha, pode-se distinguir o evento:

$$E_j(X) = [g_j(X) < 0] \quad (3.8)$$

Do mesmo modo, pode-se distinguir o evento complementar  $\bar{E}_j$ ,

$$\bar{E}_j(X) = [g_j(X) > 0] \quad (3.9)$$

No caso de duas variáveis, os eventos podem ser mostrados na Figura 3.21, em que os três modos de falhas representados pelas equações de estado-limite  $g_j(X) = 0$ ,  $j = 1, 2, 3$  são mostrados.

A segurança de um sistema é o evento no qual nenhum dos  $k$  potenciais modos de falha ocorrem, ou seja:

$$\bar{E} = \bar{E}_1 \cap \bar{E}_2 \cap \dots \cap \bar{E}_k \quad (3.10)$$

Inversamente, o evento falha seria representado por:

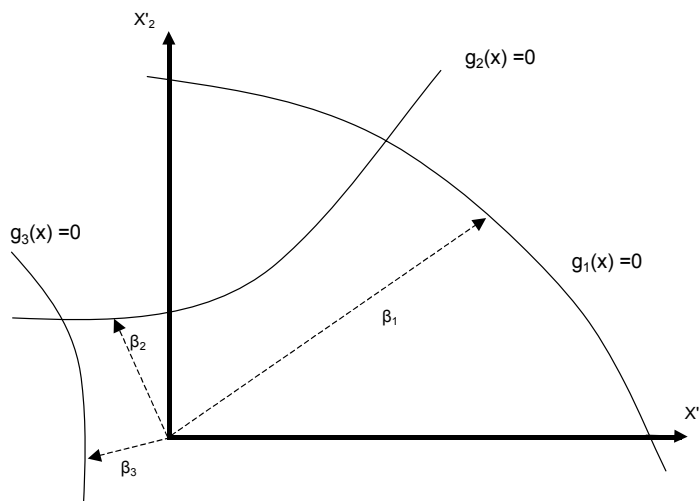
$$E = E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_k \quad (3.11)$$

A equação 3.10 literalmente significa que um ou nenhum dos potenciais modos de falha ocorrem. Teoricamente, entretanto, a probabilidade da segurança do sistema pode ser expressa pela integral da função de probabilidade conjunta do sistema  $n$ -dimensional, ao longo dos  $k$  modos de falhas, dada por:

$$p_S = \int \dots \int_{(\bar{E}_1 \cap \dots \cap \bar{E}_k)} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (3.12)$$

Por outro lado, a probabilidade de falha do sistema é:

$$p_F = \int \dots \int_{(E_1 \cup \dots \cup E_K)} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (3.13)$$



**Figura 3.21** – Múltiplos modos de falha

Fonte: Modificado de ANG e TANG, 1990, p. 449.

Os limites de probabilidades são calculados pela probabilidade de segurança ou falha de um sistema mostrado pelas equações 3.10 ou 3.11, cálculo que geralmente é difícil, por isso trabalha-se quase sempre com aproximações. Esse fato leva a calcular limites inferior e superior das correspondentes probabilidades, como explicado a seguir.

Ang e Tang (1990) propõem primeiramente o conhecimento dos limites unimodais, pela consideração dos modos de falha que são positivamente correlacionados, com  $\rho_{ij} > 0$ , denotando o coeficiente de correlação entre os eventos  $E_i$  e  $E_j$ . Isto significa que, para dois eventos  $E_i$  e  $E_j$ ,

$$P(E_j / E_i) \geq P(E_j) \quad (3.14)$$

ou

$$P(\bar{E}_j / \bar{E}_i) \geq P(\bar{E}_j) \quad (3.15)$$

Entretanto,

$$P(\bar{E}_j \cap \bar{E}_i) \geq P(\bar{E}_i)P(\bar{E}_j) \quad (3.16)$$

Para k eventos, isto pode ser generalizado por

$$P(\bar{E}) = P(\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2 \cap \dots \cap \bar{E}_k) \geq \prod_{i=1}^k P(\bar{E}_i) \quad (3.17)$$

Observa-se que

$$\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2 \cap \dots \cap \bar{E}_k \subset \bar{E}_j \text{ ; para qualquer } j \quad (3.18)$$

e, em particular,

$$\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2 \cap \dots \cap \bar{E}_k \subset \min_j \bar{E}_j \text{ ; } j = 1, 2, \dots, k \quad (3.19)$$

Entretanto,

$$P(\bar{E}) \leq \min_j P(\bar{E}_j) \quad (3.20)$$

A confiabilidade para o *i-ésimo* modo de falha é denotada como:

$$p_{S_i} = P(\bar{E}_i) \quad (3.21)$$

A confiabilidade para todos os potenciais modos de falha como:

$$p_S = P(\bar{E})$$

$p_S$  é, portanto, limitado pelas equações 3.17 e 3.20 como mostrado (ANG e AMIN, 1968 *apud* ANG e TANG, 1990).

$$\prod_{i=1}^k p_{S_i} \leq p_S \leq \min_i p_{S_i} \quad (3.22)$$

Consideravelmente, os correspondentes limites para a probabilidade de falha  $p_F = P(E)$  são representados por:

$$\max_i p_{F_i} \leq p_F \leq 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_{F_i}) \quad (3.23)$$



onde  $p_{F_i} = P(E_i)$  é a probabilidade de falha do  $i$ -ésimo modo. Observe que, para pequenas probabilidades  $p_{F_i}$ , o lado direito da equação 3.23 é:

$$1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_{F_i}) \cong \sum_{i=1}^k p_{F_i} \quad (3.24)$$

Para modos de falha correlacionados negativamente, ou eventos que são negativamente dependentes, em que  $\rho_{ij} < 0$ , nós temos dois eventos  $E_i$  e  $E_j$

$$P(E_j / E_i) \leq P(E_j) \quad (3.25)$$

e

$$P(\bar{E}_j / \bar{E}_i) \leq P(\bar{E}_j) \quad (3.26)$$

Em particular, se  $E_i$  e  $E_j$  são perfeitamente correlacionados negativamente, ou seja,  $\rho_{ij} = -1,0$ , então,

$$P(\bar{E}_j / \bar{E}_i) = P(E_j / E_i) = 0 \quad (3.27)$$

Entretanto,

$$P(\bar{E}_j \cap \bar{E}_i) \leq P(\bar{E}_i)P(\bar{E}_j) \quad (3.28)$$

e

$$P(\bar{E}) = P(\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2 \cap \dots \cap \bar{E}_k) \leq \prod_{i=1}^k P(\bar{E}_i) \quad (3.29)$$

Obviamente,  $P(\bar{E}) \geq 0$ . Assim,

$$p_S \leq \prod_{i=1}^k p_{S_i} \quad (3.30)$$

Inversamente,

$$p_F \geq 1 - \prod_{i=1}^k P(\bar{E}_i) \quad (3.31)$$

A separação entre limites inferior e superior das equações 3.22 e 3.23 dependerá obviamente do número de modos de potenciais falhas e da relativa magnitude das probabilidades individuais de cada modo. Por exemplo, se existe um modo dominante, a probabilidade de segurança ou falha será dominada por esse modo, e poderia ser representada pela probabilidade desse único modo dominante. Em tais casos, os limites seriam estreitos. Em geral, entretanto, os limites podem ser amplamente separados, especialmente se o número de potenciais modos de falha é grande. Os limites acima, citados nas equações 3.22 até 3.31, podem ser chamadas de limites de “primeira ordem” ou “unimodais” das probabilidades  $p_S$  e  $p_F$ , desde que o limite inferior e superior de probabilidades envolvam um único modo de falha.

Quando o cenário de eventos tem vários modos de falha de causa comum, Cummins *et al.* (2003) argumentam sobre a complexidade de determinação das probabilidades em decorrência de um mesmo evento causador. Nesse tipo de cenário, não há um modo prático de estimar a probabilidade condicional total de ruptura, pois ocorrem vários modos individuais de probabilidades de falha. O que pode ser obtido são os limites inferior e superior da probabilidade condicional total estimada para a ruptura. Seguindo a teoria de limites unimodais (ANG E TANG, 1975 *apud* CUMMINS *et al.*, 2003), os limites são determinados como se segue.

O limite superior é determinado pela união dos eventos, de vários modos de falha. A regra de Morgan estima o limite superior de probabilidade condicional da seguinte forma:

$$P_{SB} = 1 - [(1 - P_1) \times (1 - P_2) \times \dots \times (1 - P_n)] \quad (3.32)$$

onde

$P_{SB}$  = estimativa do limite superior da probabilidade condicional de ruptura;

$P_1$  até  $P_n$  = estimativa de vários modos individuais de probabilidades condicionais de falha.

O limite inferior é estimado pela probabilidade condicional máxima, individual, da série de eventos em análise.

Esta aproximação pode ser feita, pois segundo a regra de Morgan citada por Ross (1988):

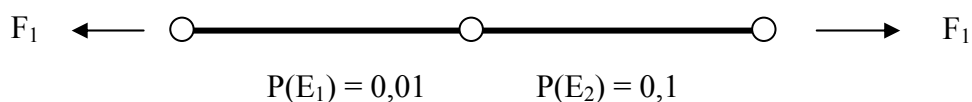
$$\bigcup_1^n \bar{E}_i = \overline{\left(\bigcap_1^n E_i\right)} \quad (3.33)$$

Ou seja, a união dos complementos de eventos é igual ao complemento das interseções entre eventos.

Esse cálculo deve ser feito para a estimativa de probabilidades condicionais de ruptura antes da multiplicação pela probabilidade anual do cenário. Se todas as probabilidades condicionais são pequenas, menores que 0,01, a equação anterior produz o mesmo valor como se fosse obtido pela adição de todas as probabilidades condicionais individuais. Entretanto, é boa prática sempre usar a equação 3.32.

A estimativa do limite inferior é a máxima probabilidade condicional individual. Portanto, modos de ruptura de causa comuns são aqueles que podem acontecer simultaneamente em uma única seção da barragem devido a um único evento iniciador, e modos de falha que podem acontecer simultaneamente em múltiplas seções de uma barragem devido a um único evento iniciador.

Essas expressões podem ser melhor entendidas pelo exemplo descrito a seguir. Em um sistema hipotético composto da união de elos, por dois cordões tracionados pela força  $F_1$ . Estes cordões têm probabilidades de romperem-se como mostra a Figura 3.22.



**Figura 3.22** – Sistema de eventos: probabilidades pelo modo de falha unimodal

A probabilidade final do sistema é determinada por:

$$p_F = p(E_1 \cup E_2) = p(E_1) + p(E_2) - p(E_1 \cap E_2) \quad (3.34)$$

Como a probabilidade condicional é

$$p(E_2 / E_1) = \frac{p(E_1 \cap E_2)}{p(E_1)} \quad (3.35)$$

Assim

$$p(E_1 \cap E_2) = p(E_2 / E_1) \cdot p(E_1) \quad (3.36)$$

A análise pode ser feita para dois cenários:

a) Os eventos têm probabilidades independentes

Como

$p(E_2 / E_1) = p(E_2)$ , pois as probabilidades são independentes

$$p_F = p(E_1 \cup E_2) = 0,01 + 0,1 - (0,01 \times 0,1) = 0,109 \quad (3.37)$$

b) Os eventos têm probabilidades dependentes, com forte correlação aproximadamente igual a 1.

Então

$$p(E_2 / E_1) = 1 \quad (3.38)$$

$$p_F = p(E_1 \cup E_2) = 0,01 + 0,1 - (0,01 \times 1) = 0,1 \quad (3.39)$$

Portanto de acordo com as equações 3.22 e 3.23 a probabilidade está entre os limites

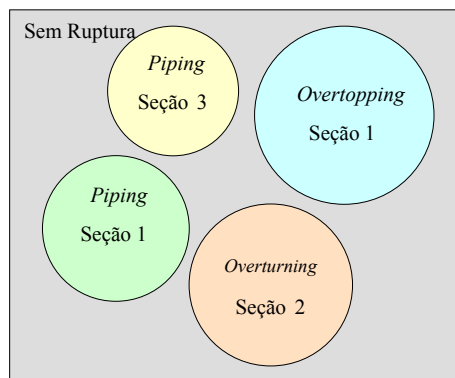
$$0,1 \leq p_F \leq 0,109 \quad (3.40)$$

Observa-se que o limite inferior da probabilidade final é próxima da probabilidade individual do evento dominante e o limite superior ( lado direito da equação 3.40) é aproximadamente a soma dos eventos parciais, como mostra a equação 3.24.

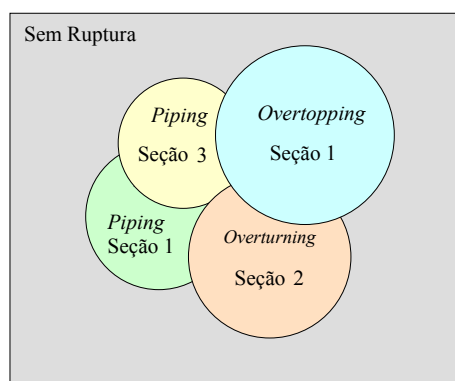
A probabilidade total de ruptura de uma barragem é uma combinação de probabilidades de falhas que são associadas a cada possível modo de ruptura. Nesse sentido Hill *et al.* (2003)

propõem o método descrito a seguir. A Figura 3.23 mostra dois hipotéticos diagramas de Venn para um ponto particular no galgamento de um barragem em resposta à determinada função (por exemplo, para um reservatório com determinado nível de pico). O hipotético caso tem três seções, e os modos de ruptura significativos são induzidos por *piping* através do barramento e *overtopping* na Seção 1, que destrói a seção de concreto que trabalha por gravidade na Seção 2, e *piping* pelo barramento na Seção 3.

A Figura 3.23a mostra o diagrama de Venn quando os modos de ruptura são mutuamente exclusivos. Para esse caso a probabilidade para o modo de ruptura é feita por simples adição. Porém, na maioria de casos, os modos de ruptura não são mutuamente exclusivos, portanto a probabilidade total não é resultado da adição das probabilidades dos eventos parciais, como é mostrado na Figura 3.23a. Para esses casos as probabilidades precisam ser combinadas cuidadosamente entre os eventos de causas comuns, representados no diagrama de Venn através da interseção de cada evento de modo de ruptura, Figura 3.23b.



(a) Modos de ruptura mutuamente exclusivos



(b) Modos de ruptura de causa comuns

**Figura 3.23** – Diagrama de Venn: mostra a probabilidade condicional de rupturas  
Fonte: Modificado de HILL et al., 2003, p.4.

Um Ajuste de Causa Comum (CCA – Common Cause Adjustment) deve ser usado quando modos de ruptura não são mutuamente exclusivos. Isso deve ser feito quando há um tipo particular de mecanismo de falha em uma seção, podendo levar simultaneamente à falha em outra seção, ou mesmo a outra falha na mesma seção, por outro mecanismo de falha.

Ocorrendo probabilidade condicional de falha baseada na interseção de todos os mecanismos de falha, o diagrama de Venn torna-se 1,0, e dois casos podem ocorrer. O primeiro é quando a descarga da brecha é suficiente para antecipar a ocorrência de uma brecha adicional. O segundo é quando o nível do reservatório permanece alto o bastante para iniciar desenvolvimento de outras brechas.

No segundo caso, como brechas adicionais ocorrem em nível de pico do reservatório, conseqüências adicionais devem ser consideradas como resultado de descargas de cada brecha. Esse tipo de descarga pode provocar aumento de fluxo de água em brechas iniciais provocadas por outro tipo de mecanismo. Um exemplo desse fato ocorre quando uma barragem tem múltiplos tubos (*pipes*), podendo resultar em desenvolvimento de várias brechas no barramento.

A ocorrência de mais de uma brecha não altera a probabilidade de a ruptura "A" ocorrer. Porém, o modelo de cálculo de risco pode ser usado para inferir a probabilidade de diferentes números de brechas e de fluxos de brechas em diferentes fendas/trincas.

As probabilidades condicionais para modos de ruptura que não são mutuamente exclusivos podem ser ajustadas para ocorrência de causa comum pelo uso do Teorema do Limite Unimodal, como foi mostrado anteriormente. Esse ajuste deve ser feito simultaneamente sobre todas as seções do barramento e calculado separadamente em cada intervalo de probabilidades para cada tipo de carregamento.

Hill *et al.* (2003) recomendam os seguintes passos na aplicação do método:

- Fazer estimativas de probabilidades condicionais (probabilidades de resposta de sistema) sobre toda faixa de carregamento para cada modo de ruptura como se eles fossem mutuamente exclusivos de todos os outros modos de falha.
- Reduzir as probabilidades condicionais de ruptura para o(s) modo(s) refletir (em) o efeito do modo de falha dominante.

Um fato a ser considerado é a estimativa de risco de segurança para a probabilidade de ruptura e as conseqüências dessas falhas (por exemplo, perdas de vidas). Essas estimativas podem, então, ser usadas para avaliar o risco associado em barragem existente e a justificativa para versões aperfeiçoadas dos guias de avaliação.

A maioria dos guias de avaliação de risco é baseada em probabilidade total de ruptura ou perda de vida. Portanto, isto requer apropriada combinação de probabilidades de diferentes modos de falha nas seções da barragem. Exemplos de modos de ruptura de causa comuns incluem múltiplos modos de falha que podem acontecer simultaneamente em uma única seção do barramento devido a um único evento que se inicia, ou modos de falha que podem acontecer simultaneamente em seções múltiplas de um maciço, também devido a um único evento iniciador.

### ***3.7 Exemplo de aplicação de avaliação de segurança por Árvore de Eventos***

Silveira e Machado (2005) realizaram estudos numa barragem em construção, denominada João Leite, pertencente à companhia SANEAGO (Companhia de Saneamento de Goiás S/A). Essa barragem está localizada no ribeirão João Leite, a cerca de 6,5 km a montante da cidade de Goiânia, cidade que possui população de 1.150.000 habitantes. Sua função é abastecer de água a cidade. É uma barragem construída em concreto compactado a rolo (CCR), com 53 m de altura, completada por diques de terra. O volume útil do reservatório é 117 milhões de m<sup>3</sup> de água.

A análise de risco envolveu:

- avaliação detalhada do projeto executivo da barragem,
- levantamento histórico de acidentes/incidentes em obras semelhantes,
- avaliação dos cenários de ruptura em potencial e suas implicações a jusante,
- construção das árvores de eventos e cálculo das probabilidades de ruptura da barragem,
- estudo de medidas de atenuação,
- estabelecimento de um PAE – Plano de Ação Emergencial,
- elaboração de Manual de Supervisão e Acompanhamento de Comportamento das Estruturas do Barramento.

Foi feita a análise de risco pelo método de Árvore de Eventos, pois as interações de todas as possíveis combinações de eventos e suas conseqüências permitiram avaliar a probabilidade anual desses eventos.

Na avaliação da barragem João Leite, foram pesquisados acidentes com barragens semelhantes, verificando-se o comportamento histórico das estruturas do barramento, pelos dados de inspeções de campo e dados de instrumentação. Esse estudo teve a participação de 10 técnicos em *workshops*.

Foram analisados vários cenários críticos para a segurança da barragem em relação a prováveis eventos. Dentre os vários cenários identificados, destacam-se os eventos relacionados à barragem de terra:

- galgamento da barragem,
- erosão interna através da interface solo-concreto,
- erosão interna pela fundação.

A possibilidade de ocorrência de erosão interna e formação de entubamento (*piping*) foram analisadas na interface solo-concreto, na lateral dos muros de ligação direito e esquerdo e também através da fundação.

As árvores de eventos foram construídas considerando-se duas alternativas:

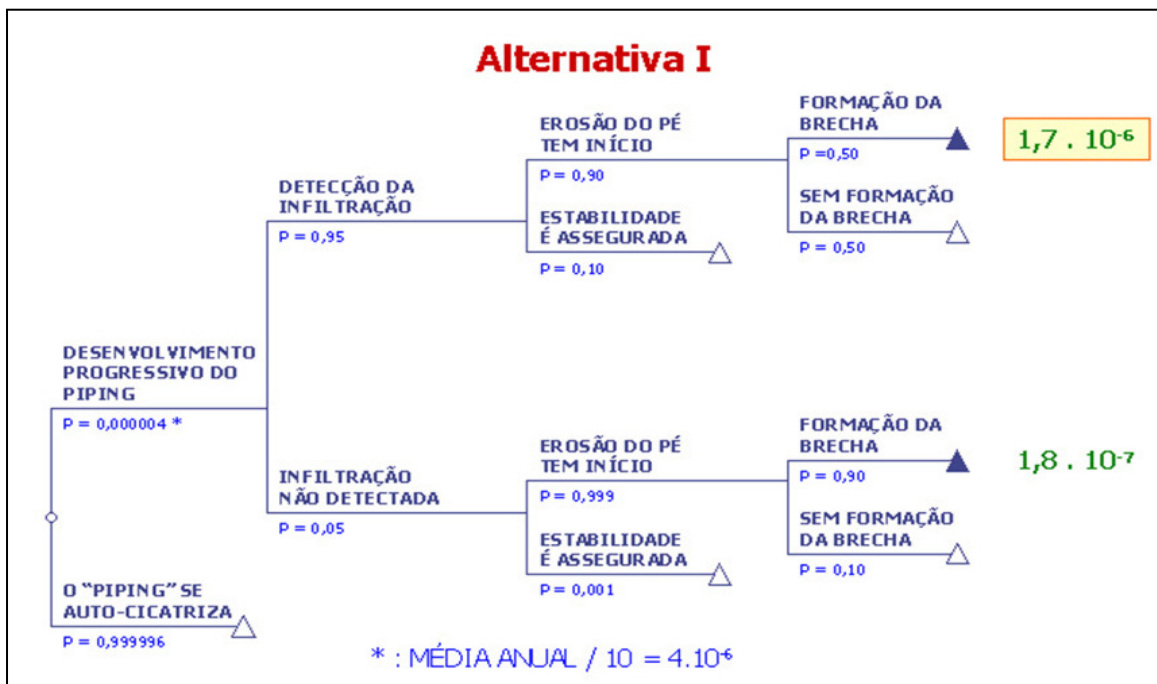
**Alternativa I** – considerou maiores riscos se não houvesse tratamento da fundação, inadequado controle tecnológico no maciço, incerteza no sistema de drenagem interna da barragem e na fundação, e inexistência de um plano de auscultação confiável;

**Alternativa II** – considerou tratamento da fundação, adequado controle tecnológico na construção do barramento, plano de instrumentação e auscultação das obras civis, e monitoramento de campo.

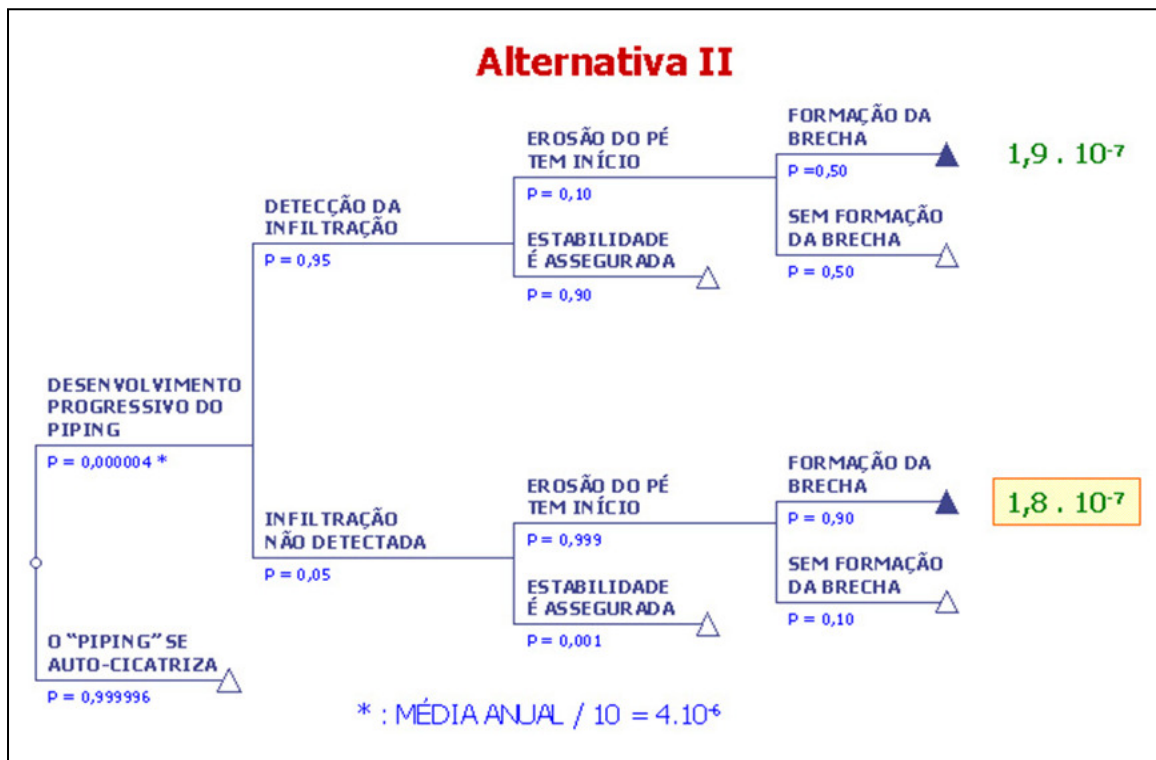
As árvores de eventos foram elaboradas para eventual erosão interna através da interface solo-concreto, na barragem do lado direito, onde o gradiente hidráulico é maior, e o maciço possui altura de 50 m. Outro cenário de *piping* foi considerado, avaliando-se a possibilidade de sua ocorrência através da fundação. Nesse caso a probabilidade média anual é de  $2 \times 10^{-5}$ , segundo dados da ANCOLD – Australian Committee in Large Dam. Silveira e Machado



(2005) consideraram que a probabilidade anual fosse dividida por 10, devido às boas condições de controle, na situação da alternativa II. Exemplos de árvores de eventos elaboradas nesse estudo são mostradas nas Figuras 3.24 e 3.25.



**Figura 3.24** - Árvore de Eventos para Alternativa I – Erosão interna pela interface C/S  
Fonte: Modificado de SILVEIRA e MACHADO, 2005, anexo.

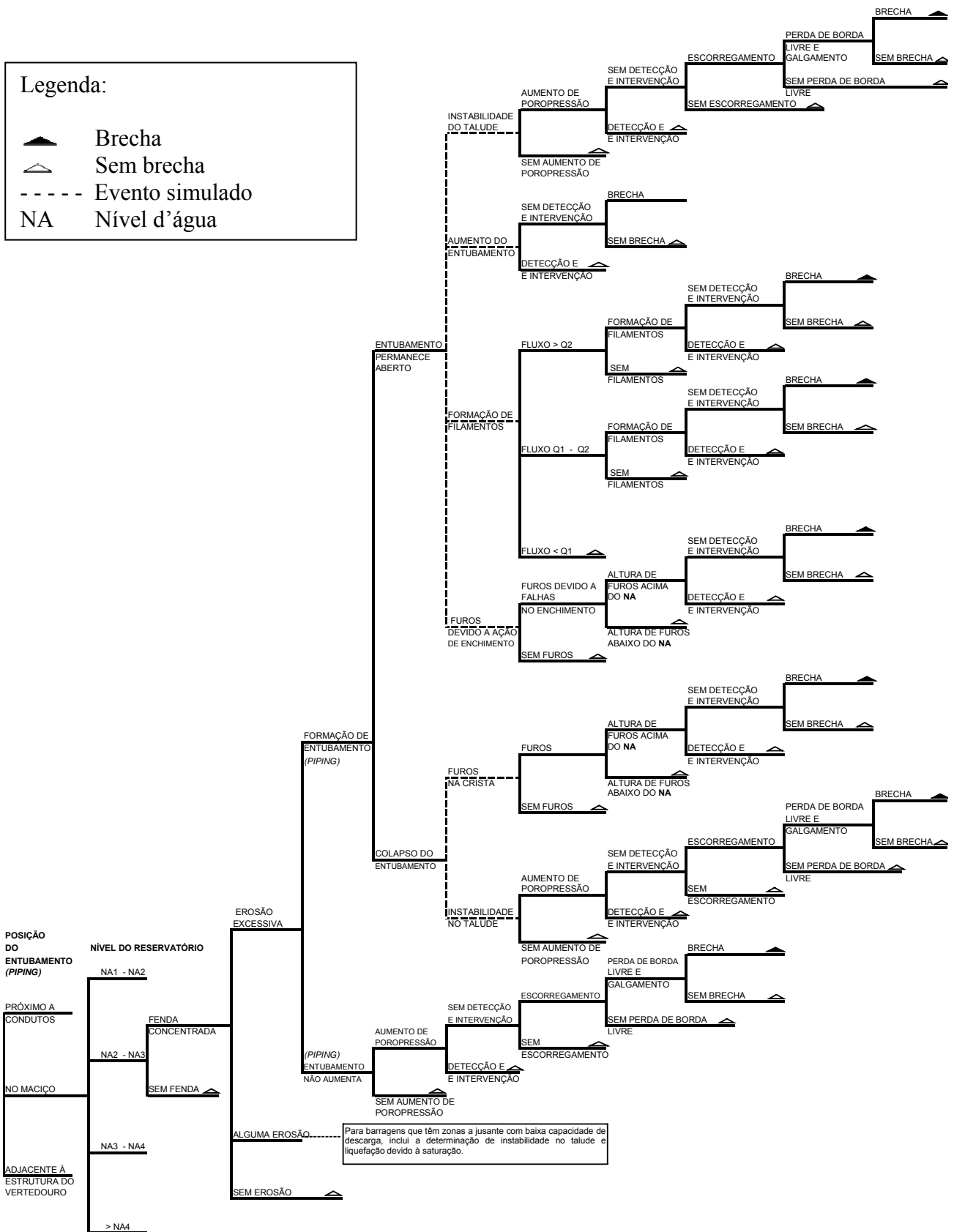


**Figura 3.25** - Árvore de Eventos para Alternativa II – Erosão interna pela interface C/S  
Fonte: Modificado de SILVEIRA e MACHADO, 2005, anexo.

O risco total foi avaliado pela soma das probabilidades anuais, individuais para cada tipo de risco, como: galgamento, erosão interna pela fundação, erosão interna na interface concreto-solo e escorregamento. Silveira e Machado (2005) concluíram que as árvores de eventos identificaram cenários de maior probabilidade de ruptura, pois simularam erosão interna da fundação dos aterros ou através da interface concreto-solo.

Os autores concluíram que as árvores de eventos foram capazes de mostrar os cenários mais prováveis de ruptura, ou seja, a possível ruptura através da fundação dos aterros ou através da interface concreto-solo, na região dos abraços direito e esquerdo.

Outro exemplo de Árvore de Eventos ilustra a aplicação do método, como é mostrado na Figura 3.26. Observa-se que os eventos representam a formação de *piping* em maciço de barragem de terra.



**Figura 3.26 – Árvore de Eventos por *piping* através do barramento**

Fonte: Modificado de FOSTER, 1999 *apud* Ramos, 2005, p. 43.

## 4 METODOLOGIA

O capítulo apresenta dois métodos usados nesta dissertação, primeiramente o método de performance histórica, denominado UNSW (University of New South Wales, Sydney – Austrália) e a seguir o outro método de avaliação qualitativa, chamado de Análise por Árvore de Eventos, ETA (Event Tree Analysis). Os dois métodos foram usados nesta dissertação para análises comparativas entre seus resultados. Estas análises são apresentadas no capítulo 7, conclusões e recomendações.

No primeiro método, UNSW, é explicado como foram definidos os fatores de pesos adotados a partir das estatísticas apresentadas no capítulo 3, com justificativas e aplicação do método no capítulo 5.

No segundo método, ETA, é apresentado como foi conduzida a elaboração das árvores de eventos em seis passos, com a busca de informações de projeto, construção e monitoramento da barragem em estudo.

### **4.1 Método de avaliação da probabilidade pela performance histórica da barragem**

O método descrito a seguir foi baseado no desenvolvimento realizado por Foster *et al.* (1998), na universidade UNSW (University of New South Wales, Sydney – Austrália), que é baseado no conhecimento das características da barragem em comparação com a performance histórica de barragens semelhantes. A eficiência do método depende de informações da barragem, como tipo de núcleo, método de compactação e geologia da fundação. A aplicação envolveu o ajuste de probabilidades médias históricas de rupturas pelos três modos de *piping*, no barramento, na fundação e do barramento para a fundação.

Após esse conhecimento, ajustes foram feitos através de fatores de pesos, multiplicados pela probabilidade média de ruptura. As calibrações dos fatores de pesos foram demonstradas no capítulo 3 e no capítulo 5, em cada tabela do banco de dados fornecido pela UNSW e analisadas as características de incidentes em barragens semelhantes. As probabilidades médias de rupturas por cada um dos três modos (TAB. 5.1) foram ajustadas por fatores de pesos, apresentados no capítulo 5.

#### **4.1.1 Aplicação do método UNSW**

O método consistiu em se conhecerem os dados para análise em tabelas do banco de dados fornecidos pela UNSW, denominado ERDATA1. Nesse sentido, procurou-se conhecer:

- o ano de construção da barragem,
- a altura máxima do barramento,
- o método construtivo do barramento, em especial do núcleo. Controle tecnológico das camadas do barramento, os dados de grau de compactação e umidade ótima aplicados à compactação,
- o material aplicado no núcleo e sua classificação de acordo com a origem geológica,
- o material aplicado em filtros, resultados de ensaios de granulometria dos materiais, inclusive como foi construída a transição entre núcleo e taludes do barramento,
- os dados de monitoramento do maciço, em especial o primeiro enchimento até os cinco primeiros anos de operação.

Os dados obtidos foram analisados para gerar informações que apoiaram a estimativa de fatores de ajuste da probabilidade histórica. Esses dados e informações estão apresentados no estudo de caso, capítulo 5 desta dissertação.

Alguns estudos semelhantes foram pesquisados, conforme mostra a referência bibliográfica. Durante a aplicação do método UNSW (University of New South Wales) foram elaboradas e revisadas várias versões de árvores de eventos, apresentadas no capítulo 6 desta dissertação. A aplicação desse método consiste na determinação de fatores de pesos, que são obtidos pela multiplicação de pesos individuais, conforme descrito a seguir.

#### **4.1.2 Método de estimativa de probabilidades**

A coleta de dados foi feita seguindo um roteiro de itens, na forma de lista de verificações, apresentada no APÊNDICE A desta dissertação. Após a coleta da massa de dados, esses foram tratados por análise comparativa com as tabelas e planilhas do banco de dados ERDATA1. As análises e informações foram submetidas a verificações por engenheiro do corpo técnico da CEMIG, e revisões e novas pesquisas foram realizadas. Após as reanálises, foram estimadas as probabilidades para cada modo de *piping*.

A seqüência de ações, da obtenção de dados até a estimativa da probabilidade para a barragem em estudo, adotou os passos descritos a seguir.

Primeiramente, foi necessário conhecer o tipo de seção e o ano de construção da barragem, para saber o tempo em que está em operação. Com esses dados na Tabela 5.1 (capítulo 5), obteve-se o valor da probabilidade média histórica para o modo de ruptura em análise. Essas probabilidades foram ajustadas por fatores de pesos definidos nas tabelas apresentadas no capítulo 5 e Tabelas 5.21, 5.22 e 5.23, que estão colocadas no final capítulo 5, para facilitar a consulta e servir de síntese de todos os fatores de pesos usados.

A escolha do primeiro fator de peso foi associada às características da seção e à faixa de probabilidades qualitativas de acordo com as condições de cada característica, classificadas como: muito mais provável, mais provável, neutro, menos provável e muito menos provável.

A escolha dos fatores de pesos a serem multiplicados pela probabilidade média histórica foi feita com base nas características da seção do barramento, como:

- filtros,
- origem geológica dos materiais usados no núcleo,
- tipo de solo do núcleo e sua classificação padronizada,
- compactação do núcleo (controle tecnológico),
- tubulações, se usadas ou não no maciço,
- tipo de tratamento usado na fundação,
- valores de descargas observadas, inclusive sua variação ao longo do tempo,
- freqüência de monitoramento e supervisão da barragem.

O passo seguinte foi a avaliação da probabilidade qualitativa do modo de ruptura pela multiplicação dos valores de fatores de pesos obtidos das tabelas (capítulo 5) pelos dados da probabilidade média histórica anual (TAB. 5.1, capítulo 5). A probabilidade anual de ruptura por *piping* para a barragem em estudo foi obtida pela soma das probabilidades no barramento, na fundação e do barramento para fundação.

A base de escolha de fatores de peso foi demonstrada por Foster *et al.* (1998), por meio da equação:

$$W_E = W_{E(\text{filt})} \times W_{E(\text{cgo})} \times W_{E(\text{cst})} \times W_{E(\text{cc})} \times W_{E(\text{con})} \times W_{E(\text{ft})} \times W_{E(\text{obs})} \times W_{E(\text{mon})} \quad (4.1)$$

Onde os fatores significam:

$W_E$  – Fator total de peso (E – *embankment*)

$W_{E(\text{filt})}$  – Fator devido ao uso filtro no barramento (filt - *filter*)

$W_{E(\text{cgo})}$  – Fator de origem geológica dos materiais do núcleo (cgo – *core geological origin*)

$W_{E(\text{cst})}$  – Fator devido ao solo do núcleo (cst – *core soil type*)

$W_{E(\text{cc})}$  – Fator devido a compactação do maciço (cc – *core compaction*)

$W_{E(\text{con})}$  – Fator devido ao uso de tubulações no barramento (con – *conduits*)

$W_{E(\text{ft})}$  – Fator devido a tratamento na fundação (ft – *foundation treatment*)

$W_{E(\text{obs})}$  – Fator devido a observações de descarga (obs – *observations of seepage*)

$W_{E(\text{mon})}$  – Fator devido ao monitoramento de parâmetros geotécnicos (mon- *monitoring*)

A probabilidade anual de ruptura por *piping* ( $P_p$ ) sintetiza os pesos das probabilidades de ocorrência no barramento, na fundação e do barramento para fundação.

Portanto:

$$P_p = W_E \times P_e + W_F \times P_f + W_{EF} \times P_{ef} \quad (4.2)$$

$W_E$  – Fator total de peso no barramento (E – *embankment*)

$W_F$  – Fator total na fundação (F – *foundation*)

$W_{EF}$  – Fator total do barramento para fundação (EF – *embankment into the foundation*)

$P_e$  – Probabilidade de ruptura no barramento

$P_f$  – Probabilidade de ruptura na fundação

$P_{ef}$  – Probabilidade de ruptura do barramento para fundação

Os fatores de pesos foram usados de acordo com as características da barragem, inclusive a geologia da fundação. Aqueles com maiores valores foram escolhidos na determinação da probabilidade, representando a condição mais desfavorável.

Os fatores de pesos foram calibrados de acordo com a frequência de rupturas por determinado motivo, por exemplo:

$$\text{Fator de peso } (w_x) = \frac{\% \text{ de casos de falha com particular característica}}{\% \text{ de barragens com particular característica}} \quad (4.3)$$

Validações intermediárias foram feitas e apresentadas nas tabelas do capítulo 5, na determinação de fatores de pesos.

$$\Sigma (\text{fatores de pesos} \times \% \text{ população de barragens}) = 100\%.$$

O método proporcionou a determinação de probabilidades anuais de ruptura.

#### **4.1.3 Limitações do método UNSW**

O método apresenta critérios qualitativos que o limitam, pois os fatores de pesos são baseados em poucas ocorrências de acidentes e rupturas. Esse fato pode induzir a subestimação ou superestimação sobre a influência desses fatores.

As probabilidades de rupturas são baseadas em grandes barragens com altura superior a 15 m, comprimento da crista superior a 500 m, capacidade do reservatório superior a  $10^6 \text{ m}^3$  e o fluxo máximo vertido superior a  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Portanto, o método pode subestimar a probabilidade de ruptura se aplicado a pequenas barragens.

As análises de fatores de pesos assumem que esses são independentes, entretanto, é provável a existência de dependências entre alguns dos fatores. Como esses são multiplicados entre si, pode haver sobreposição e/ou duplicação de fatores de pesos, havendo sub ou super valorização de alguns. Como é um método de avaliação qualitativa, deve-se ter cuidado, pois trata-se de eventos de baixíssima probabilidade.

## **4.2 Avaliação da vulnerabilidade em barragens por Árvore de Eventos - ETA**

### **4.2.1 Processo de construção da Árvore de Eventos**

A Árvore de Eventos foi elaborada após estudos do fenômeno de progresso da erosão regressiva nas barragens de terra de São Simão. Adicionalmente a esse conhecimento, verificaram-se as opções de projeto na implantação da barragem, fatores condicionantes geológicos do local de implantação da barragem, métodos usados na construção do maciço e respectivo controle de qualidade, relatos do primeiro enchimento, informações sobre os



primeiros cinco anos de operação e como têm sido tratados os problemas durante a operação do sistema, com dados da instrumentação e obras de recuperação realizadas.

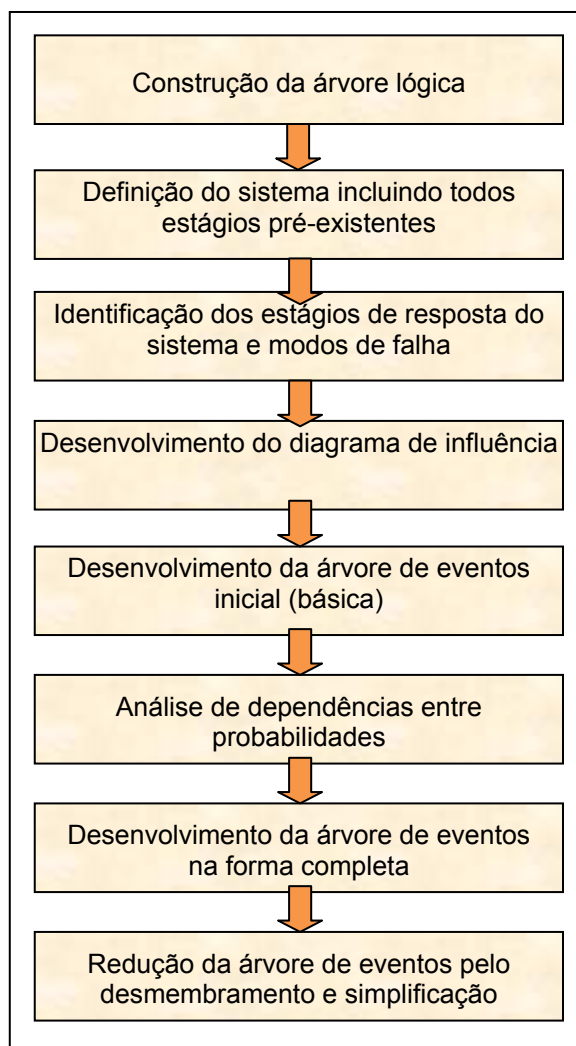
Para fundamentar as informações obtidas no acervo técnico da CEMIG, foi conduzida visita técnica às instalações da barragem em estudo, em janeiro de 2007 (UHE – São Simão – MG) e realizadas reuniões de ajustes de conceitos e informações junto ao corpo técnico da GA/SM – Gerência de Segurança de Barragens e Manutenção Civil – CEMIG.

Essas informações possibilitaram o entendimento dos vários estágios do sistema em análise, que são: fase de construção, primeiro enchimento, cinco primeiros anos de operação e monitoramento de dados.

Os eventos foram combinados em uma seqüência lógica, e formaram diagramas de influência para apoiar a elaboração dos ramos lógicos das árvores de eventos. O diagrama de influência serviu para definir as seqüências de eventos que são associados ao evento iniciador.

Durante a elaboração da Árvore de Eventos, foram respeitados alguns pressupostos. Hartford e Baecher (2004) recomendam considerar somente eventos relacionados fisicamente ao desenvolvimento do fenômeno em análise. Os pressupostos de probabilidades também foram considerados. Em cada nó ramificado, as probabilidades são consideradas de igual chance, mutuamente exclusivas e coletivamente completas. Na elaboração dos ramos, a relação entre cada par de probabilidades, na seqüência lógica, respeitou a dependência entre essas, em atendimento ao teorema de Bayes, observando que somente as probabilidades devem ser dependentes e não necessariamente os eventos físicos.

A Figura 4.1 ilustra os passos tomados na elaboração da Árvore de Eventos.



**Figura 4.1** – Passos na construção da Árvore de Eventos

Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 58.

Durante a elaboração da Árvore de Eventos, houve o cuidado para que ela não ficasse grande e complexa. Ela foi submetida a revisões para simplificar a descrição da realidade sem negligenciar aspectos essenciais (DUESENBERRY, 1958 *apud* HARTFORD e BAECHER, 2004).

A pesquisa foi baseada nas recomendações descritas por Cummins *et al.* (2003), que relata a importância de informações para a avaliação de sistemas. Deve-se procurar obter registros que fundamentam o processo de avaliação de segurança da barragem em estudo. Durante a pesquisa, direcionaram-se esforços na obtenção das seguintes informações:

- relatórios de planos de opções,
- relatórios de planos conceituais,

- relatórios geológicos\*,
- relatórios de investigações no local\*,
- relatórios de investigações de materiais\*,
- relatórios de projetos\*,
- memórias de cálculos de projeto,
- registros de discussões com projetistas,
- definições de impactos ambientais,
- relatórios de construção\*,
- fotografias da construção\*,
- relatórios de registros geológicos\*,
- mapeamento geológico\*,
- projetos/desenhos como construído\* (*as-buit*),
- detalhes completos de quaisquer modificações realizadas na barragem\*,
- relatórios de inspeções de segurança\* (rotineiros, anuais e abrangentes),
- registros de monitoramento da instrumentação e respectivos gráficos\*,
- diários de operação da barragem,
- relatórios de revisões de aspectos de segurança da barragem\*,
- relatórios de inspeções\* (CUMMINS, 2003, p. 61).

Os tópicos indicados por asterisco (\*) foram estudados e levados em consideração na elaboração da Árvore de Eventos e serviram de base para o estudo de performance aplicado no método UNSW (University of New South Wales). Outro trabalho norteador foi o método relatado por Aamdal (1998), desenvolvido na Noruega e similar ao usado por BC Hydro, Canadá (Vick e Stewart, 1996 *apud* Foster *et al.*, 1998), que adota os seis passos descritos a seguir.

O procedimento para a aplicação do método de Análise por Árvore de Eventos – ETA procurou seguir as seguintes etapas:

1. Análise de dados por engenheiros especializados em barragens, para avaliar a vulnerabilidade da obra em eventual formação de *piping*. O autor desta dissertação procurou se familiarizar com as condições das estruturas e operação da barragem. Além de revisão da documentação, foi realizada visita ao local da barragem.

2. Seleção dos modos de ruptura, em que se procurou verificar dados históricos de estatísticas de rupturas em barragens similares. Os potenciais modos de falha foram definidos sem determinar valores de probabilidades. Foi feita reflexão sobre fatores que pudessem eliminar alguns modos de falha.
3. A construção da Árvore de Eventos foi elaborada a partir do pressuposto de que cada ramo da árvore dá origem a dois ramos, que representam: um a situação de sucesso, e outro a situação de falha. Cada seqüência de eventos foi estabelecida, de forma que cada situação pode ou não corresponder a uma falha, determinando as relações entre os eventos. As decomposições das seqüências de falhas e seus eventos foram estudados em profundidade para fundamentar a análise.
4. Estimou-se a probabilidade de ocorrência de cada seqüência de eventos, ou seja, de todas as situações de falha, através da estimativa de probabilidades de sucesso e falha de cada evento, com base nas informações coletadas e dados históricos de rupturas em barragens semelhantes. Portanto, foram realizadas determinações qualitativas. A consistência dos valores determinados seguiu a convenção de descritores qualitativos mostrados na Tabela 4.1, adotada por Vick, 1.992 *apud* Foster e Fell, 1999.

**Tabela 4.1 – Descrições de incertezas**

<b>Descrição qualitativa</b>	<b>Probabilidades</b>
Impossível <sup>(1)</sup>	0,01
Improvável <sup>(2)</sup>	0,1
Incerto <sup>(3)</sup>	0,5
Provável <sup>(4)</sup>	0,9
Quase certo <sup>(5)</sup>	0,99

Fonte: Modificado de VICK, 1.992 *apud* Foster e Fell, 1999, p. 131.

(1) – Não apresenta probabilidade de acontecer.

(2) – Muito difícil de ocorrer.

(3) – Duvidoso ou indeterminado.

(4) – Apresenta probabilidade de ocorrer.

(5) – Contém condições essenciais à sua realização, quase certo de ocorrer.

5. Os resultados foram avaliados para determinação da probabilidade total, calculada pela combinação de probabilidades de eventos que mais contribuíram para a formação do entubamento (*piping*), de acordo com as argumentações de Ang e Tang (1990) relatadas no capítulo 3, item 3.6.

6. Os resultados foram reanalisados para identificar alguns modos de falha que não contribuíam tanto para a probabilidade total de formação de *piping*, ou mesmo podiam estar sendo superestimados. Houve reanálise de informações e busca de mais dados junto ao acervo técnico da CEMIG, que serviu para refinar o ciclo.

O método foi fundamentado em avaliações qualitativas e partiu do pressuposto de que todos os acontecimentos iniciadores eram aleatórios. Visou estimar a probabilidade da ruptura através de seqüências e combinações de eventos, a partir da probabilidade de ocorrência dos acontecimentos iniciadores.

## 5 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DA BARRAGEM SÃO SIMÃO PELO MÉTODO UNSW

Atualmente a CEMIG opera 49 hidrelétricas mostradas nas localidades da Figura 5.1. A usina hidrelétrica São Simão (UHE – São Simão) possui potência instalada de 1.710 MW. A barragem escolhida para o estudo é a 7ª do sistema nacional em potência outorgada e a principal do sistema gerador da CEMIG, entre 158 usinas hidrelétricas (UHE) informadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).



**Figura 5.1** – Localização de algumas hidrelétricas pertencentes à CEMIG  
Fonte: Disponível em: < <http://www.cemig.com.br/>>. Acesso em 21 de abril de 2007

A Figura 5.2 mostra o canal de São Simão, no trecho fluvial do rio Paranaíba, local onde a UHE – São Simão foi posteriormente construída.



**Figura 5.2** – O canal de São Simão, antes da construção da barragem de São Simão  
Fonte: CEMIG – GA/SM.

Na Figura 5.2 observa-se o ambiente natural do local. A obra da barragem provocou impactos ambientais, a que após 29 anos seu ecossistema se adaptou. O estudo da segurança das barragens de terra construídas nesse local permitiu avaliar qualitativamente a vulnerabilidade da obra, para direcionar ações preventivas que a mantenham estável, evitando outros impactos ambientais adversos.

A avaliação da vulnerabilidade foi feita com enfoque de análise do estado das condições das estruturas da barragem, associando a: tempo de operação, princípios adotados em projeto, monitoramento da água percolada, observações e estado de conservação das estruturas. Conforme Menescal (2004), a vulnerabilidade deve refletir a estabilidade, funcionabilidade e durabilidade da obra. Para realizar esta avaliação foi aplicado o método UNSW (University of New South Wales). Os dados e as respectivas análises são relatados a seguir.

A barragem está localizada na região Centro-Sul do Brasil, nas coordenadas 19° 01' S de latitude sul e 50° 30' W de longitude oeste no trecho inferior do rio Paranaíba, que forma a fronteira entre os estados de Minas Gerais e Goiás. Localizada a 700 km a oeste de Belo Horizonte e a 6 km a leste da cidade relocada de São Simão. A área de drenagem a montante da barragem é aproximadamente de 171.000 km<sup>2</sup>, representando 72% de toda a bacia do rio Paranaíba. Os principais tributários a montante são: ao norte, São Marcos, Corumbá, Meia Ponte, Rio dos Bois e, ao sul, Araguari e Tejuco.

A camada de solo da bacia é bastante espessa e porosa nos locais mais baixos. O clima da bacia do Paranaíba é tipicamente trópico continental, determinado pela localização geográfica e pela influência das barreiras de montanhas que impedem o ingresso de massas de ar provenientes do litoral. Prevaecem duas estações, uma seca e fria e outra úmida e quente. A temperatura média é de 21° C para grandes altitudes e pouco mais alta para pequenas altitudes.

## 5.1 Caracterização da Barragem

### Barragem de Terra e Enrocamento

Volume de aterro compactado na ombreira direita	7.065 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
Volume de aterro compactado na ombreira esquerda e leito do rio	18.627 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
Escavação em rocha	440 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
Escavação comum (solo)	3.407 x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
Altura máxima (no leito do rio)	127 m
Comprimento total	2.867 m
Largura na base máxima	370 m
Largura na crista	10 m
Cota de coroamento	404 m

### Ombreira Direita

Altura	71 m
Extensão	1260 m

### Ombreira esquerda

Altura	64,00 m
Extensão	952 m

### Dados Hidrológicos

Área de drenagem	171.000 km <sup>2</sup>
Vazão mínima registrada	371 m <sup>3</sup> /s
Vazão máxima registrada	11.200 m <sup>3</sup> /s
Vazão específica	13,0 l/s/ km <sup>2</sup>
Vazão máxima da enchente de projeto do vertedouro	27.400 m <sup>3</sup> /s
Vazão de desvio	14.000 m <sup>3</sup> /s
Reservatório	
Área do reservatório (no N.A. máximo normal)	674 km <sup>2</sup>
Volume total do reservatório	12.540 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volume útil do reservatório	8.790 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Vazão regularizada para reservatório local	1.237 m <sup>3</sup> /s
Vazão regularizada para reservatórios a montante	1.750 m <sup>3</sup> /s
Vazão máxima turbinável	4.200 m <sup>3</sup> /s
Cota <i>maximum maximorum</i> com sobrelevação de enchente de projeto	401,80 m
Cota máxima normal do reservatório	401,00 m
Cota média do reservatório	393,00 m
Cota mínima do reservatório	381,00 m

## 5.2 Eventos de realização da obra

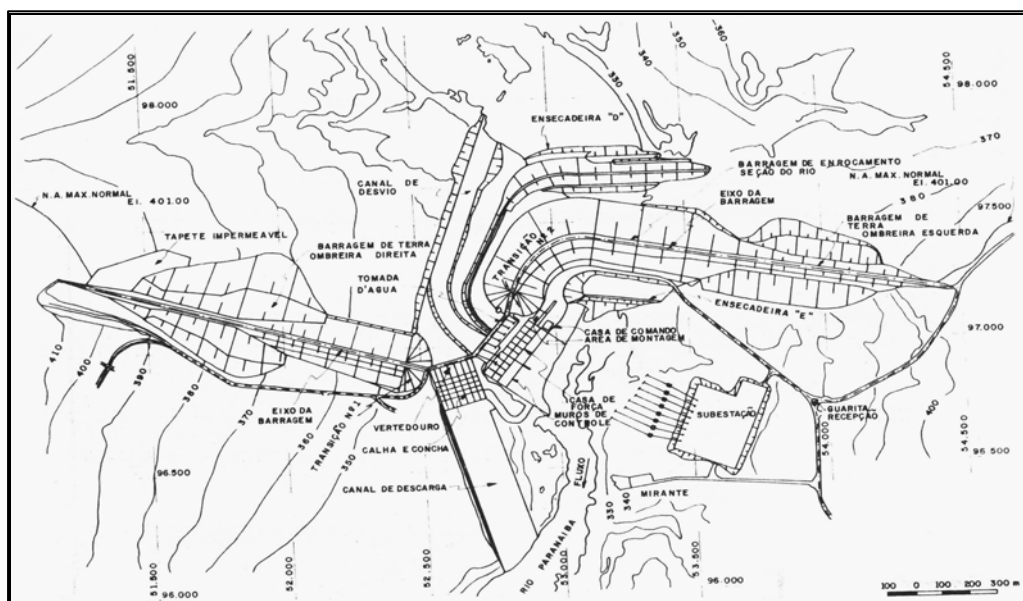
- Agosto de 1977, fechamento do reservatório através de comportas metálicas, tamponando as adufas de nível abaixo na tomada d'água.
- Dezembro de 1977, primeiras operações do vertedouro para estudar a performance da calha-concha e a dissipação da água através do canal de descarga.
- Junho de 1978, entrada em operação comercial da primeira máquina com 268 MW.



### 5.3 Arranjo geral

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram a UHE – São Simão composta de barragem de terra à direita; transição 1, vertedouro, tomada d'água, transição 2, barragem de enrocamento no leito do rio, barragem de terra à esquerda, condutos forçados, casa de força e área de montagem, edifício de controle e subestação de 500 KV.

A barragem de terra é do tipo mista, cascalho de terraço e enrocamento, com núcleo de areia argilosa nas margens, direita e esquerda, completada na parte central pela barragem de concreto. É composta de talude de montante 0,8H:1V, talude de jusante variável de 0,4H:1V e 0,5H:1V. A barragem direita possui 71 m de altura e 1260 m de extensão. A barragem esquerda possui 64,00 m de altura e 952 m de extensão. A crista está na elevação 404,00 m e tem largura de 10,00 m, com sobre-elevação de 0,30 m para compensar os recalques após a construção. As estruturas em concreto são do tipo gravidade com vertedouro de 9 comportas, com tomada d'água para 10 unidades e duas transições, uma em cada extremidade da estrutura de concreto, que servem de conexão com as barragens direita e barragem esquerda. A obra foi projetada pela Companhia Internacional de Engenharia e realizada pelo consórcio construtor italiano e brasileiro, entre as empresas Impregilo e C.R. Almeida e supervisionada pelo Departamento de Engenharia Civil e Geração da CEMIG – Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A. Os trabalhos foram iniciados em junho de 1973 até a conclusão em agosto de 1977.



**Figura 5.3** – Arranjo Geral das Estruturas da UHE São Simão  
Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 61.



**Figura 5.4** – Vista Geral da UHE São Simão

Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 48.

#### **5.4 Aplicação do método UNSW para ocorrência de *piping* através do barramento**

A partir deste ponto em cada item são apresentados os dados obtidos na documentação técnica da CEMIG, os quais são analisados em relação às informações obtidas do banco de dados (ERDATA1) do método UNSW, relatados no capítulo 3. Além desses dados, são apresentadas neste capítulo as tabelas que validaram cada um dos fatores de peso. Ressalta-se a Tabela 5.1– Probabilidade média de ruptura em barragens, em função do tipo de seção. Essa tabela é a que define as probabilidades históricas de cada modo de *piping*, que são ajustadas pela escolha de fatores de pesos demonstradas nas demais tabelas.

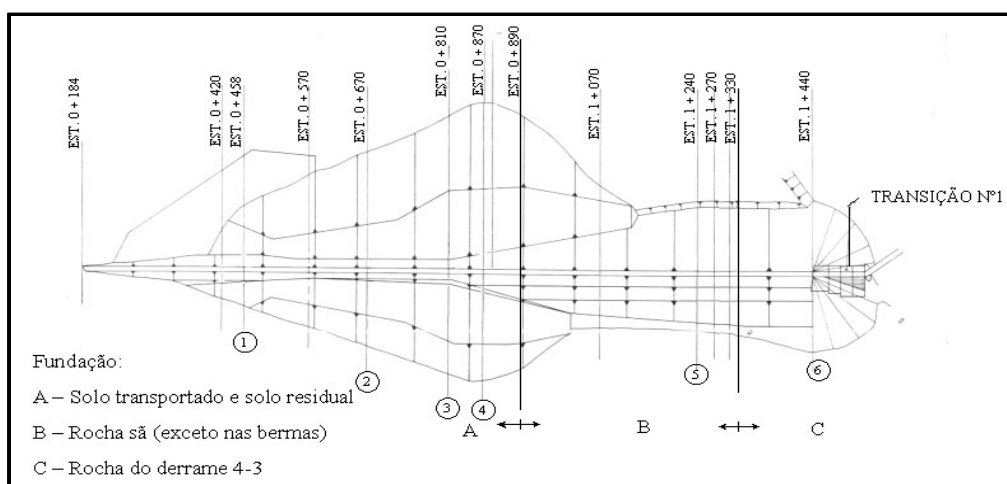
Além dessa tabela em destaque, ressaltam-se outras três apresentadas ao final deste capítulo, 5.21, 5.22 e 5.23, que resumem os fatores de pesos para cada um dos modos de rupturas em relação aos fatores em análise, respectivos fatores de pesos e as probabilidades qualitativas associadas a esses fatores.

##### **5.4.1 Dados das seções típicas**

A barragem da margem direita, em planta, mostrada na Figura 5.5 e vista aérea durante a construção, ilustrada pela Figura 5.6, pode ser representada em corte transversal pela seção típica da Figura 5.8, situada na seção 5 (estaca 1 + 240,0).

As barragens das margens esquerda e direita são formadas por núcleo argiloso, com transição em cascalho de terraço nos espaldares de montante e jusante e uma zona de random compactado. O maciço de terra é zoneado, com núcleo de areia argilosa e enrocamento em cascalho de terraço, na barragem da margem esquerda. As barragens de terra possuem um sistema interno de drenagem composto de um filtro chaminé inclinado, a jusante do núcleo, ligado ao sistema horizontal de drenagem através de tapete drenante da fundação.

A proteção dos taludes da barragem foi executada por *rip-rap* a montante e rocha miúda com dimensão máxima de 40 cm, como mostra a Figura 5.7.



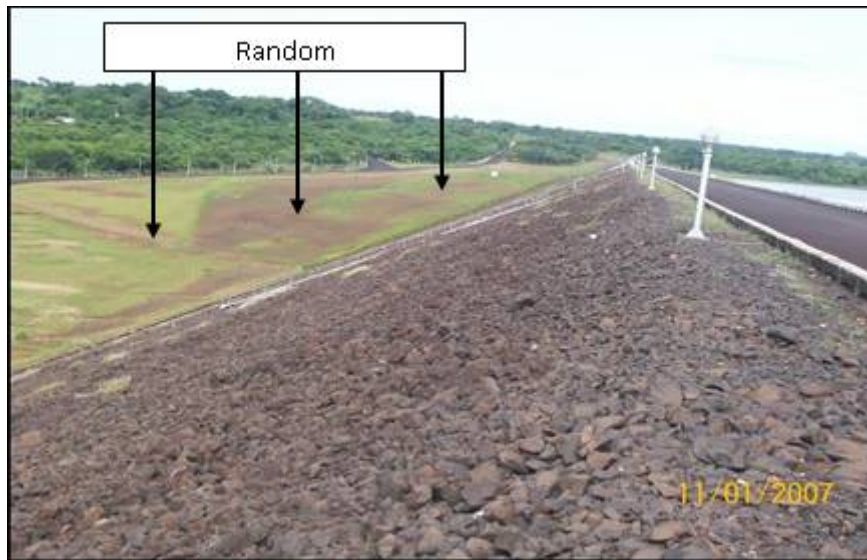
**Figura 5.5** – Barragem de Terra da Margem Direita – BTMD

Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 64.



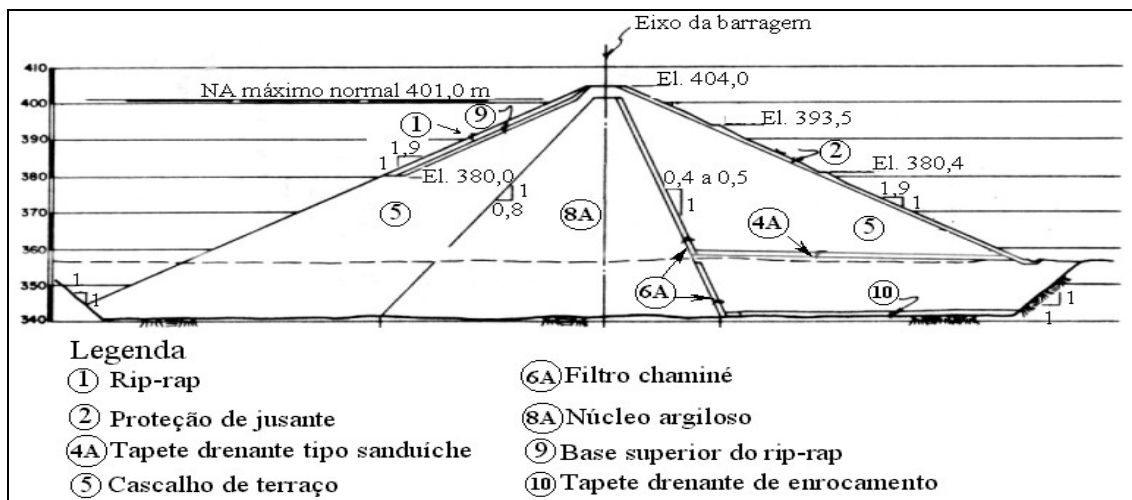
**Figura 5.6** - Vista da barragem de terra da margem direita (época da construção)

Fonte: CEMIG – GA/SM.



**Figura 5.7** – Vista parcial do espaldar da barragem de terra da margem direita

A Figura 5.8, seção 5 (estaca 1 + 240,0), evidencia núcleo impermeável (8A), constituído por uma areia argilosa. A montante e a jusante usaram-se cascalho de terraço (5). Nota-se que acima da elevação 380,0 m, usou-se *rip-rap* a montante (1); a jusante observa-se filtro chaminé (6A), tapete drenante tipo sanduíche (4A) e tapete drenante de enrocamento (10).

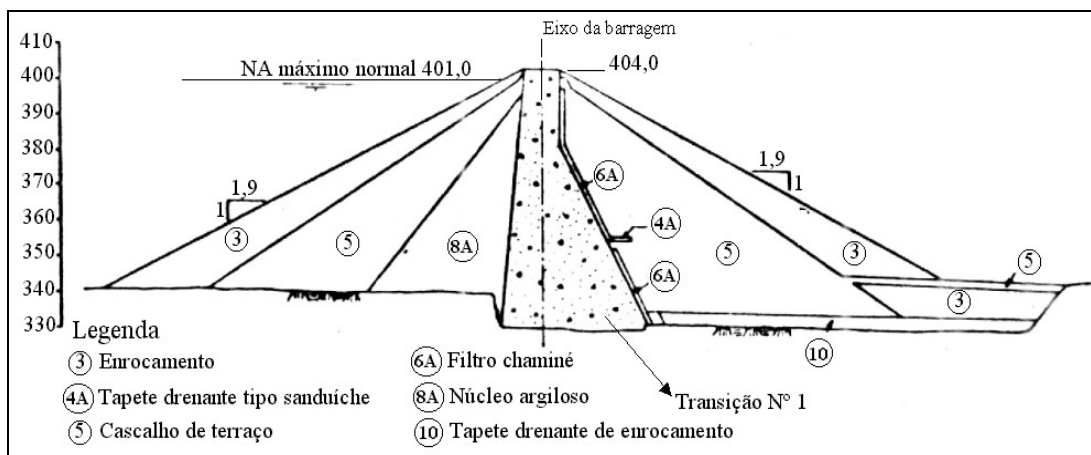


**Figura 5.8** – Seção típica da BTMD – Seção 5 – Estaca 1 + 240,0

Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 65.

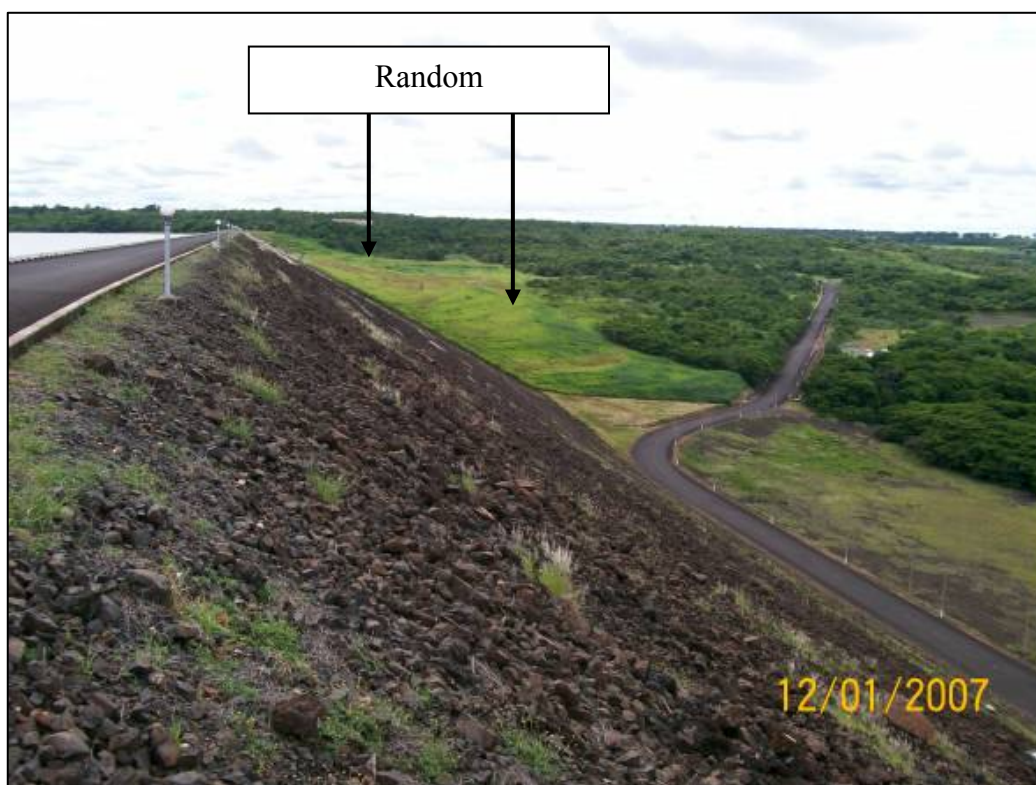
Para fazer a ligação entre a barragem de terra e a transição nº 1 (FIG. 5.9), os materiais foram substituídos a partir da estaca 1 + 270,0. Essa substituição objetivou abraçar a transição nº 1. Na região de transição, a seção transversal típica é constituída por um núcleo impermeável (8A) de areia argilosa e uma transição de cascalho de terraço (5) e enrocamento (3). A jusante, o sistema de drenagem adotado foi tapete drenante tipo sanduíche (4A), filtro

chaminé (6A) e um tapete drenante de enrocamento (10), no contato com a face de jusante da estrutura de concreto e ao longo da fundação.



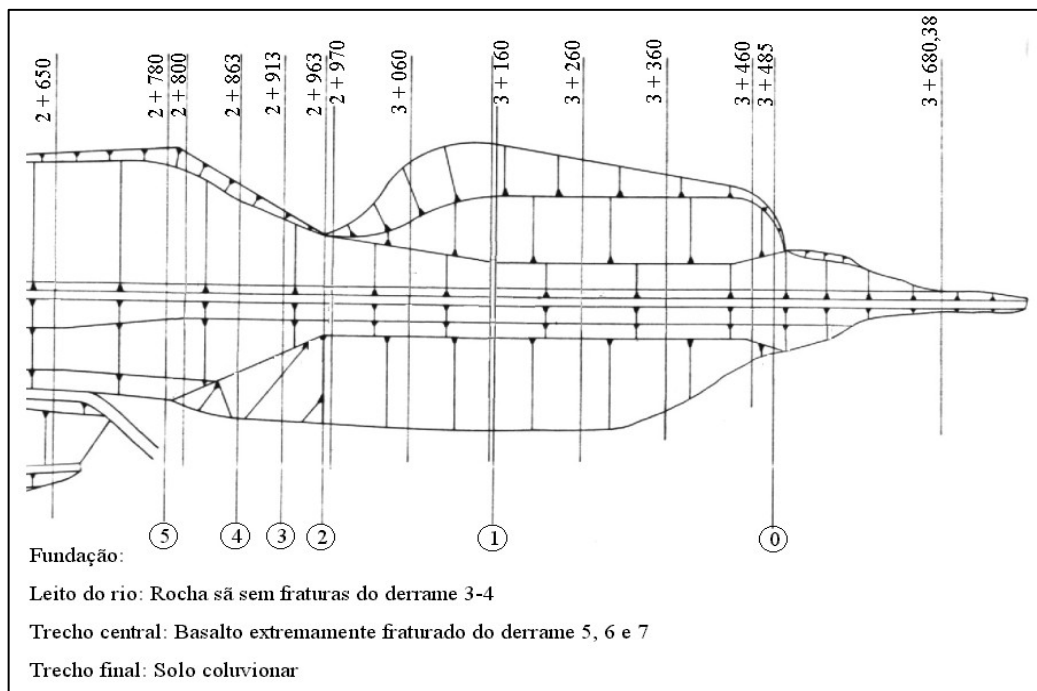
**Figura 5.9** – Seção típica da zona de transição nº 1 – Seção 6 – Estaca 1 + 440,0  
Fonte: Modificado de Fonseca, 2003, p. 67.

A barragem da margem esquerda é mostrada na Figura 5.10, em destaque o random. A extensão dessa barragem é 952,0 m, altura máxima de 64,0 m, e está localizada entre a estaca 2 + 663,0 até a estaca 3 + 600,0, como pode ser observado na Figura 5.11.



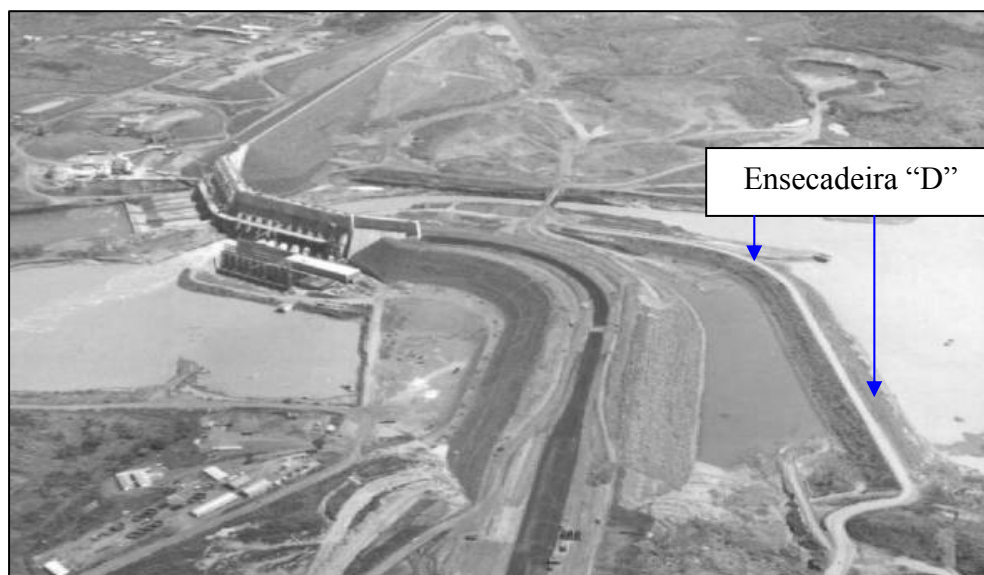
**Figura 5.10** – Vista parcial a jusante da margem esquerda da barragem de terra





**Figura 5.11** – Barragem de terra da margem esquerda – BTME  
 Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 67.

A Figura 5.12 mostra a barragem da margem esquerda em fase de construção, notando-se a ensecadeira “D”, na margem esquerda, incorporada ao barramento.



**Figura 5.12** – Vista aérea da barragem da margem esquerda e ensecadeira a montante  
 Fonte: CEMIG – GA/SM.

A barragem da margem esquerda é representada pela seção 5, como mostra a Figura 5.13. Esse maciço é zoneado em argila e cascalho. O núcleo (8A) é constituído por areia argilosa. A montante e a jusante os taludes são formados por cascalho de terraço. Acima da elevação

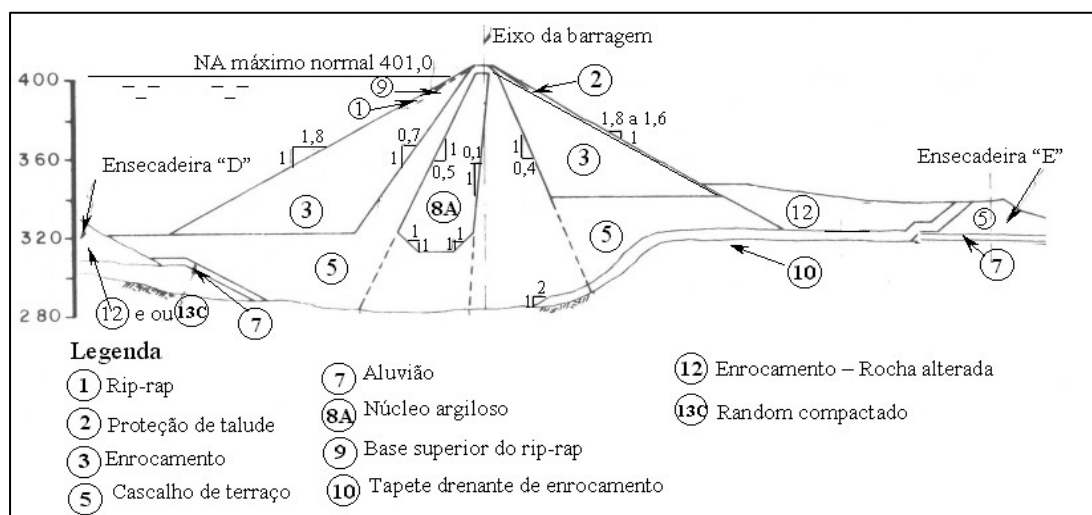




**Figura 5.15** – Vista parcial da transição nº 2 e barragem de enrocamento

A seção típica nesta parte é zoneada em argila e cascalho, com altura máxima de 127,0 m. A Figura 5.16 mostra essa seção, na posição da estaca 2 + 410,0.

O núcleo (8A) é formado por areia argilosa. Os taludes de montante e jusante foram construídos em enrocamento (3). À montante, há uma transição entre o núcleo impermeável e o enrocamento que é formado por cascalho de terraço (5).

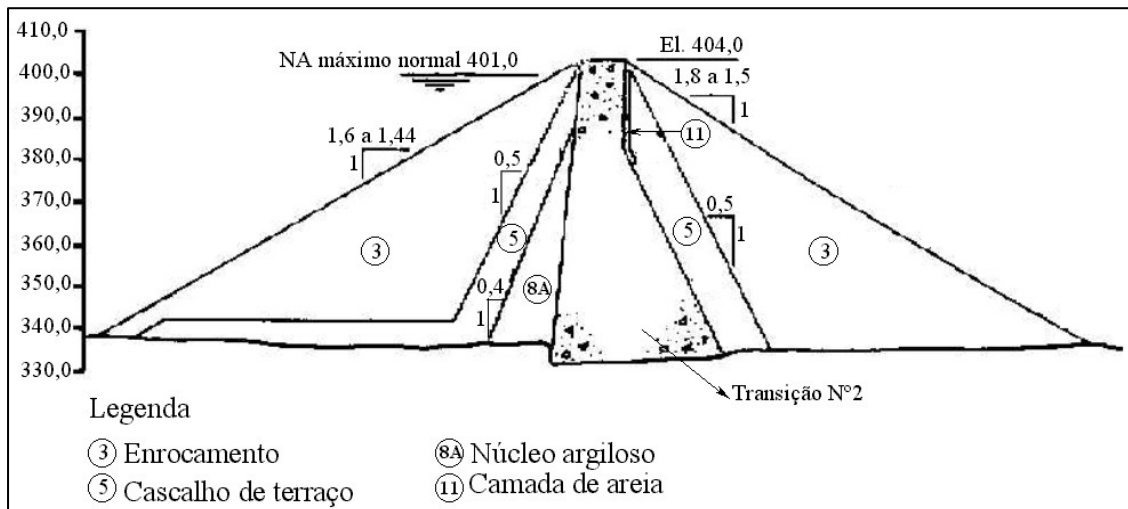


**Figura 5.16** – Seção típica da barragem de terra e enrocamento – Estaca 2 + 410,0

Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 70.



Na área de transição nº 2 mostrada na Figura 5.17, o uso de areia argilosa (8A) a montante e cascalho de terraço, a montante e a jusante (5), fazem transição para os taludes de enrocamento (3).



**Figura 5.17** – Seção típica da transição nº 2 – Seção 9 – Estaca 2 + 016,0

Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 72.

A Figura 5.18 mostra os materiais aplicados no maciço. Destaca-se o cascalho de terraço aplicado nos espaldares de montante e jusante, na margem esquerda e direita. Esse material foi aplicado com a finalidade de fazer a transição entre o núcleo de areia argilosa e a rocha de proteção do talude, possuindo 30 a 70% de material retido na peneira nº4 e 20% de material passante na peneira 200, com permeabilidade  $10^{-6}$  cm/s, depois de compactado.



**Figura 5.18** – Materiais de granulometria diferenciada, aplicados na construção do maciço (rocha em basalto, cascalho de terraço e areia argilosa)

Fonte: CEMIG – GA/SM.

**Análise de dados:** Adotando-se como referência a posição de montante para jusante, o estaqueamento partiu da margem direita até a margem esquerda. Em toda a extensão da barragem, destacam-se cinco seções características. Elas se apresentam com configurações diferenciadas, denominadas seções zoneadas. Nessas seções foram aplicados materiais de características geotécnicas apropriadas para atenderem às especificações de projeto, com o objetivo de manter a estabilidade da obra.

A Figura 5.8 mostra a seção típica da barragem de terra da margem direita, situada na seção 5 (estaca 1 + 240,0). Ela é zoneada por possuir núcleo impermeável (8A), constituído por uma areia argilosa. Além desse material, foi aplicado cascalho de terraço (5) a montante e a jusante. Possui sistema de drenagem composto de filtro chaminé (6A), tapete drenante tipo sanduíche (4A) e tapete drenante de enrocamento (10).

A seção típica da barragem de terra da margem esquerda (FIG. 5.13) é zoneada por apresentar um núcleo impermeável (8A) em areia argilosa. Os espaldares a montante e a jusante são formados por cascalho de terraço.

A seção típica da barragem de terra e enrocamento (FIG. 5.16) demonstra que é zoneada, pois o núcleo (8A) é formado por areia argilosa, com taludes de montante e jusante de enrocamento (3). Existe uma transição a montante, entre o núcleo impermeável e o enrocamento. Essa transição é de cascalho de terraço (5).

A área de transição nº 2 também é zoneada (FIG. 5.17), por possuir parte do núcleo em areia argilosa (8A). As áreas de transição números 1 e 2, a montante e a jusante, possuem cascalho de terraço (5) que fazem transição para os taludes de enrocamento (3).

Assim, pela análise das seções apresentadas e pela estatística levantada por Foster *et al.* (1998), observa-se pela Tabela 5.1 que o tipo de seção para representar a probabilidade histórica a ser adotada é a seção zoneada, formada por terra e enrocamento.

A entrada de dados na Tabela 5.1 é a linha referente à barragem de terra, zoneada e enrocamento e na coluna do barramento, referente aos dados de probabilidade para barragens em operação acima de cinco anos (barragem em estudo em operação há 29 anos).

Essas entradas determinam o valor para a probabilidade média anual de formação de *piping* através do barramento como  $P_e = 24 \times 10^{-6}$ .

**Tabela 5.1** – Probabilidade média de ruptura em barragens pelo modo de *piping*, em função do tipo da seção

TIPO DE SEÇÃO	BARRAMENTO (MACIÇO)			FUNDAÇÃO			BARRAMENTO PARA FUNDAÇÃO		
	Média $P_{Te}$ ( $\times 10^{-3}$ )	Média Anual $P_e$ ( $\times 10^{-6}$ )		Média $P_{Tf}$ ( $\times 10^{-3}$ )	Média Anual $P_f$ ( $\times 10^{-6}$ )		Média $P_{Tef}$ ( $\times 10^{-3}$ )	Média Anual $P_{ef}$ ( $\times 10^{-6}$ )	
		Prim. 5 anos operação	Após 5 anos operação		Prim. 5 anos operação	Após 5 anos operação		Prim. 5 anos operação	Após 5 anos operação
Terra, homogênea	16	2080	190	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Terra com filtro	1,5	190	37	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Terra com enrocamento de pé	8,9	1160	160	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Terra, zoneada	1,2	160	25	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Terra, zoneada e enrocamento	1,2	150	24	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Terra com núcleo central e enrocamento	(<1,1)	(<140)	(<34)	1.7	255	19	0.18	19	4
Terra com face de concreto	5,3	690	75	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Enrocamento com face de concreto	(<1)	(<130)	(<17)	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Terra com núcleo impermeável	9,3	1200	38	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Terra com cortina espessa	(<1)	(<130)	(<8)	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Enrocamento com cortina espessa	(<1)	(<130)	(<13)	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Aterro Hidráulico	(<1)	(<130)	(<5)	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<b>TOTAL DE BARRAGENS</b>	<b>3.5</b>	<b>450</b>	<b>56</b>	<b>1.7</b>	<b>255</b>	<b>19</b>	<b>0.18</b>	<b>19</b>	<b>4</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 123.

Notas:

- (1)  $P_{Te}$ ,  $P_{Tf}$  e  $P_{Tef}$  são probabilidades médias de ruptura sobre a vida útil da barragem.
- (2)  $P_e$ ,  $P_f$  e  $P_{ef}$  são as probabilidades médias anuais de ruptura.

#### 5.4.2 Fator de peso considerando filtros no barramento: Fator de peso $W_{E(filt)}$

Viotti *et al.* (2006) descrevem a construção de filtros da barragem da margem direita, ressaltando que do início da barragem até a estaca 0 + 900 m não há nem tapete horizontal nem filtro vertical.

A partir dessa estaca, o sistema de drenagem é composto de filtro chaminé de areia, que é ligado em sua base ao nível do terreno natural, a um tapete drenante de enrocamento. A barragem de terra da margem direita – BTMD – possui, além desse tapete, um outro drenante tipo sanduíche, subhorizontal, construído em areia, com saída sobre a borda de jusante da escavação da fundação, representado pela área 4A da Figura 5.8. Segundo o relatório CEMIG (1976), os materiais aplicados nos filtros seguiram critério de Terzaghi, que estabelece as relações entre a granulometria de materiais usados no filtro e granulometria de materiais do maciço a ser protegido.

O método construtivo do sistema de filtros em cada uma das barragens é descrito a seguir. A base inferior do tapete foi construída sobre o aterro de cascalho de terraço que separa o sistema superior da drenagem inferior. A construção do tapete foi feita em camadas de espessura variada: camada inferior de areia com 30 cm, camada de brita 1 de 60 cm e camada superior de areia com 30 cm de espessura. O controle de qualidade especificou compactidade da areia em 65% e brita espalhada mecanicamente.

O filtro chaminé foi feito em camadas de 25 cm de espessura, confinando a camada lançada com areia argilosa e cascalho de terraço das zonas adjacentes e compactação da camada e dos contatos. Nesse filtro foram realizados 249 ensaios em camadas de areia natural, obtendo-se compactidade média de 80,9% e 708 ensaios em camadas de areia mista, com resultados de 82,6% de compactidade média.

No tapete drenante da barragem esquerda, foram realizados 307 ensaios, obtendo-se compactidade média de 82,6% nas camadas de areia natural e 83,8% em camadas de areia mista. Adjacente ao núcleo de areia argilosa, foi construído um filtro chaminé a jusante no interior do aterro de cascalho de terraço, com 1,5 m de largura até a cota 395 e 1,0 m de largura até a cota 401 m. O método construtivo e o material utilizado no filtro chaminé é idêntico ao aplicado na barragem direita.

**Análise de dados:** Como apresentado anteriormente, verificou-se que houve adequado controle tecnológico durante a construção de filtros, inclusive nas áreas de transição de materiais, para evitar percolação de material granular e colmatção dos filtros. Foster *et al.* (1998) propõem a tabela 5.2 para o fator de peso na análise de presença de filtros em barramentos, considerada na avaliação de *piping* através do barramento: fator  $W_{E(fil)}$ .

**Tabela 5.2** – Estatística de aplicação de filtros em grandes barragens

Descrição de filtros no barramento <sup>(1)</sup>	Nº de rupturas	% de rupturas	% da amostra	Fator de peso adotado $W_{E(fil)}$
Nenhum filtro no barramento	8	100	40%	2,0
Presença de filtro, de baixa qualidade	0	0 (5%) <sup>(2)</sup>	20% <sup>(3)</sup>	0,2 <sup>(4)</sup>
Presença de filtro, bem projetado e construído	0	0 (1%) <sup>(2)</sup>	40% <sup>(3)</sup>	0,02 <sup>(4)</sup>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 139.

Notas:

Foster *et al.* (1998) ressaltam os seguintes pontos na aplicação dessa tabela:

- (1) As estatísticas de rupturas e fatores de pesos são aplicadas somente para filtros usualmente utilizados em barragens de terra, barragens de terra com seção zoneada, barragens de terra e enrocamento, com seção zoneada e barragens de terra e enrocamento, com núcleo central.
- (2) Uma taxa de ruptura equivalente a 1% foi assumida para barragens com bons filtros e 5% para barragens com filtros ruins;
- (3) É assumido que 1/3 das barragens com presença de filtros não atendem aos padrões construtivos para filtros ou apresentam segregação de material durante a construção;
- (4) Fatores de peso são baseados em uma taxa de rupturas equivalente para seções onde filtros estejam presentes.

O valor para fator de peso  $W_{E(fil)}$  adotado para as barragens esquerda e direita é de 0,02, pois o método construtivo obedeceu aos parâmetros de projeto, com compacidade da areia bem superior ao valor especificado de 65%. Ressalta-se que, além de adequado controle na construção dos filtros, houve devido controle nas áreas de transição entre o filtro e o núcleo de argila arenosa. A probabilidade qualitativa adotada é “muito menos provável”, em decorrência do projeto do sistema de drenagem e bom controle construtivo, conforme Tabela 5.21.

#### 5.4.3 Fator de peso considerando a classificação dos materiais usados no núcleo: Fator de peso $W_{E(est)}$

O material usado no núcleo foi oriundo basicamente de duas jazidas (empréstimo nº 2 e nº 3) com a seguinte caracterização.

Área de empréstimo nº 2, em areia argilosa com teor de areia entre 20% a 90%. A massa específica dos grãos apresentou valores entre 2,7 e 2,9 g/cm<sup>3</sup>. A massa específica seca máxima, definida pelo ensaio de Proctor Normal, situada entre 1,75 e 2,05 g/cm<sup>3</sup> para umidade ótima variando entre 16% a 8%, respectivamente.

Área de empréstimo nº 3, em areia argilosa com distribuição granulométrica mais homogênea, com teor de areia entre 45% a 85%, limite de liquidez entre 20% e 35% e índice de

plasticidade entre 5% e 15%. A massa específica dos grãos entre 2,7 e 2,9 g/cm<sup>3</sup> e massa específica seca máxima, definida pelo ensaio de Proctor Normal entre 1,98 e 1,8 g/cm<sup>3</sup> para umidades ótimas de 16% e 11%, respectivamente.

Após os ensaios de caracterização, ensaios especiais de adensamento e triaxiais, durante várias fases do projeto e construção, o material usado no núcleo foi classificado como areia argilosa de cor marrom, sendo que a maior parte do material enquadrou-se como CL no Sistema Unificado de Classificação. Essa classificação é equivalente a solo A2-5 a A2-6 pelo critério de classificação AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Segundo esta classificação é uma argila de regular a boa trabalhabilidade, impermeável quando compactada, possui regular resistência e média compressibilidade após compactação e saturação, impedindo a drenagem de água.

Segundo Foster *et al.* (1998), esse tipo de solo apresenta estatísticas de acidentes e rupturas, em relação à amostragem realizada em barragens que usaram vários tipos de solo, mostradas nas tabelas 5.3 e 5.4. Observando a Tabela 5.3, verifica-se que de 432 barragens pesquisadas 229 (34,2%) usaram solo classificado como CL no núcleo.

**Tabela 5.3 – Estatística de tipos de solo usados em núcleos de barragens**

<b>Classificação de solo unificada</b>	<b>Nº de barragens (1)</b>	<b>% de barragens com determinado tipo de solo</b>	<b>% de tipos de solo</b>
GW	4	0,9	0,6
GP	2	0,5	0,3
GM	42	9,7	6,3
GC	34	7,9	5,1
SW	2	0,5	0,3
SP	6	1,4	0,9
SM	113	26,2	16,9
SC	122	28,2	18,2
ML	55	12,7	8,2
CL	229	53,0	34,2
MH	9	2,1	1,3
CH	51	11,8	7,6
Não conhecido (ou não aplicável)	1030	-	-
<b>Nº de barragens (conhecidas)</b>	<b>432</b>		
<b>Nº de tipos de solo</b>	<b>669</b>	<b>154,9 %</b>	<b>100 %</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 29.

Notas:

O número de barragens foi obtido diretamente do banco de dados, incluídas as barragens da Austrália, Nova Zelândia, USBR e barragens descritas em artigos de congressos do ICOLD.

Foram excluídas barragens sem núcleo de terra, por exemplo, barragem de enrocamento e face de concreto.

**Tabela 5.4** – Fatores de pesos em relação à origem geológica, de acordo com a Classificação de Solo Unificada (Unified Soil Classification - USC) e materiais aplicados no núcleo, em proporções de rupturas e acidentes através do barramento e do barramento para a fundação.  $W_{E(cgo)}$ ,  $W_{E(cst)}$ ,  $W_{EF(cgo)}$ ,  $W_{EF(cst)}$

CARACTERÍSTICAS DO NÚCLEO	Piping no barramento		Piping do barramento p/ fundação		Nº DE CASOS		PORCENTAGENS			FATORES		COMENTÁRIOS		
	Acidente	Ruptura	Acidente	Ruptura	Acidente	Ruptura	Acidente	Ruptura	Amostra	%Acidente	%Ruptura		Fator	Fator x Amostra
							%	%	%	%Amostra	%Amostra			
(a) Tipo de Geologia do Núcleo												$W_{E(cgo)}$ , $W_{EF(cgo)}$		
Eólica	2	0	0	1	2	1	3,0	3,8	7,0	0,4	0,5	<b>1,25</b>	0,09	Esperado ser > 1,0
Aluvial	11	9	4	0	15	9	<b>22,7</b>	<b>34,6</b>	<b>22,0</b>	1,0	1,6	<b>1,5</b>	0,33	Baseado em dados
Coluvial	0	2	2	0	2	2	3,0	7,7	6,3	0,5	1,2	<b>1,25</b>	0,08	Baseado em dados
Glacial	20	3	10	0	30	3	45,5	11,5	22,1	2,1	0,5	<b>0,50</b>	0,11	Baseado em dados
Residual	14	10	3	1	17	11	25,8	42,3	38,2	0,7	1,1	<b>1,0</b>	0,38	Baseado em dados
Lacustre	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	<b>1,0</b>	0,02	Sem dados < ou > 1,0
Marinha	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	<b>1,0</b>	0,00	Sem dados < ou > 1,1
Vulcânica	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	<b>1,0</b>	0,02	Sem dados < ou > 1,2
Não Conhecida	51	31	13	2	64	33								
<b>TOTAL</b>	<b>47</b>	<b>24</b>	<b>19</b>	<b>2</b>	<b>66</b>	<b>26</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>				<b>1,03</b>	
(b) Tipo de solo do Núcleo (USC)												$W_{E(cst)}$ , $W_{EF(cst)}$		
GW	3	0	0	0	3	0	3,0	0	0,6	2,2	0	<b>1,0</b>	0,01	Sem dados < ou > 1,2
GP	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0,3	0	0	<b>1,0</b>	0,00	Sem dados < ou > 1,3
GM	5	0	2	0	7	0	7,0	0	6,3	1,1	0	<b>0,8</b>	0,05	Assume ser < 1,0
GC	4	2	3	0	7	2	7,0	4,7	5,1	1,4	0,9	<b>0,8</b>	0,04	Baseado em dados
SW	2	0	0	0	2	0	2,0	0	0,3	6,2	0	<b>2,0</b>	0,01	Mesmo que SP de alta permeabilidade
SP	0	0	1	1	1	1	1,0	2,3	0,9	1,1	2,6	<b>2,0</b>	0,02	Baseado em dados
SM	10	8	7	1	17	9	17,0	20,9	16,9	1	1,2	<b>1,2</b>	0,20	Baseado em dados
SC	9	8	5	1	14	9	14,0	20,9	18,2	0,8	1,1	<b>1,2</b>	0,22	Baseado em dados
ML	9	8	3	1	12	9	12,0	20,9	8,2	1,5	2,6	<b>2,5</b>	0,20	Baseado em dados
CL	<b>25</b>	<b>11</b>	6	0	31	11	31,0	25,6	<b>34,2</b>	0,9	0,7	<b>0,8</b>	0,27	Baseado em dados
MH	1	0	0	0	1	0	1,0	0	1,4	0,7	0	<b>1,0</b>	0,01	Metade entre ML e CH
CH	5	2	0	0	5	2	5,0	4,7	7,6	0,7	0,6	<b>0,3</b>	0,02	2 casos de ruptura dispersiva
Não Conhecido	51	26	16	1	67	27								Aumenta para 1,0 se dispersivo
<b>TOTAL</b>	<b>73</b>	<b>39</b>	<b>27</b>	<b>4</b>	<b>100</b>	<b>43</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>				<b>1,05</b>	

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 141.

A Tabela 5.4 mostra que ocorreram 36 acidentes e rupturas em barragens que usaram esse tipo de solo (classificado como CL). Estatisticamente representam 34,2% das rupturas na amostra de barragens pesquisadas no total de 432 barragens.

De acordo com a Tabela 5.4, adotou-se o fator de peso  $W_{E(cst)} = 0,8$  para o tipo de solo aplicado no núcleo. Portanto, a probabilidade qualitativa escolhida é “menos provável”, conforme Tabela 5.21.

#### **5.4.4 Fator de peso considerando a origem geológica dos materiais usados no núcleo:**

##### **Fator de peso $W_{E(cgo)}$**

A origem geológica dos materiais usados no núcleo provém de formação geológica dos empréstimos presentes no curso médio do rio Paranaíba. O perfil típico de ocorrência geológica desses depósitos apresentava um cascalho coberto por um material aluvionar, constituído de areia argilosa de cor marrom.

Ao analisar a tabela de estatística de acidentes e rupturas por *piping* (TAB. 5.4), verificou-se que a origem geológica desse material corresponde a 22% da amostra de barragens; 22,7% de acidentes e 34,6% de rupturas. O fator de peso adotado para  $W_{E(cgo)}$  e  $W_{EF(cgo)}$  é de 1,5 para cada um. De acordo com a Tabela 5.21, a probabilidade qualitativa é “muito mais provável”.

#### **5.4.5 Processo de construção do maciço e controle tecnológico da obra: Fator de peso**

##### **$W_{E(cc)}$**

As análises de dados dos relatórios de construção das barragens direita e esquerda demonstraram que houve adequado controle no processo de compactação. A compactação foi realizada em dois estágios, em camadas de 25 cm. Na barragem direita foram realizados 328 ensaios de HILF em camadas do núcleo argiloso no primeiro estágio e 2.344 ensaios de HILF no segundo estágio. Enquanto na barragem da margem esquerda foram realizados 631 ensaios de HILF, no primeiro estágio, e 2.670 ensaios de HILF realizados no segundo estágio.

A especificação de projeto foi de 98% de grau de compactação, com desvio de umidade em relação à umidade ótima do ensaio de Proctor Normal de - 2,0% (seco) a - 1,0% (úmido).

Os resultados dos ensaios demonstram que a média do grau de compactação foi de 101,6% para a barragem direita e 100,83% para a barragem esquerda e com controle da umidade médio de - 0,33 a - 0,96%, inclusive para áreas de transição. Conclui-se que houve um bom



controle de compactação, validado por ensaio de permeabilidade *in situ* como mostra a Tabela 5.5.

**Tabela 5.5** – Permeabilidade *in situ*, método USBR, zonas 5 e 8A das seções

Barragem	Zona	Ensaio n°	Coefficiente de Permeabilidade a 20° C (cm/s)	Observação
Esquerda	5	1	$3,3 \times 10^{-5}$	Cascalho de terraço
Esquerda	5	2	$2,3 \times 10^{-5}$	Jazida n° 4
Direita	5	3	$1,5 \times 10^{-5}$	Ensaio representativos da zona 5, ombreira direita, cascalho de terraço da jazida n° 3.
Direita	5	4	$1,8 \times 10^{-5}$	
Direita	8A	5	$1,6 \times 10^{-6}$	Ensaio da zona 8A, da ombreira direita, em que usou areia argilosa da jazida n° 3.
Direita	8A	6	$3,0 \times 10^{-6}$	

Fonte: Modificado de CEMIG, 1976, p. 20.

**Análise de dados:** Ao analisar os dados estatísticos da Tabela 5.6, conclui-se que o valor a ser adotado para o fator de peso  $W_{E(cc)}$  é 0,3. Segundo Foster *et al.* (1998), a probabilidade qualitativa adotada é “muito menos provável” de acordo com a Tabela 5.21.

**Tabela 5.6** – Fatores de pesos para compactação do núcleo – *piping* através do barramento,  $W_{E(cc)}$

Método de compactação dos materiais do núcleo	RUPTURAS		ACIDENTES		POPULAÇÃO %	FATORES DE PESO		Fator estimado $W_{E(cc)}$
	N°	%	N°	%		%Fal/ %Pop	%Acid/ %Pop	
Aterro hidráulico	0	-	5	-	-	-	-	<b>1,0</b>
Socado – batido (argila batida)	5	-	14	-	-	-	-	<b>1,0</b>
Sem compactação formal	11	37,9	8	16,7	8	4,7	2,1	<b>5,0</b>
Compactado com rolo, modesto controle	13	44,8	25	52,1	32	1,4	1,6	<b>1,4</b>
Compactado com rolo, bom controle	5	17,2	15	31,3	60	0,3	0,5	<b>0,3</b>
Não conhecido	18		35					
<b>N°. de casos</b>	<b>52</b>	<b>100</b>	<b>102</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b><math>\sum</math> (fatores x Pop%) = 1,03</b>		

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 142.

#### 5.4.6 Existência de tubulações ou condutos forçados através do barramento: Fator de peso $W_{E(con)}$

**Análise de dados:** As seções em corte das barragens das margens esquerda e direita, apresentados no item 5.4.1 mostram que não há uso de tubulações através do maciço.

Conforme mostram a Tabela 5.7 e observações durante a visita técnica realizada pelo autor desta dissertação (janeiro de 2007), as condições das estruturas da barragem estavam em boa preservação. Baseando-se nessas informações, o fator de peso que melhor representa a condição é  $W_{E(con)} = 0,5$ . Portanto, de acordo com a Tabela 5.21, a probabilidade qualitativa adotada é “muito menos provável”.

**Tabela 5.7** – Fatores de peso para tubulações ou condutos através do barramento – *piping* através do barramento,  $W_{E(con)}$

Descrição de detalhes	Porcentagem estimada da população	Fator de peso estimado $W_{E(con)}$	Fator x população %
Tubulação através do barramento – poucos detalhes do projeto e execução	5 %	5	0,25
Tubulação através do barramento – alguns detalhes são deficientes	10 %	2	0,20
Tubulação através do barramento – prática tipo USBR	30 %	1,0	0,30
Tubulação através do barramento – incluindo filtro a jusante	5 %	0,8	0,04
Nenhuma tubulação através do barramento (ex., túnel através do barramento)	50 %	0,5	0,25
<b>Total</b>	<b>100 %</b>	$\Sigma$ (fatores x Pop%) =	<b>1,04</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 143.

#### 5.4.7 Tratamento aplicado na fundação: Fator de peso $W_{E(ft)}$

Segundo Viotti *et al.* (1983) *apud* Fonseca (2003), a fundação das barragens da margem direita, transições e margem esquerda foram apoiadas em materiais de características diferentes. Resumidamente, a área da fundação pode ser dividida em três trechos: próxima ao local onde era o leito do rio, caracterizado por rocha sã sem fraturas; local afastado do antigo leito do rio, onde a fundação é em rocha de basalto, extremamente fraturada com zonas de

solo residual e em trechos das margens, em que se encontra sobre solo transportado (FIG. 5.5 e FIG. 5.11).

Viotti *et al.* (2006) relatam que na base da barragem direita havia uma camada espessa de solo poroso e colapsível, que condicionou o projeto da barragem. Entre as estacas 0+460m até a transição N°1, foi realizada escavação da fundação para retirada do solo poroso e outros materiais terrosos.

Conforme mostra a Figura 5.5, a fundação da barragem da margem direita apresentava configuração variada. Ressalta-se que, nas seções entre estacas 0 e 0 + 890,0 (região A), constituídas por depósitos de solo transportado e solo residual, entre as estacas 0+890 e 1 + 330 (região B), a fundação apoiou-se em rocha sã e na região C, entre as estacas 1+ 330 e 1 + 440 a base foi apoiada na rocha do derrame 4/3.

Para evitar percolação de água no trecho de solo transportado entre as estacas 0 + 230,0 e 0 + 600,0 foi construído um tapete impermeabilizante de 1,0 m de espessura, a montante. Na área de rocha decomposta, na qual se encontra apoiado o núcleo, houve tratamento por limpeza e aplicação de tratamento asfáltico ou argamassa.

A preparação da fundação na barragem esquerda consistiu em limpeza manual com aplicação de jatos de ar e água, conforme Figura 5.19. A rocha decomposta foi tratada com calda de cimento (*slush-grout*) espalhado manualmente com vassouras. Os locais com blocos de rocha sã exposta e envolvida com material alterado foram tratados com calda de cimento aplicada previamente ao lançamento do aterro. A calda de cimento aplicada teve como fator água/cimento o valor 0,5 em peso e argamassa de areia e cimento com traço de 2:1, com fator água/cimento trabalhável.

Na barragem da margem esquerda, o tratamento da rocha decomposta da fundação e área da transição n° 2, a montante, teve aplicação de calda de cimento (*slush-grout*). Entre as estacas 2 + 970,0 e 3 + 485,0 foi construído tapete impermeável, de material argiloso, a montante do eixo da barragem, conforme Figura 5.11.

Além disso, na área do tapete drenante da fundação, o preparo consistiu na remoção mecânica do material superficial. Nas áreas de apoio do cascalho de terraço, o preparo da fundação consistiu na limpeza mecânica através de lâmina de trator.

Já nas áreas de transições números 1 e 2, base das estruturas de concreto e fundação da barragem de enrocamento, antigo leito do rio, houve um programa de injeção de calda de cimento, como forma de tratar os derrames e interderrames de rocha alterada. O tratamento consistiu de aplicação de calda de cimento em uma série de furos primários, secundários e terciários, executados nos vértices de uma malha de 12 m de lado, com o objetivo de detectar e preencher as cavernas e descontinuidades existentes na rocha.

A profundidade variou de 19 m a 29 m, com furos de diâmetros de 7,6 cm (3”) a 10,1 cm (4”). Na área do canal do rio, a fundação apoiou-se em rocha com inclinação íngreme, Figura 5.22, em que houve tratamento em concreto dental e aplicação de argamassa *slush-grout*, após limpeza com jatos de água e ar, conforme mostram as Figuras 5.19 e 5.20.

Observa-se pelas Figuras 5.21 e 5.22 que nos limites das margens esquerda e direita, próximo às ombreiras, a declividade não é acentuada.

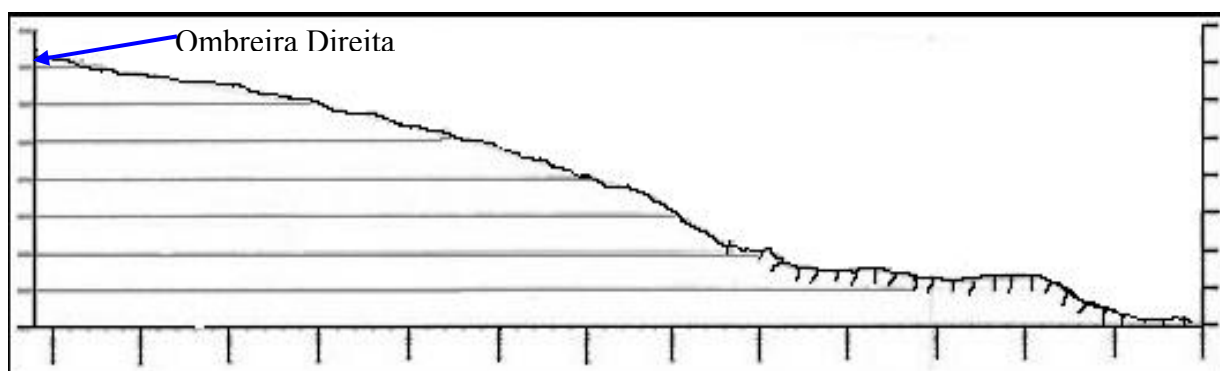
**Análise de dados:** As informações apresentadas sobre o tratamento de irregularidades na fundação demonstram cuidado no tratamento da rocha alterada. Portanto, ao analisar os dados estatísticos da Tabela 5.8, adotou-se o fator de peso  $W_{E(f)}$ , para as barragens de terra de São Simão, o valor de 0,9. De acordo com os dados da Tabela 5.21, a probabilidade qualitativa de ocorrência de *piping* através do barramento por falha no tratamento da fundação é “muito menos provável”.



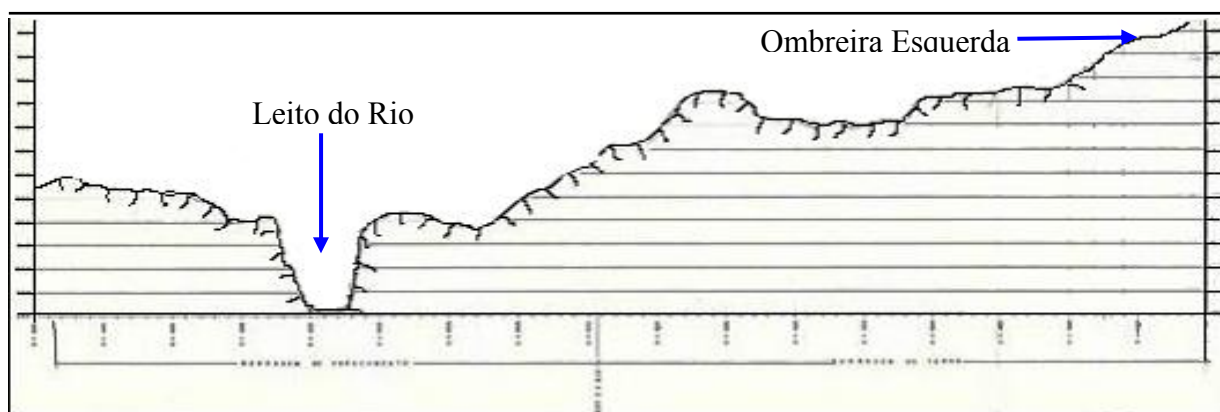
**Figura 5.19** – Preparação da rocha de fundação no leito do rio com jatos de água e ar  
Fonte: CEMIG – GA/SM.



**Figura 5.20** – Preparo de fundação no canal do leito do rio  
 Fonte: Modificado de VIOTTI *et al.*, 2006, p 35.



**Figura 5.21** – Perfil longitudinal da fundação da barragem direita  
 Fonte: Modificado de CEMIG, 1.978.



**Figura 5.22** – Perfil longitudinal da barragem esquerda  
 Fonte: Modificado de CEMIG, 1.978.

**Tabela 5.8** - Fator de peso em tratamento da fundação - *piping* através do barramento,  $W_{E(ft)}$ 

Descrição do tratamento da fundação	Porcentagem estimada da amostra	Fator de peso estimado $W_{E(ft)}$	Fator x amostra %
Faces verticais e saliências, na rocha da fundação do núcleo não foram tratadas	10 %	2	0,20
Irregularidades na fundação ou nas extremidades limites, extremidades com inclinação íngreme	30 %	1,2	0,36
Cuidado nas áreas de mudança de inclinação na fundação, tratamento de fendas pelo preenchimento com calda de cimento	60 %	0,9	0,54
<b>Total</b>	<b>100 %</b>	$\Sigma$ (fatores x Pop%) =	<b>1,10</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 144.

Ressalta-se que esses dados estatísticos consideraram barragens construídas após 1950, época em que se passou a adotar critérios para tratamento de fundação de forma padronizada e com adequado registro de dados. Esses dados correspondem a 80% da amostra de barragens construídas até 1986, segundo informações de Foster *et al.* (1998).

#### 5.4.8 Observações de percolação (aspecto da água): Fator de peso $W_{E(obs)}$

Fonseca (2003) relata a instalação de 11 medidores de vazão, tipo vertedouro triangular nas barragens esquerda e direita. Esses medidores foram instalados em diversos pontos na extensão da barragem UHE São Simão e têm a função de monitorar as vazões percoladas pela fundação e pelo maciço.

As variações que ocorrem nas vazões são proporcionais às oscilações do nível d'água do reservatório. A transparência da água percolada pode ser observada, por exemplo, pelas Figuras 5.23 e 5.24. Os dados da Tabela 5.9 e Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 evidenciam que as medidas de vazões têm sido inferiores aos parâmetros de controle da Tabela 5.9.



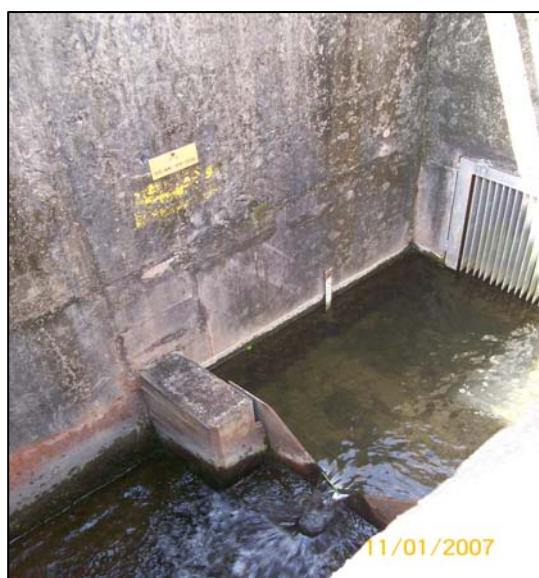
**Tabela 5.9** – Valores de vazões nas barragens da UHE São Simão

Medidor de Vazão	Vazão de Controle (l/s)
VV004-BTME	9,3
VV005-BTME	8,3
VV006-BTME	11,3
VV007-BTME	5,9
VV009-BTME	1,0
VV010-BTME	29,2
VV011-BTME	49,8
VV012-BTME	1,0
VV013-BTME	10,3
VV001-BTMD	25,5
VV002-BTMD	3,4

Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 144.

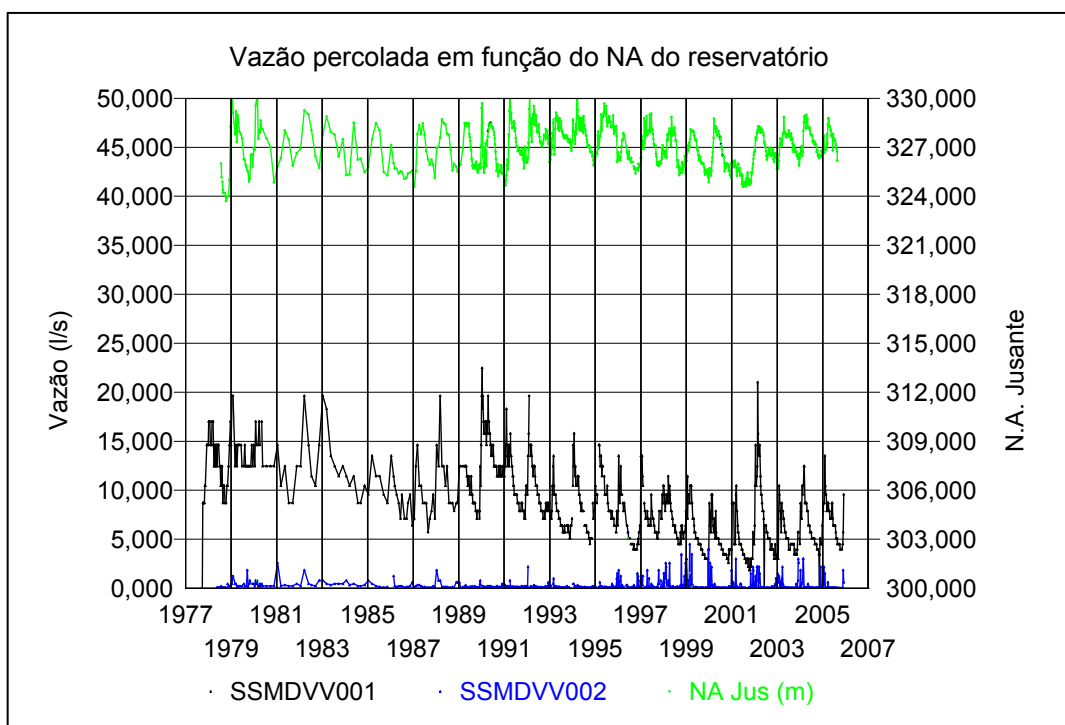


**Figura 5.23** – Medidor de vazão VV-005 (margem esquerda)

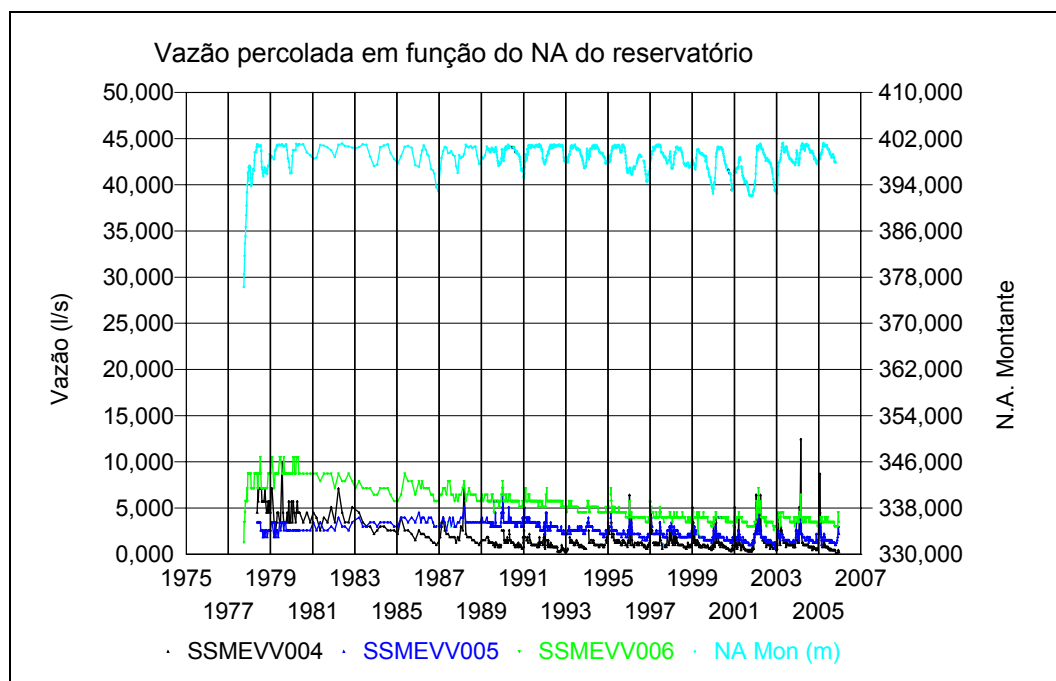


**Figura 5.24** – Medidor de vazão VV-006 (margem esquerda)

As Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 mostram variações bruscas, que correspondem a valores de pico de precipitações, em ambas as barragens, margens esquerda e direita.

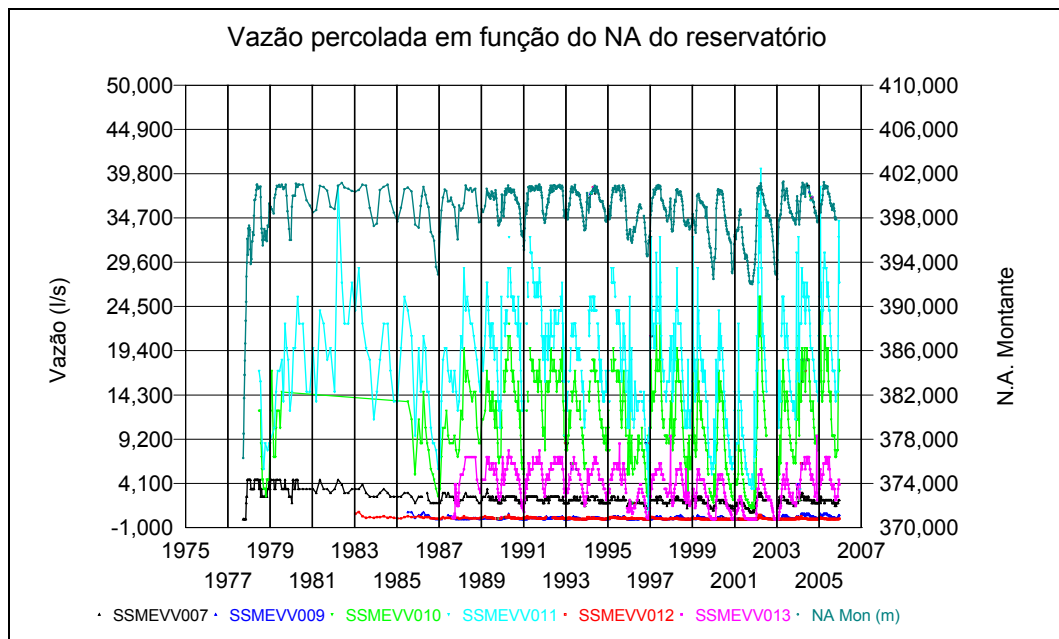


**Figura 5.25** – Medidores de vazão (VV001 – VV002) – Barragem de terra da margem direita  
 Fonte: CEMIG – GA/SM.



**Figura 5.26** – Medidores de vazão (VV004 – VV005 – água de surgências e VV006 – água percolada pela barragem) – Barragem de terra da margem esquerda  
 Fonte: CEMIG – GA/SM.





**Figura 5.27** – Medidores de vazão (VV010 – VV013) – Barragem de terra da margem esquerda

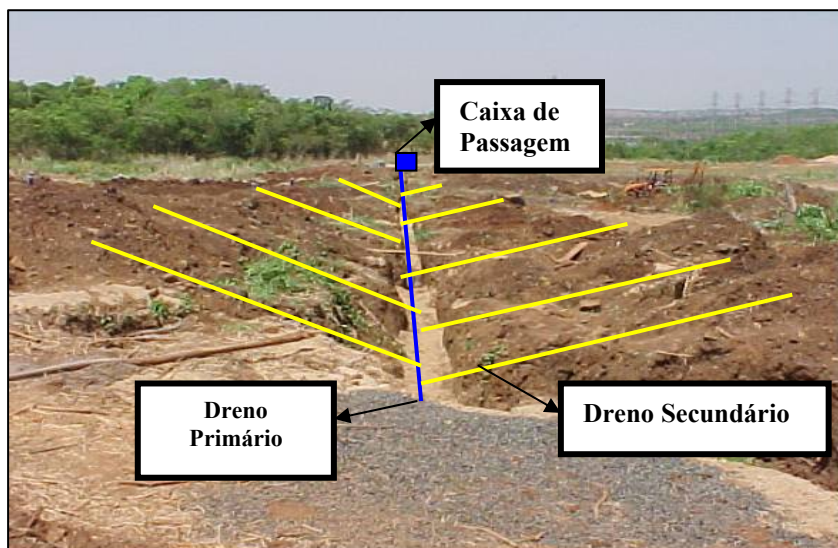
Fonte: CEMIG – GA/SM.

A análise de vários relatórios de monitoramento das condições das barragens de terra ao longo dos anos registra algumas surgências a jusante na barragem da margem esquerda, desde a década de 1980 (CEMIG, 1986). Ressalta-se que essas surgências estavam relacionadas ao período de maior intensidade de precipitação, não se observando suas ocorrências no período de estação seca. Para eliminar essas surgências, foi projetada uma obra de drenagem em 2002, pela empresa DAM Projetos e Engenharia, projeto AZT-E-DE-003 (CEMIG, 2003).

Essa obra de drenagem foi realizada no ano de 2003, em forma de espinha de peixe, mostrada nas Figuras 5.28 e 5.29. A espinha de peixe consistiu na construção de canaletas com profundidade de 1,50 m (máx.) e 0,60 m de largura, com tubo de dreno de diâmetro nominal de 100 mm tipo Kananet/ Kanaflex, envolto por brita 1, manta geotêxtil e areia fina a média.



**Figura 5.28** – Detalhe da obra de tratamento de surgências com canaletas de drenagem  
Fonte: Modificado de CEMIG, 2003, p.4.



**Figura 5.29** – Tratamento de surgências com canaletas de drenagem em espinha de peixe  
Fonte: Modificado de CEMIG, 2003, p. 5.

**Análise de dados:** Conforme os dados de percolação mostrados anteriormente, não se observa aumento súbito do volume de água nos medidores de vazão. Após a obra de reparo de surgências não se constatou sua formação a jusante da barragem, conforme verificação feita por Viotti *et al.* (2006).

Os relatórios de inspeção da CEMIG mostram que não há formação de dolinas no barramento ou presença de água barrenta nos vertedouros de medição de vazões de percolação. O aspecto da água observada em inspeções nos 29 anos de operação tem se mostrado cristalino.

Relacionado às observações ao longo dos 29 anos de operação da UHE São Simão, Viotti *et al.* (2006) relatam a ocorrência de um *piping* logo após o enchimento na seção 9, na estaca 2 + 016m, como descrito a seguir:

Durante o primeiro enchimento houve um *piping* pelo tubo de condução das tubulações dos instrumentos PH 901 e 919 e PT 901 e 905. Este é um tubo de PVC de ~ 100mm, que vem do aterro até a galeria da Elev. 377,5m. Houve um descuido na época da obra, na injeção deste tubo, sendo que foi feito somente um tamponamento superficial com argamassa na parede da galeria. Vários metros cúbicos de lama foram transportados para a galeria, sendo que o fenômeno parou por si próprio. Analisando-se a localização do tubo no aterro, o mesmo encontra-se relativamente próximo da zona de cascalho de terraço.

Acreditamos que o *piping* parou pelo embuchamento da boca do tubo por cascalho. O cascalho sempre foi descrito na época como um material autocicatrizante. No caso acima descrito parece ter havido uma autocicatrização, em que os pedregulhos mais grossos fazem a primeira barreira e os de granulometria imediatamente inferior vão sendo cercados pelos mais graúdos e assim sucessivamente (VIOTTI *et al.*, 2006, p. 42).

De acordo com os dados apresentados anteriormente e consultando a Tabela 5.10, adotou-se o fator de peso para observações de percolação  $W_{E(obs)} = 1,0$  e, conforme a Tabela 5.21, a estimativa de probabilidade qualitativa é “neutra”.

**Tabela 5.10 –** Fatores de peso para observações de percolação - *piping* através do barramento,  $W_{E(obs)}$

Observações de percolação	% População (estimado)	Fator de peso $W_{E(obs)}$	%População x Fator de peso
Percolação barrenta, rápido aumento na vazão de descarga	2 %	até 10	0,20
Vazão de percolação aumenta gradualmente, presença de dolina	10 %	2	0,20
Vazão de percolação estável, limpa ou não observada	20 %	1,0	0,20
Diminuição na vazão de percolação	30 %	0,7	0,21
Vazão de percolação é pequena ou muito pequena	38 %	0,5	0,19
<b>TOTAL</b>	<b>100 %</b>	$\Sigma$ (fatores x Pop%) =	<b>1,01</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 145.

#### 5.4.9 Freqüência de monitoramento e supervisão: Fator de peso $W_{E(mon)}$

A análise de estabilidade do maciço do sistema de barragens em São Simão conta com monitoramento de diversos instrumentos instalados nas barragens esquerda, direita e em áreas

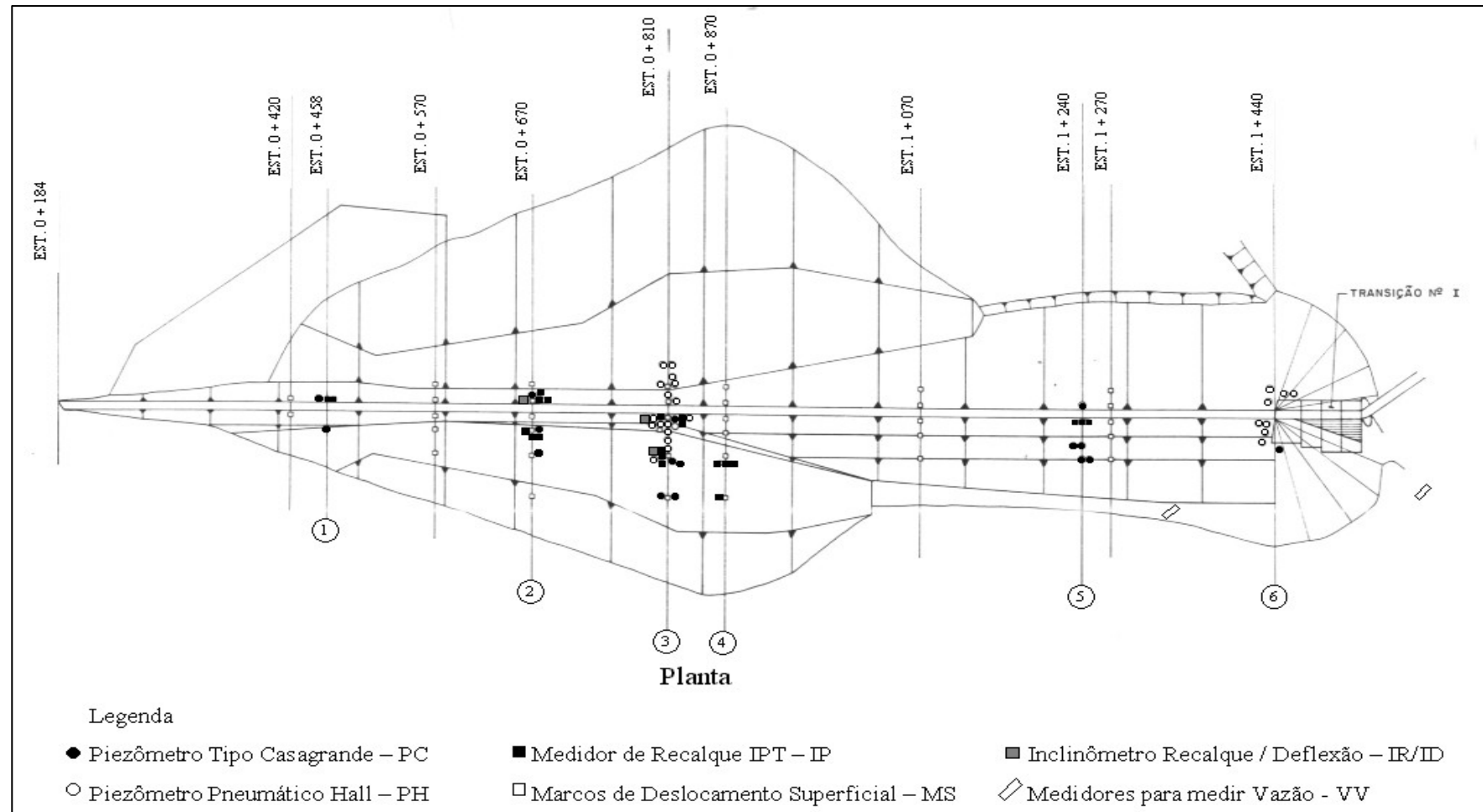
de transição, por meio de seis seções instrumentadas na barragem direita e onze seções instrumentadas na barragem esquerda, conforme Figuras 5.30 e 5.31 a seguir e Tabela 5.11, que também demonstra a frequência de leituras.

**Tabela 5.11 – Instrumentação nas barragens de terra, terra e enrocamento e transições**

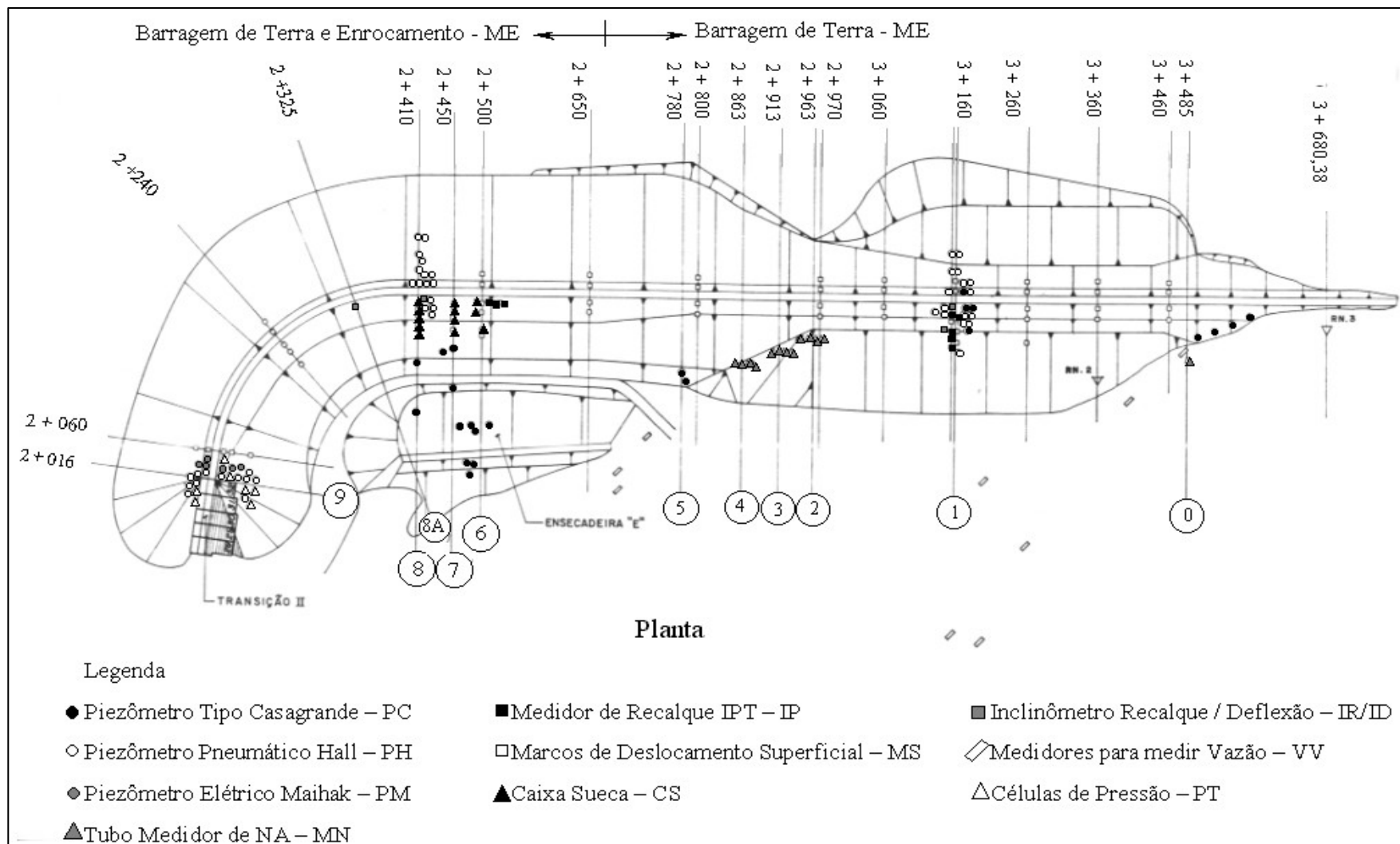
<b>Instrumentos</b>	<b>Nº Instrumentos instalados</b>	<b>Período de leituras</b>
Piezômetro Casagrande modificado (B.Terra)	37	mensal
Piezômetro pneumático	62	mensal
Medidores de recalque tipo IPT	30	semestral
Medidores de NA	01	mensal
Inclinômetro recalque	7	semestral
Inclinômetro deflexão	7	semestral
Vertedor para medir vazões	11	semanal
Células de pressão total	7	mensal
Temperatura ambiente	1	diária
Temperatura no reservatório	1	quinzenal
Cota NA montante	1	diária
Marcos de superfície	85	semestral

**Análise de dados:** Conforme Tabela 5.11, o monitoramento de resultados da instrumentação nas estruturas da barragem é realizado com frequência semanal, quinzenal, mensal e, em alguns instrumentos, semestral. Além dessa frequência de monitoramento, ocorrem inspeções periódicas anuais, realizadas por engenheiros do setor de segurança de barragens da CEMIG. Essas avaliações são orientadas por uma lista de verificação de diversos pontos e respectivo relatório com recomendações para tomada de ações.

Diante desses fatos e analisando a Tabela 5.21, adotou-se o fator de peso  $W_{E(mon)} = 0,8$  com estimativa de probabilidade qualitativa para esse tipo de ocorrência em “menos provável”.



**Figura 5.30** – Planta da instrumentação instalada na barragem de terra da margem direita (BD) da UHE São Simão.  
 Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 79.



**Figura 5.31** – Planta da instrumentação instalada na barragem de terra e na barragem de terra e enrocamento da margem esquerda da UHE São Simão

Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, p. 80.

## 5.5 Resumo dos fatores de pesos e cálculo da probabilidade qualitativa de ocorrência de piping através do barramento

Conforme apresentado no item 5.4, as análises mostraram que a probabilidade média anual, histórica, de ruptura em barragem de terra e enrocamento, em seção zoneada, com 29 anos de operação é:  $P_e = 24 \times 10^{-6}$

A pesquisa de informações (item 5.4) conduziu à escolha de fatores de pesos resumidos na Tabela 5.12 a seguir.

**Tabela 5.12 – Resumo de fatores de pesos para piping através do barramento**

ITEM	CARACTERÍSTICAS	ANÁLISE	PROBABILIDADE QUALITATIVA	FATOR DE PESO
5.4.2	Uso de filtros no barramento	Adequado controle na construção dos filtros. Houve devido controle nas áreas de transição entre o filtro e o núcleo de argila arenosa.	Muito menos provável	0,02
5.4.3	Tipo de solo usado no núcleo	O material usado no núcleo é uma areia argilosa de cor marrom, a maior parte do material classifica-se como CL no Sistema Unificado de Classificação.	Menos provável	0,8
5.4.4	Origem geológica dos materiais usados no núcleo	Aluvionar.	Muito mais provável	1,5
5.4.5	Compactação e controle tecnológico na construção do núcleo	Bom controle de compactação. GC > 100% PN	Muito menos provável	0,3
5.4.6	Tubulações na seção do barramento	Nas barragens de terra, não há tubulações.	Muito menos provável	0,5
5.4.7	Tratamento aplicado na fundação	Fundação das margens esquerda e direita apoiadas em solo residual e aluvionar. Tratamento da rocha decomposta por trincheira, nas áreas de transição e preparo da base da barragem de terra e enrocamento.	Muito menos provável	0,9
5.4.8	Observações de percolação	Vazão de percolação estável e limpa.	Neutra	1,0
5.4.9	Monitoramento e supervisão	Frequência mensal, quinzenal e semanal de coleta de dados.	Menos provável	0,8

A partir da escolha dos fatores de pesos fez-se o ajuste da probabilidade média pela multiplicação entre estes fatores de pesos.

Fatores de peso:  $0,02 \times 0,8 \times 1,5 \times 0,3 \times 0,5 \times 0,9 \times 1,0 \times 0,8 = 2,6 \times 10^{-3}$

$$P_e = 24 \times 10^{-6} \times 2,6 \times 10^{-3}$$

$$P_e = 6,2 \times 10^{-8}$$

## 5.6 Aplicação do método UNSW para ocorrência de piping através da fundação

### 5.6.1 Dados das seções típicas

Conforme descrito no item 5.4.1, as seções das barragens de terra das margens esquerda e direita têm a configuração zoneada. A análise dos dados históricos de probabilidade apresentados na Tabela 5.1 mostra que a probabilidade média anual a ser adotada para as barragens de terra da UHE São Simão, com 29 anos de operação, é:  $P_f = 19 \times 10^{-6}$ .

### 5.6.2 Filtro usado na fundação: Fator de peso $W_{F(fil)}$

A observação da seção cinco da barragem direita, Figura 5.8; outra seção na transição nº 1, representada pela Figura 5.9; a seção cinco da barragem esquerda, na Figura 5.13 e a seção típica da barragem de terra e enrocamento na Figura 5.16 constata o uso de filtros chaminé e filtros do tipo tapete drenante de enrocamento, sobre a fundação do sistema da Barragem de São Simão.

Portanto, de acordo com os dados estatísticos da Tabela 5.13, a linha da tabela para barragens que são dotadas de filtro têm estatística que determinam o fator de peso  $W_{F(fil)} = 0,8$ . A entrada desse fator de peso na Tabela 5.22 implica probabilidade qualitativa “menos provável”.

**Tabela 5.13** - Fatores de pesos para filtros na fundação – piping através da fundação,  $W_{F(fil)}$

Presença de filtros na fundação	RUPTURAS		ACIDENTES		POPULAÇÃO		FATORES DE PESOS		
	Nº	%	Nº	%	%	%Ruptura %Pop	%Acidente/ %Pop	Fator $w_{F(fil)}$	Fator x Pop%
Nenhum filtro na fundação	18	94,7	33	56,9	54	1,75	1,05	<b>1,2</b>	0,65
Presença de filtro na fundação	1	5,3	25	43,1	46	0,11	0,94	<b>0,8</b>	0,39
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>100</b>	<b>58</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	-	$\Sigma$ (fatores x Pop%) =	<b>1,04</b>	

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 146.



### 5.6.3 Tipo de fundação, condições da rocha ou solo (estado de alteração da rocha):

#### Fator de peso $W_{F(fnd)}$

CEMIG (1976) *apud* Fonseca (2003) relata os estudos geológico-geotécnicos, fatores condicionantes críticos para as barragens de terra e também para a barragem de terra e enrocamento. Esse estudo identificou que a rocha era basáltica e disposta em sete derrames, com seus respectivos interderrames. Os principais fatores condicionantes geológico-geotécnicos estão descritos a seguir.

De acordo com a Figura 5.5, na fundação da barragem direita, da ombreira da margem direita até a transição número 1, observa-se que ela foi dividida em três trechos, A, B e C. O primeiro trecho, denominado trecho A, compreende da estaca 0 + 890 até a ombreira direita, em que a fundação é caracterizada por solo transportado. Nesse trecho, da estaca 0 + 890 a 0 + 700, a fundação é constituída de solo residual. Ainda no trecho A, da Estaca 0 + 700 a 0 + 520, o solo da fundação é constituído de areia argilosa marrom, solo residual e/ou rocha extremamente decomposta de basalto denso. No trecho final, que compreende a estaca 0 + 520 até a ombreira direita, a barragem está apoiada sobre solo transportado, constituído de areia argilosa marrom.

No corpo da barragem direita, trecho entre as estacas 0 + 890 e 1 + 520, compreendendo os trechos B e C da Figura 5.5, a rocha fraturada foi escavada até o topo do derrame 4-3, com remoção da camada de material decomposto da base do derrame 5.

Na região do random compactado e random não compactado, a fundação em solo transportado foi escarificada em 25 cm, corrigida a umidade e compactada.

As prospecções geológicas identificaram que, na área da barragem direita, a rocha possui perfil geológico de materiais de baixa resistência, compressíveis e de alta permeabilidade, com espessuras de até 20 m.

Na Figura 5.11, da barragem esquerda no sentido da estaca 2 + 700 até a ombreira, o preparo da fundação da barragem de terra consistiu na raspagem do material humoso, seguido de escavação por lâmina e escarificador de trator de esteira até as cotas definidas em projeto, até encontrar rocha com grau de decomposição aceitável. Próximo à ombreira esquerda, constatou-se a ocorrência de solos.

Nos trechos de random compactado, random não compactado e tapete impermeável, as condições da fundação em solo transportado e tratamento aplicado foram os mesmos da barragem direita.

Na região do núcleo da barragem esquerda, houve preparo com limpeza manual, aplicação de jatos de ar e água, ação mostrada na Figura 5.19. A rocha fraturada foi tratada com *slush-grout* espalhada manualmente com vassoura. Os blocos de rocha que estavam superficialmente expostos e envolvidos em material alterado foram tratados com calda de cimento aplicado previamente ao lançamento do aterro.

Na base da ombreira esquerda, os solos residuais apresentaram resultados similares aos obtidos na ombreira direita.

**Análise de dados:** De acordo com os estudos realizados, relatados em CEMIG (1976), as rochas que compõem os derrames e interderrames são decompostas e de baixa resistência, consideradas erodíveis. Nas proximidades das ombreiras direita e esquerda, havia solo. Esses dados em análise comparativa aos dados estatísticos na amostra de rupturas em grandes barragens, mostrados na Tabela 5.14, permitem concluir que a fundação foi apoiada em rocha e solo. Portanto, pela situação mais desfavorável optou-se pelo fator de peso  $W_{F(fnd)} = 5$ , caso em que a fundação é em solo. Ao analisar a Tabela 5.22 e entrando com o fator de peso 5, conclui-se que a probabilidade qualitativa é “muito mais provável”.

**Tabela 5.14** – Fatores de pesos para tipo de fundação abaixo do *cutoff* - *piping* através da fundação,  $W_{F(fnd)}$

TIPO DE FUNDAÇÃO ABAIXO DO CUTOFF	RUPTURAS		POPULAÇÃO		FATORES DE PESOS	
	No.	%	%	%Rupturas/ %População	Fator $W_{F(fnd)}$	Fator x Pop%
Solo	11	73,3	15	4,9	<b>5</b>	0,75
Rocha erodível	4	26,7	28	0,95	<b>1</b>	0,28
Rocha não erodível		0	57	0	<b>0,05 – 0,01</b>	0,03 – 0,006
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>100</b>	<b>100</b>		$\sum$ (fatores x Pop%) =	<b>1,04 - 1,00</b>

Fonte: Modificado de FOSTER et al., p.147.

#### 5.6.4 Tipo de *cutoff* : Fator de peso $W_{F(ctr)}$

A análise das seções das barragens direita e esquerda (FIG. 5.8, 5.13 e 5.16), além de estudo de plantas de projeto e relatório de controle de qualidade das obras de terra e enrocamento,

mostram que, na margem direita, entre as estacas 0 + 420 e 0 + 870, houve adoção de *cutoff* de base larga e altura variável.

Nas áreas de transição, houve construção de cortina em trincheira, para preencher as fendas existentes na rocha de fundação, de forma a melhorar as condições mecânicas e reduzir o fluxo d'água.

**Análise de dados:** As seções das barragens esquerda e direita são variadas, destacando-se as fundações das barragens de transição e as barragens de terra. Nas primeiras foram realizadas perfurações na rocha para construção de *cutoff* em trincheira, com injeção de calda de cimento e, na base das barragens de terra, houve apenas a limpeza da rocha decomposta, com aplicação de *grout* na base da barragem da margem esquerda, na área da barragem de terra e enrocamento.

Optou-se pelo fator mais desfavorável, conforme a Tabela 5.22, que determina o fator de peso para *cutoff* com fundação em solo  $W_{F(cts)} = 1,2$ . Esse valor infere probabilidade qualitativa “mais provável”.

#### 5.6.5 Tipo de geologia da rocha da fundação: Fator de peso $W_{F(rg)}$

Brito (1973) *apud* Viotti (1975) relata que a geologia da área é formada por uma sucessão de derrames basálticos, praticamente horizontais com espessuras variáveis de 5 a 40 m. Entre os derrames, ocorre freqüentemente uma camada de arenito ou siltito, com espessuras que variam desde poucos centímetros até 15 m. Em algumas dessas camadas, ocorrem blocos disseminados de basalto formando nesse caso uma brecha sedimentar.

Fonseca (2003) relata que, na área da barragem UHE São Simão, ocorrem rochas basálticas, com estratigrafia disposta em sete derrames e seus respectivos interderrames, apresentando uma espessura total de 200,0 m entre as cotas 220,0 e 420,0 m.

Conforme citado no item 5.6.3, nas áreas das barragens esquerda e direita, a fundação apresentava-se sob a forma de solo residual e/ou rocha extremamente decomposta de basalto denso.

**Análise de dados:** Analisando a geologia de um trecho de parte da fundação, foi constatada rocha de basalto com textura sã, vesicular, vesicular-amigdaloidal, alterada e em forma de

solo residual. Entrando com essas informações na Tabela 5.22, determina-se o fator de peso  $W_{F(sg)} = 1,2$ .

Em análise da geologia do outro trecho da fundação, verificou-se a formação de rocha sã sobre a qual parte da barragem está apoiada. Pelo princípio de adoção da condição mais desfavorável, o fator de peso adotado foi  $W_{F(rg)} = 3,0$ , de acordo com a linha que trata de geologia da rocha mostrada na Tabela 5.22. Esse fator de peso é considerado como probabilidade qualitativa “muito mais provável”.

#### 5.6.6 Observações de percolação pela fundação (aspecto da água) e medidas de poropressões ao longo do tempo: Fator de peso $W_{F(obs)}$

Fonseca (2003) relata que as estruturas de terra e enrocamento da Barragem São Simão são monitoradas por 37 piezômetros tipo Casagrande (PCs) e 62 piezômetros pneumáticos tipo Hall (PHs), instalados ao longo dos maciços e fundações das barragens esquerda e direita, nas seções mostradas nas Figuras 5.30, 5.31, 5.34, 5.36 e 5.37. As Figuras 5.32a e 5.32b mostram exemplo de leitura sendo realizada em Piezômetro Casa Grande Modificado, no qual vários dados são mostrados nas páginas seguintes.



**Figura 5.32a**



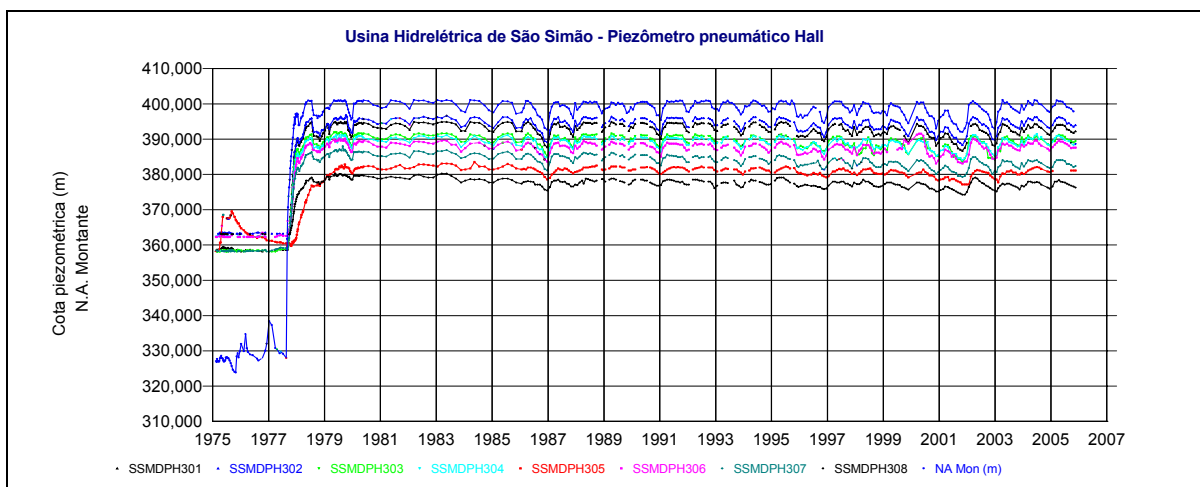
**Figura 5.32b**

**Figuras 5.32 – Piezômetro Casa Grande Modificado PC-501**

Os dados de piezometria da barragem de terra da margem direita, mostrados na Figura 5.33, representam as leituras da seção três da barragem da margem direita (FIG. 5.34), que conta com três piezômetros pneumáticos Hall instalados na fundação em solo residual. Nessa seção ainda há seis piezômetros Hall instalados nas zonas de cascalho de terraço e de argila. Há também dois piezômetros Casagrande instalados na zona de random.

Fonseca (2003) relata sobre a estabilidade do fluxo de água no maciço, demonstrado pelos valores de poropressões que acompanham as variações de nível d'água do reservatório. Observa-se a estabilidade dos valores de cotas piezométricas em cinco seções instrumentadas com piezômetros ao longo do aterro e fundações, na barragem de terra da margem direita (seções 1, 2, 3, 5 e 6). As maiores variações ocorreram durante o período de enchimento do reservatório (FIG. 5.33).

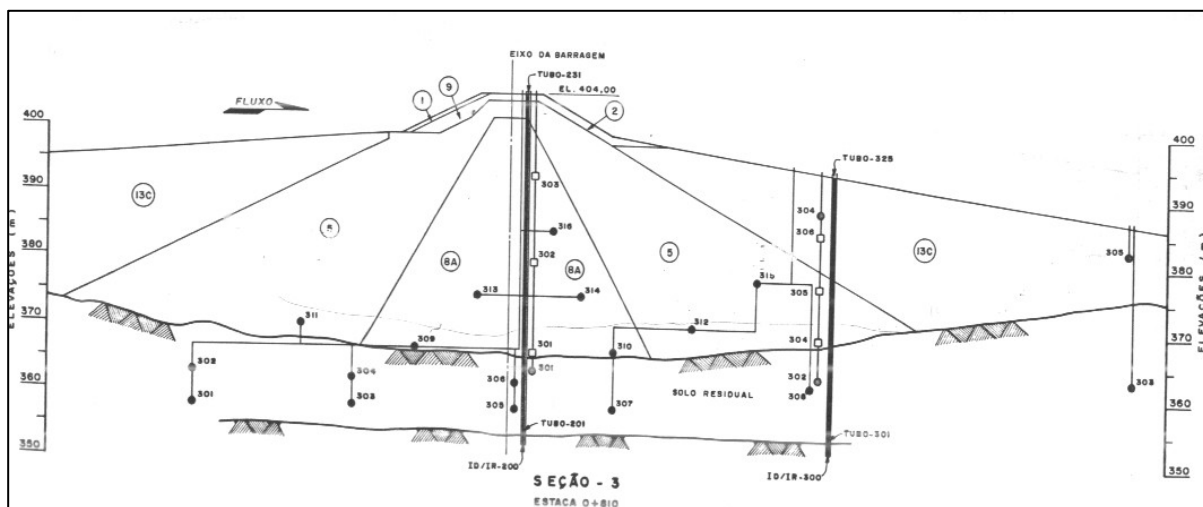
Viotti *et al.* (2006) ressaltam que os piezômetros de fundação estão praticamente estabilizados e mostram perda de carga aproximadamente linear entre eles.



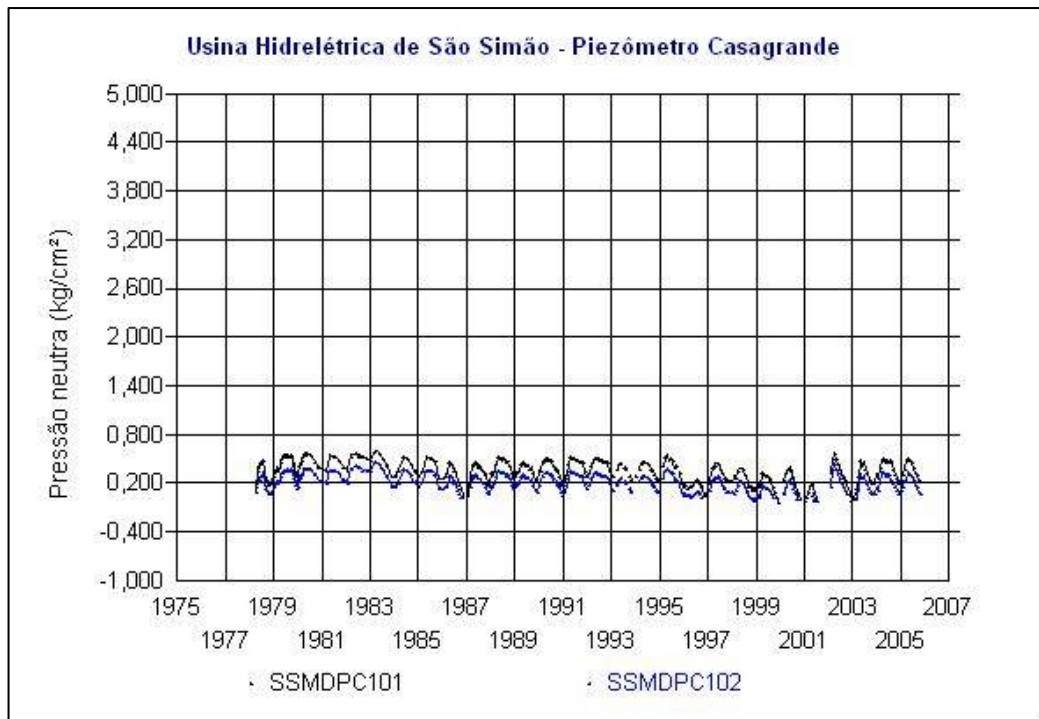
**Figura 5.33** – Registros típicos das leituras dos piezômetros instalados na BTMD – Seção 3 – Estaca 0 + 810

Fonte: CEMIG – GA/SM.

Observa-se pela Figura 5.35 que os valores de poropressões dos instrumentos instalados na fundação não apresentam aumentos súbitos. Esse fato se deve às condições geológicas da fundação, que possibilita boa percolação da água, sem haver aumento das poropressões.

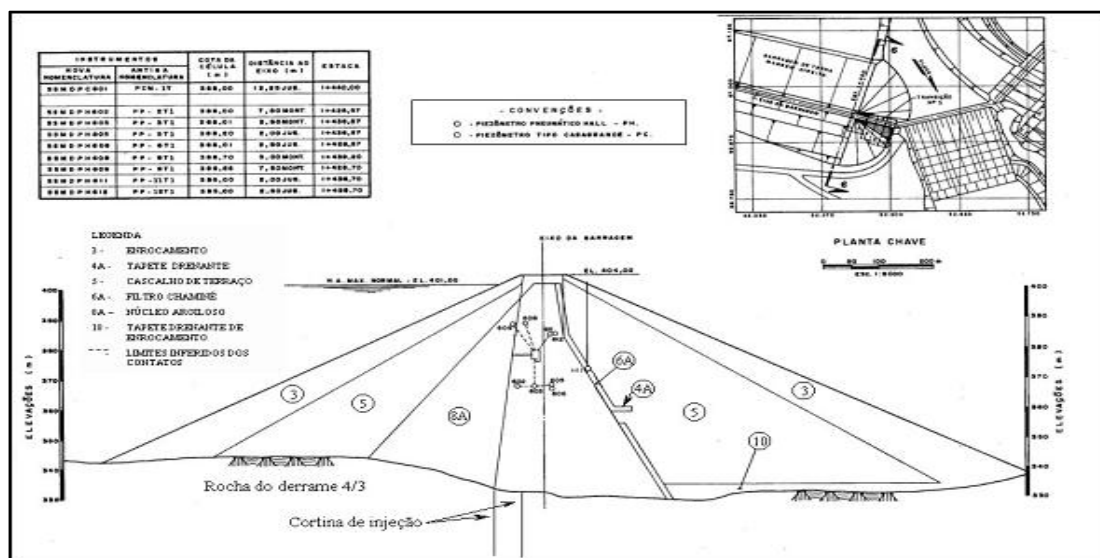


**Figura 5.34** – Barragem de terra da margem direita – Seção 3 – Estaca 0 + 810 m  
Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, Anexo I.



**Figura 5.35** – Registros típicos de poropressões na BTMD Seção 1 – Estaca 0 + 460  
Fonte: CEMIG – GA/SM.

A Figura 5.36 mostra a seção 6 posicionada na estaca 1 + 440m, em que há oito piezômetros Hall e um piezômetro Casagrande (PC601) instalado no interior do filtro inclinado e junto ao paramento de jusante, para controle de potenciais anomalias do fluxo nessa região da interface.



**Figura 5.36** – Barragem de terra da margem direita – Seção 6 – Estaca 1 + 440,0 m  
Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, Anexo I.

Viotti *et al.* (2006) destacam que os piezômetros localizados a montante do eixo apresentam perda de carga, já os de jusante apresentam ligeira elevação de carga. Uma junta de consultores realizou visita técnica em agosto de 2006 e relatou que as cargas elevadas são comuns em região de percolação preferencial como é o contato solo/concreto. A Figura 5.35 mostra que os resultados de leituras de poropressões apresentam-se aproximadamente estabilizadas com ligeira tendência de queda, confirmada pelos valores da Tabela 5.15, que tiveram leituras realizadas em 24/09/1979 (NA 401,1m) e 18/03/2005 (NA 401,0m).

**Tabela 5.15** – Leituras de piezômetros, 24.09.79 e 18.03.05, NA 401,0 m

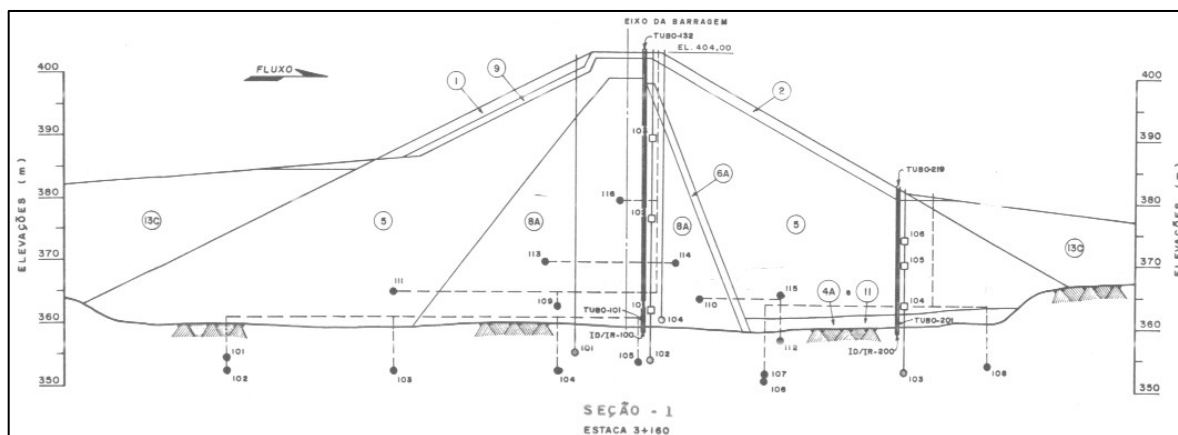
Piezômetro	Distância à estrutura (m)	Afastamento (m)	Cota da célula (m)	Cota Piezométrica (m)	
				1979	2005
PH 603	0	2,5 mont.	368,0	381,8	382,9
PH 605	0	2,0 jus.	368,0	379,4	382,7
PH 608	0	5,0 mont.	388,7	396,6	395,9
PH 611	0	2,0 jus.	385,0	386,2	385,4
PH 602	10	7,5 mont.	368,0	382,9	383,9
PH 606	10	2,5 jus.	368,0	381,2	382,3
PH 609	10	7,5 mont.	388,7	394,1	391,8
PH 612	10	2,5 jus.	385,0	386,7	385,5

Fonte: Modificado de VIOTTI *et al.*, 2006, p. 27.

As informações relativas à instrumentação da barragem da margem esquerda são descritas a partir desse ponto. Um dos tipos de instrumentos são os piezômetros, Fonseca (2003) relata informações sobre o comportamento desses instrumentos instalados na seção um, estaca 3 + 160 mostrados na Figura 5.37. As informações foram confirmadas em visita técnica realizada pelo autor desta dissertação, em 11 e 12/01/2007, como ilustra as Figuras 5.38 e 5.39, onde houve a oportunidade de acompanhar os métodos usados nas leituras da instrumentação, em evidência as leituras em piezômetros modelo Hall.

Um dos fatos observados nos resultados da instrumentação na fundação da barragem esquerda é a redução contínua de cargas piezométricas, no sentido montante-jusante. Isso decorre da eficiência do tapete impermeabilizante, construído a montante da barragem e da cortina de injeção executada nas fundações das barragens de transição e concreto. Esse fato pode ser observado nos gráficos das Figuras 5.40 e 5.41, que mostram os valores de cotas piezométricas inferiores aos estabelecidos em projeto, inclusive inferiores aos limites máximos permitidos.





**Figura 5.37** – Seção 1 – Barragem de terra da margem esquerda – Estaca 3 + 160 m  
**Fonte: Modificado de FONSECA, 2003, Anexo I**

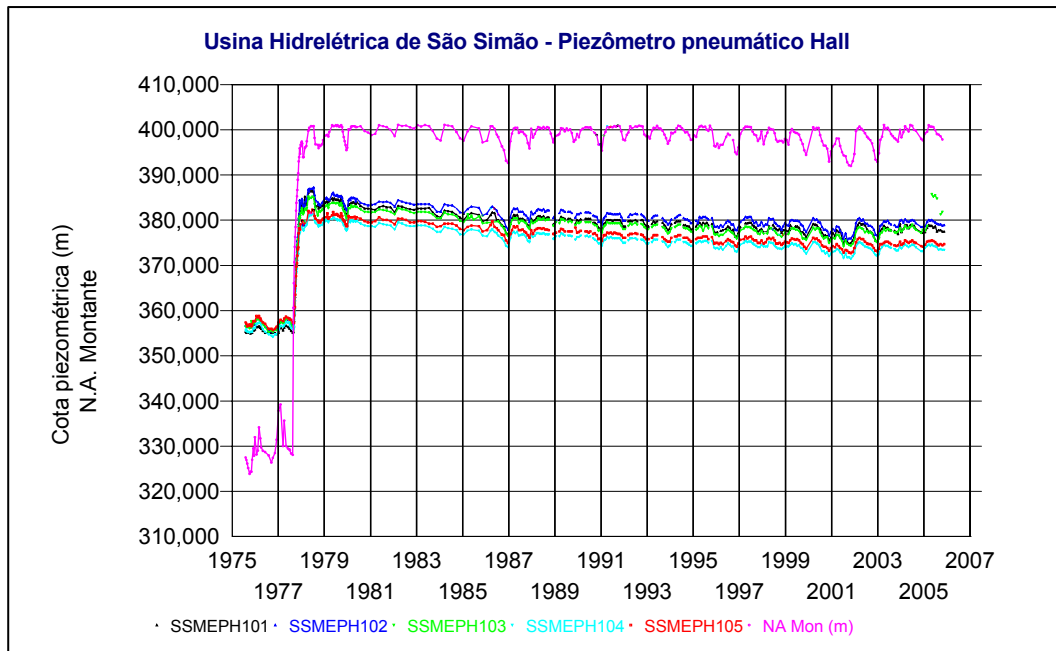


**Figuras 5.38** - Leitura de piezômetros hidráulicos PH's (margem esquerda)



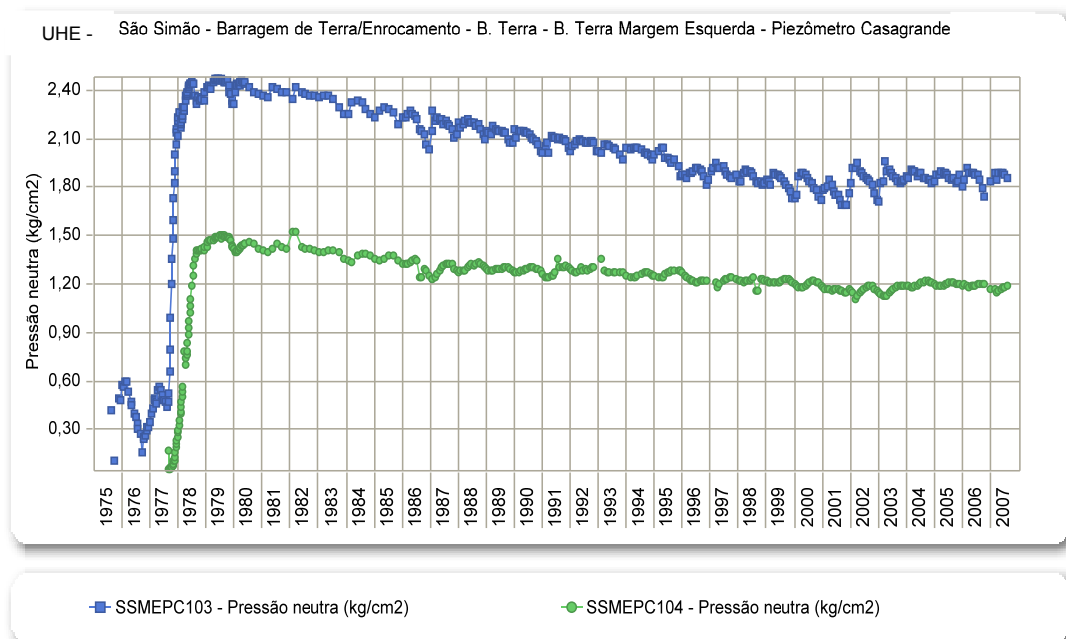
**Figura 5.39** – Quadro de Piezômetros Hidráulicos PHs  
 Seção 9 – Transição nº2 – Margem esquerda, galeria de inspeção na elevação 377 m





**Figura 5.40** – Registros típicos das leituras dos piezômetros pneumáticos instalados na BTME – Seção 1 – Estaca 3 + 160 m

Fonte: CEMIG – GA/SM.



**Figura 5.41** – Registros típicos de leituras de poropressões – BTME Seção 1- Est. 3+160 m

Fonte: CEMIG – GA/SM.

Outro fator considerado é o aspecto das águas percoladas, mostrados nas Figuras 5.23 e 5.24, comentadas no item 5.4.8. A água apresenta-se cristalina e sem registro de fatos de alteração brusca em sua coloração e/ou volume, ao longo dos 29 anos de monitoramento.

**Análise de dados:** Conforme descrito anteriormente, o monitoramento de 99 piezômetros em 29 anos de operação não demonstra aumento súbito de poropressões ou mesmo aumento gradual de cota piezométrica. Essas informações, comparadas aos dados da Tabela 5.22 determinam o fator de peso para observações de poropressões  $W_{F(obs)} = 0,8$ . Considere também o fator de peso para observações de percolação  $W_{F(obs)} = 1,0$ , pois a água mostra-se limpa, cristalina e com volumes estáveis.

Mantendo-se o princípio da situação mais desfavorável, optou-se pelo fator de peso  $W_{F(obs)}=1,0$ . De acordo com esse fator na leitura da Tabela 5.22, determina-se a probabilidade qualitativa como “neutra”.

#### **5.6.7 Freqüência de monitoramento e supervisão: Fator de peso $W_{F(mon)}$**

A análise é a mesma realizada para probabilidade de formação de *piping* através do barramento, conforme descrito no item 5.4.9.

Pela análise da Tabela 5.22, adotou-se o fator de peso  $W_{F(mon)} = 0,8$ . Assim, a estimativa de probabilidade qualitativa para este tipo de ocorrência é “menos provável”.

### **5.7 Resumo dos fatores de pesos e cálculo da probabilidade qualitativa de ocorrência de *piping* através da fundação**

A escolha da probabilidade média anual de ruptura para barragens em operação acima de cinco anos, conforme a tabela 5.1 é  $P_f = 19 \times 10^{-6}$

No item 5.6 foram apresentadas as análises e escolha de fatores de pesos para ajuste da probabilidade média de acordo com as características da barragem, conforme mostra a Tabela 5.16.

**Tabela 5.16** – Resumo de fatores de pesos para *piping* através da fundação

ITEM	CARACTERÍSTICAS	ANÁLISE	PROBABILIDADE QUALITATIVA	FATOR DE PESO
5.6.2	Filtro usado na fundação	Presença de filtro em tapete drenante, construído em enrocamento nas seções típicas da barragem direita, esquerda e transição.	Menos provável	0,8
5.6.3	Tipo de fundação (abaixo do <i>cutoff</i> )	Fundações próximas às áreas das ombreiras das margens direita e esquerda foram construídas em solo.	Muito mais provável	5,0
5.6.4	Tipo de <i>cutoff</i> (solo da fundação)	Construção do <i>cutoff</i> raso e base larga, com características variadas, na fundação das barragens de terra.	Mais provável	1,2
5.6.5	Tipo de geologia da rocha (abaixo do <i>cutoff</i> ).	Rocha de basalto com textura sã, vesicular, vesicular-amigdaloidal e solo residual.	Muito mais provável	3,0
5.6.6	Observações de percolação e poropressões	Os volumes de água percolada permanecem estáveis, e o aspecto da água é limpo.  As medidas de poropressões e cotas piezométricas não apresentam aumentos súbitos, permanecem estáveis nos 29 anos de operação.	Neutra	1,0
5.6.7	Monitoramento e supervisão	Frequência mensal, quinzenal e semanal de coleta de dados.	Menos provável	0,8

A escolha dos fatores de pesos permite ajustar a probabilidade anual de ruptura da barragem por *piping* através da fundação pela multiplicação entre os mesmos, conforme a seguir.

Fatores de peso:  $0,8 \times 5,0 \times 1,2 \times 3,0 \times 1,0 \times 0,8 = 11,5$

$$P_f = 19 \times 10^{-6} \times 11,5$$

$$P_f = 2,2 \times 10^{-4}$$

## 5.8 *Piping* do barramento para fundação

### 5.8.1 Dados das seções típicas

As seções das barragens esquerda e direita, descritas no item 5.4.1, são tipicamente de configuração zoneada.

Para esse tipo de seção, os dados estatísticos da Tabela 5.1 indicam que a probabilidade média anual, histórica, para barragem de terra e enrocamento, zoneada, é de valor igual a  $4 \times 10^{-6}$ .

### 5.8.2 Filtro usado na fundação: Fator de peso $W_{EF(filt)}$

Foster *et al.* (1998) afirmam que a presença de filtros na fundação e/ou no barramento têm pouca influência na formação deste modo de *piping*. Portanto, convencionou-se usar um fator de peso neutro,  $W_{EF(filt)} = 1,0$ .

### 5.8.3 Profundidade do *cutoff* e características da fundação: Fator de peso $W_{EF(cot)}$

Em toda a extensão do barramento houve variação na construção de *cutoff*, sendo em trincheira profunda na base das estruturas de transição. Na base das barragens direita e esquerda, próximo às margens, o *cutoff* é raso e de grande largura. Ao analisar os dados das Tabelas 5.17 e 5.23, o fator de peso que melhor representa essa condição é  $W_{EF(cot)} = 0,8$ , ou seja, probabilidade qualitativa “menos provável”.

### 5.8.4 Tipo de fundação (rocha ou solo): Fator de peso $W_{EF(fnd)}$

Esse fator de peso leva em consideração as situações em que o *piping* pode ocorrer no solo ou na rocha. A descrição do item 5.4.1 relata que as fundações estão apoiadas em rocha e solo transportado, nas áreas próximas às margens direita e esquerda. Ao analisar os dados das Tabelas 5.17 e 5.23 e levando em conta a situação mais desfavorável, o fator de peso que melhor representa essa situação é  $W_{EF(fnd)} = 1,5$ . Nessa condição a probabilidade qualitativa é “mais provável”.

### 5.8.5 Medidas de controle da erosão na fundação do núcleo: Fator de peso $W_{EF(ecm)}$

As medidas de tratamento da rocha na fundação variaram, havendo tratamento da rocha alterada por trincheira profunda na base das estruturas de transição e concreto e apenas limpeza até encontrar a rocha alterada na base das barragens de terra, nas margens direita e esquerda. Analisando os dados da Tabela 5.23 adotou-se o fator de peso  $W_{EF(ecm)} = 0,5$ . Nessa condição, a probabilidade qualitativa é “menos provável”.

### 5.8.6 Processo de aplicação de *grout* na fundação: Fator de peso $W_{EF(gr)}$

CEMIG (1978) relata a preparação da fundação das barragens direita e esquerda, com limpeza manual da fundação rochosa pela aplicação de jatos de ar e água. O tratamento aplicado à rocha muito fraturada foi com argamassa *slush-grout*. A fundação em rocha decomposta após limpeza teve tratamento asfáltico para se evitar intemperização (FIG. 5.42).

Na fundação da área de transição, o preparo da fundação consistiu na limpeza mecânica com lâmina de trator. Na fundação do tapete impermeável de cascalho de terraço na transição nº 2, a montante, o tratamento da rocha decomposta foi através da aplicação de *slush-grout*.

**Análise de dados:** As informações de aplicação de *slush-grout* em algumas áreas da fundação, onde a rocha se encontrava alterada, e pela informação da Tabela 5.17, optou-se por adotar o fator de peso  $W_{EF(gr)} = 0,8$ .

Diante da escolha do fator de peso e de acordo com a Tabela 5.23, adotou-se a probabilidade qualitativa “menos provável” para ocorrência de *piping* do barramento para a fundação.



**Figura 5.42** – Limpeza de rocha da fundação com jato de água  
Fonte: CEMIG – GA/SM.

**Tabela 5.17 – Fatores de pesos para fundação e detalhes de *cutoff - piping* do barramento para a fundação.**

TIPO DE GEOLOGIA DA ROCHA	Nº DE CASOS		PORCENTAGENS			Fator peso	Fator x %Amostra	COMENTÁRIOS
	Incidentes	Incidentes	Amostra	% Incidente	% Amostra			
<b>(A) TIPO DE FUNDAÇÃO</b>						$W_{EF(fnd)}$		
<i>Piping</i> no solo da fundação	8	22,9	46,0	0,50	0,50	0,23	Pesos baseados em dados	
<i>Piping</i> na rocha da fundação	27	77,1	54,0	1,43	1,50	0,81	% de amostra são para:	
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>100</b>	<b>100</b>			<b>1,04</b>	- % de fundação parcialmente ou completamente na rocha, e - % de fundação parcialmente ou completamente em solo.	
<b>(B) CUTOFF EM TRINCHEIRA</b>						$W_{EF(cot)}$		
Raso (ou nenhum)	11	52,4	66,0	0,79	0,80	0,53	Pesos baseados em dados	
Profundo	10	47,6	34,0	1,41	1,50	0,51	O fator de peso para uma profundidade e largura do <i>cutoff</i> "média"	
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>100</b>	<b>100</b>			<b>1,04</b>	assumido é 1,0	
<b>(D) GROUT NA ROCHA DA FUNDAÇÃO</b>						$W_{EF(gr)}$		
Presente	11	45,8	58,0	0,79	0,80	0,46	Fatores de pesos baseados em dados	
Não foi aplicado	13	54,2	42,0	1,29	1,30	0,55		
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	$\sum (\text{fatores} \times \text{Pop}\%) =$		<b>1,01</b>		

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 154.

### 5.8.7 Tipo de geologia da rocha ou solo da fundação: Fator de peso $W_{EF(rg)}$

As fundações das barragens direita e esquerda variaram de rocha basáltica a solo residual, nas áreas próximas às margens.

A análise da Tabela 5.18 define para solo residual  $W_{EF(sg)} = 0,8$  e para rocha ígnea, formada por basalto, o fator de peso  $W_{EF(rg)} = 1,2$ . Pelo princípio da situação mais desfavorável, adotou-se fator de peso  $W_{EF(rg)} = 1,2$ . Analisando a Tabela 5.23, a probabilidade qualitativa representativa para esse tipo de geologia é “mais provável”.

**Tabela 5.18 – Fatores de pesos para tipos de geologia – *piping* do barramento para fundação,  $W_{EF(sg)}$   $W_{EF(rg)}$**

TIPO DE GEOLOGIA DA ROCHA	Nº DE CASOS PORCENTAGENS		PESOS			COMENTÁRIOS
	Incidentes	Incidentes Amostra	% Incidente	Fator	Fator x	
	%	%	%Amostra		%Amostra	
<b>Tipo de geologia do solo</b>						
				$W_{EF(md)}$		
Aluvial	2	22,2	56,0	0,40	<b>0,50</b>	0,28 Baseado em dados
Lacustre		0,0	2,8	0,00	<b>0,50</b>	0,01 Não há dados, esperado ser < 1,0 para granulometria fina
Glacial	4	44,4	18,8	2,37	<b>2,00</b>	0,38 Baseado em dados
Eólico		0	6,5	0,00	<b>0,50</b>	0,03 Não há dados, esperado ser < 1,0 para granulometria fina
Coluvial	3	33,3	6,6	5,04	<b>5,00</b>	0,33 Baseado em dados
Residual		0	8,3	0,00	<b>0,80</b>	0,07 Sem incidentes, esperado ser melhor que a média
Marinho		0	0,5	0,00	<b>0,50</b>	0,00 Não há dados, esperado ser < 1,0 para granulometria fina
Vulcânico		0	0,6	0,00	<b>0,50</b>	0,00 Não há dados, esperado ser < 1,0 para granulometria fina
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>100</b>	<b>100</b>			<b>1,10</b> Fator x % amostra = 1,0
<b>Rochas Sedimentares</b>						
Interderrame de arenito e Folhelho ou calcário	9	40,9	12	3,41	<b>3,00</b>	0,36 Baseado em dados - assume 5% para arenito e folhelho, e 2% para calcário na % da amostra
Conglomerado		0	2,2	0,00	<b>0,80</b>	0,02 Assume ser similar a arenito
Arenito	3	13,6	16,6	0,82	<b>0,80</b>	0,13 Baseado em dados
Siltito		0	0,8	0,00	<b>0,20</b>	0,00 Similar a folhelho
Argilito xistoso (Folhelho)		0	16,6	0,00	<b>0,20</b>	0,03 Gran % da amostra sem incidente
Siltito		0	6,3	0,00	<b>0,20</b>	0,01 Similar a folhelho
Pedra argilosa		0,0	1,3	0,00	<b>0,20</b>	0,00 Similar a folhelho
Calcário	3	13,6	5,1	2,67	<b>2,50</b>	0,13 Baseado em dados - levemente reduzido
Dolomita		0,0	0,6	0,00	<b>1,50</b>	0,01 Esperado ser > 1,0, mas não tão ruim quanto calcário
Aglomerado		0	0,3	0,00	<b>1,00</b>	0,00 Sem dados propostos < ou > 1,0 - assume ser 1,0
Rocha vulcânica		0,0	0,7	0,00	<b>1,00</b>	0,01 Sem dados propostos < ou > 1,0 - assume ser 1,0
Tufo	1	4,5	2,0	2,30	<b>1,50</b>	0,03 1 caso de incidente para tufo reduzido
Rocha salina		0,0	0,2	0,00	<b>2,50</b>	0,01 Esperado ser > 1,0 - similar ao calcário
<b>Rochas Ígneas</b>						
Granito	3	13,6	7,1	1,92	<b>1,00</b>	0,07 Grupo do granito e gnaisse dão fator = 1
Riólito		0	0,6	0,00	<b>1,20</b>	0,01 Sem dados, mas esperado ser > 1,0
Andesito		0	2,8	0,00	<b>1,00</b>	0,03 Sem dados
Gabro		0	0	0,00	<b>1,00</b>	0,00 Sem dados
Basalto	1	4,5	4,8	0,94	<b>1,20</b>	0,06 Esperado ser > 1,0
<b>Rochas Metamórficas</b>						
Gnaisse		0	6,7	0,00	<b>1,00</b>	0,07 Agrupado com granito
Xisto	1	4,5	7,1	0,64	<b>0,60</b>	0,04 Baseado em dados
Filito		0	1,3	0,00	<b>0,60</b>	0,01 Similar ao xisto
Ardósia		0	2	0,00	<b>0,60</b>	0,01 Similar ao xisto
Mármore		0	0,4	0,00	<b>1,20</b>	0,00 Assume ser levemente melhor que a dolomita
Quartzito	1	4,5	2,6	1,73	<b>1,50</b>	0,04 Baseado em dados
Cornubianito		0	0	0,00	<b>0,60</b>	0,00 Similar ao xisto
<b>TOTAL</b>	<b>22</b>	<b>100</b>	<b>100</b>			<b>1,08</b>

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 156.

### **5.8.8 Origem geológica do solo/materiais usados no núcleo: Fator de peso $W_{EF(cgo)}$**

Conforme descrito no item 5.4.4, a origem geológica dos materiais usados no núcleo é um cascalho coberto por material aluvionar constituído de areia argilosa de cor marrom.

Ao consultar a Tabela 5.23, o valor de fator de peso para solo de origem aluvionar é  $W_{EF(cgo)}=1,5$ . Assim, a probabilidade qualitativa é “muito mais provável”.

### **5.8.9 Tipo de solo do núcleo: Fator de peso $W_{EF(cst)}$**

O material usado no núcleo é uma areia argilosa de cor marrom classificado como CL no Sistema Unificado de Classificação. De acordo com a Tabela 5.23, proposta por Foster *et al.* (1998), o fator de peso a ser adotado é  $W_{EF(cst)} = 0,8$ . Para esse fator de peso, a probabilidade qualitativa de ocorrência de *piping* do barramento para fundação é “menos provável”.

### **5.8.10 Compactação do núcleo: Fator de peso $W_{EF(cc)}$**

Foster *et al.* (1998) afirmam que nesse tipo de modo de ruptura de *piping*, do barramento para a fundação, o método construtivo usado no núcleo tem pequena influência no início da formação do entubamento. Portanto, adotou-se probabilidade qualitativa neutra e fator de peso  $W_{EF(cc)} = 1,0$ , conforme Tabela 5.23.

### **5.8.11 Tratamento aplicado na fundação: Fator de peso $W_{EF(ft)}$**

O relatório CEMIG (1978) de controle de qualidade de obras de terra e enrocamento descreve a preparação da fundação das barragens direita e esquerda, na base do núcleo. Nessa área foi realizada limpeza manual com aplicação de jatos de água e ar. Após limpeza, a rocha sã muito decomposta foi tratada com argamassa *slush-grout* espalhada manualmente com vassouras. Locais com blocos de rocha sã exposta e envolvida com material alterado foram tratados com calda de cimento aplicada previamente ao lançamento do aterro.

O tratamento realizado na área do canal profundo do rio envolveu escavação até a retirada de rocha que apresentava ângulo de inclinação maior que 70°, conforme mostra a Figura 5.20.

Na fundação do tapete impermeável, na transição nº 2, a montante, o tratamento da rocha foi feito pela aplicação de *slush-grout*. Com essas informações e dados da Tabela 5.23, adotou-se fator de peso  $W_{EF(ft)} = 0,90$  e correspondente a probabilidade qualitativa “muito menos provável”.



### **5.8.12 Observações de percolação pela fundação e pelo maciço (aspecto da água): Fator de peso $W_{EF(obs)}$**

Conforme citado na escolha de fator de peso na ocorrência de *piping* através do barramento, os medidores de vazão colocados em pontos estratégicos das diversas estruturas não detectaram aumento súbito de vazão de água percolada ou mudança em sua coloração.

Os dados monitorados ao longo de 29 anos evidenciam que as medidas de vazões da água percolada têm sido sistematicamente inferiores aos parâmetros de controle. As variações que ocorreram são proporcionais às oscilações do nível d'água do reservatório.

Assim, de acordo com a Tabela 5.23, adotou-se o fator de peso para observações de percolação  $W_{EF(obs)} = 1,0$ . Esse fator de peso determina probabilidade qualitativa “neutra”.

### **5.8.13 Frequência de monitoramento e supervisão: Fator de peso $W_{EF(mon)}$**

A frequência mensal, quinzenal e semanal na coleta de dados, visitas técnicas anuais de engenheiros do setor de segurança de barragens da CEMIG, aliados às inspeções técnicas orientadas por uma lista de verificação e várias ações tomadas em 29 anos de operação, conduzem à conclusão de que há boas condições de monitoramento.

De acordo com a Tabela 5.23, verifica-se que o fator de peso a ser usado é  $W_{EF(mon)} = 0,8$ . Esse valor de fator de peso confere probabilidade qualitativa “menos provável” para ocorrência desse modo de *piping*, devido à frequência de monitoramento e supervisão.

## **5.9 Resumo dos fatores de pesos e cálculo da probabilidade qualitativa de ocorrência de *piping* do barramento para a fundação**

Após a análise das características da barragem, apresentadas no item 5.4.1 e dados da Tabela 5.1, permitiram definir a probabilidade média anual de ruptura para a barragem da usina UHE – São Simão, em operação há 29 anos. Portanto, a probabilidade  $P_{ef} = 4 \times 10^{-6}$ .

Após esta definição foram feitas as escolhas dos fatores de pesos, mostradas resumidamente na Tabela 5.19. O cálculo da probabilidade de ruptura ajustada é feito pela multiplicação entre os fatores de pesos, conforme a seguir. Fatores de pesos usados no ajuste:

$$1,0 \times 0,8 \times 1,5 \times 0,5 \times 0,8 \times 1,2 \times 1,5 \times 0,8 \times 1,0 \times 0,9 \times 1,0 \times 0,8 = 0,49$$

$$P_{ef} = 4,0 \times 10^{-6} \times 0,49 = 1,99 \times 10^{-6}$$

**Tabela 5.19 – Resumo de fatores de pesos para *piping* do barramento para a fundação**

ITEM	CARACTERÍSTICAS	ANÁLISE	PROBABILIDADE QUALITATIVA	FATOR DE PESO
5.8.2	Filtros	Presença de filtros na fundação e/ou no barramento têm pouca influência.	Neutra	1,0
5.8.3	Tipo de <i>Cutoff</i>	<i>Cutoff</i> raso e largo na base das barragens esquerda e direita próximo às ombreiras.	Menos provável	0,8
5.8.4	Tipo de fundação	Fundação em rocha e solo. Caso mais desfavorável na margem esquerda; fundação apoiada em rocha.	Mais provável	1,5
5.8.5	Medidas de controle da erosão	Na base das barragens de terra e enrocamento não houve medidas de controle da erosão da rocha decomposta, apenas limpeza até encontrar a rocha.	Menos provável	0,5
5.8.6	<i>Grout</i> em fundação	Tratamento da rocha decomposta com <i>slush-grout</i> .	Menos provável	0,8
5.8.7	Tipo de geologia da rocha ou solo	Rocha basáltica compreendendo sete derrames e seus respectivos interderrames e área de fundação em solo residual.	Mais provável	1,2
5.8.8	Origem geológica dos materiais usados no núcleo.	Perfil típico de ocorrência geológica dos depósitos apresentava um cascalho coberto por um material aluvionar.	Muito mais provável	1,5
5.8.9	Tipo de solo do núcleo	Areia argilosa de cor marrom. A maior parte do material classifica-se como CL no Sistema Unificado de Classificação.	Menos provável	0,8
5.8.10	Compactação do núcleo	O método construtivo usado no núcleo tem pequena influência.	Neutra	1,0
5.8.11	Tratamento aplicado na fundação	Limpeza manual com aplicação de jatos de ar e água. A rocha decomposta foi tratada com <i>slush-grout</i> .	Muito menos provável	0,9
5.8.12	Observações de percolação	Os dados monitorados em 29 anos de operação evidenciam que as medidas de vazões têm sido sistematicamente inferiores aos parâmetros de controle.	Neutra	1,0
5.8.13	Monitoramento e supervisão	Frequência mensal, quinzenal e semanal de coleta de dados.	Menos provável	0,8

### 5.10 Cálculo da probabilidade anual de ruptura por *piping* na barragem UHE São Simão (CEMIG)

Nos itens 5.5, 5.7 e 5.9 foram calculadas as probabilidades para ocorrência de *piping* no sistema de barragens da usina UHE – São Simão. A probabilidade total para eventual ruptura pelo modo de erosão regressiva é computada pela soma entre as probabilidades em cada modo: pelo barramento, pela fundação e do barramento para a fundação, como mostra a Tabela 5.20.

**Tabela 5.20** – Probabilidade anual de ruptura por *piping* nas barragens UHE – São Simão (UNSW)

Modo de ruptura	Probabilidades ajustadas
<i>Piping</i> através do barramento	$P_e = 6,2 \times 10^{-8}$
<i>Piping</i> através da fundação	$P_f = 2,2 \times 10^{-4}$
<i>Piping</i> do barramento para a fundação	$P_{ef} = 1,9 \times 10^{-6}$
<b>TOTAL: <math>P_p = P_e + P_f + P_{ef}</math></b>	<b><math>P_p = 2,2 \times 10^{-4}</math></b>

Este resultado mostra que o modo de *piping* que mais contribuiu para esse valor de probabilidade foi a possível ocorrência do fenômeno através da fundação. Um dos fatores que contribuíram com maiores valores de peso foi a condição da fundação, próxima às áreas das margens direita e esquerda.

Outro fator preponderante é a geologia da rocha da fundação, na qual parte das barragens de terra se apóia, ou seja, rocha de basalto com textura sã, vesicular, vesicular-amigdaloidal, alterada e em forma de solo residual.

**Tabela 5.21** – Resumo de fatores de pesos para ruptura por *piping* através do barramento

FATOR	FATORES GERAIS QUE INFLUENCIAM A PROBABILIDADE DE INÍCIO DE <i>PIPING</i> – ACIDENTES E RUPTURAS				
	MUITO MAIS PROVÁVEL	MAIS PROVÁVEL	NEUTRO	MENOS PROVÁVEL	MUITO MENOS PROVÁVEL
<b>TIPO DE SEÇÃO</b>	Refere-se à Tabela 5.1 para média anual de probabilidade de ruptura por <i>piping</i> através do barramento, dependendo do tipo de seção				
<b>FILTROS NO BARRAMENTO</b> $w_{E(fil)}$		Nenhum filtro no barramento, para barragens que usualmente teriam filtros [2]	Outros tipos de barragens [1]	Presença de filtros no barramento de baixa qualidade [0.2]	Presença de filtros no barramento – bem projetados e construídos [0.02]
<b>ORIGEM GEOLÓGICA DE MATERIAIS DO NÚCLEO</b> $w_{E(geo)}$	Aluvial [1.5]	Coluvial Eólico, [1.25]	Residual, lacustre, marinho, vulcânico [1.0]		Glacial [0.5]
<b>TIPO DE SOLO USADO NO NÚCLEO</b> $w_{E(cst)}$	Argilas dispersivas [5] Siltos de baixa plasticidade (ML) [2.5] Areias bem ou deficientemente graduadas (SP, SW) [2]	Silte e areia argilosos (SC, SM) [1.2]	Cascalho bem graduado e deficientemente graduado (GW, GP) [1.0] Siltos de alta plasticidade (MH) [1.0]	Silte e cascalho argilosos (GC, GM) [0.8] Argila de baixa plasticidade (CL) [0.8]	Argila de alta plasticidade (CH) [0.3]
<b>COMPACTAÇÃO</b> $w_{E(cc)}$	Compactação sem rigor [5]	Compactado, modesto controle [1.2]	Núcleo impermeável (argila compactada), aterro hidráulico [1.0]		Compactado, bom controle [0.3]
<b>TUBULAÇÕES OU CONDUTOS</b> $w_{E(con)}$	Tubulações através do barramento – muitos detalhes são deficientes [5]	Tubulações ou condutos através do barramento – alguns detalhes são deficientes [2]	Tubulações através do barramento – tipo USBR [1.0]	Tubulações através do barramento – incluindo filtros a jusante [0.8]	Nenhuma tubulação através do barramento [0.5]
<b>TRATAMENTO DA FUNDAÇÃO</b> $w_{E(ft)}$	Faces verticais não tratadas ou ressaltos/ saliências na fundação do núcleo [2]	Irregularidades na fundação ou na lateral, laterais íngremes [1.2]		Cuidado na modificação do perfil da fundação, preenchimento com calda de cimento [0.9]	
<b>OBSERVAÇÕES DE PERCOLAÇÃO</b> $w_{E(obs)}$	Percolação turva, aumento súbito na percolação [até 10]	Percolação aumenta gradualmente, clara/transparente, perfurações/furos ( <i>Sinkholes</i> ), percolação emerge no talude de jusante [2]	Percolação estável, limpa/clara ou não monitorada [1.0]	Pouca percolação [0.7]	Não se identifica percolação ou é muito pequena [0.5]
<b>MONITORAMENTO E SUPERVISÃO</b> $w_{E(mon)}$	Inspeções anuais [2]	Inspeções mensais [1.2]	Inspeções irregulares de percolação, inspeções semanais [1.0]	Monitoramento semanal – mensal, inspeções semanais [0.8]	Monitoramento diário da percolação, inspeções diárias [0.5]

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 125.

**Tabela 5.22** – Resumo de fatores de pesos para ruptura por *piping* através da fundação

FATOR	FATORES GERAIS QUE INFLUENCIAM A PROBABILIDADE DE RUPTURAS				
	MUITO MAIS PROVÁVEL	MAIS PROVÁVEL	NEUTRO	MENOS PROVÁVEL	MUITO MENOS PROVÁVEL
<b>TIPO DE SEÇÃO</b>	Refere-se à Tabela 5.1 para média anual de probabilidade de ruptura por <i>piping</i> através da fundação				
<b>FILTROS</b> $w_{F(filt)}$		Nenhum filtro presente na fundação quando requerido [1.2]	Sem filtro na fundação [1.0]	Presença de filtro (s) na fundação [0.8]	
<b>TIPO DE FUNDAÇÃO (sob <i>cutoff</i>)</b> $w_{F(fnd)}$	Fundação em solo [5]		Rocha – fraturas abertas ou preenchidas por argila e/ou rocha erodível [1.0]	Rocha de melhor qualidade →	Rocha – fraturas fechadas e não erodível [0.05]
<b>TIPO DE CUTOFF (fundação em solo)</b> $w_{F(cts)}$ OU		Raso ou não há <i>cutoff</i> em trincheira [1.2]	Parede diafragma parcialmente penetrante ou deficiente trincheira em calda de cimento [1.0]	Tapete a montante, parede em trincheira parcialmente penetrante (bem construída) [0.8]	<i>Cutoff</i> em trincheira parcialmente penetrante [0.7]
<b>TIPO DE CUTOFF (fundação em rocha)</b> $w_{F(ctr)}$	Parede espessa, parede diafragma com construção inadequada [3]	Parede diafragma bem construída [1.5]	<i>Cutoff</i> em trincheira médio [1.0]	<i>Cutoff</i> em trincheira bem construído [0.9]	
<b>GEOLOGIA DO SOLO (abaixo <i>cutoff</i>)</b> $w_{F(rg)}$ , OU	Solo dispersivo [5] Cinza vulcânica [5]	Residual [1.2]	Eólico, coluvial, lacustre, marinho [1.0]	Aluvial [0.9]	Glacial [0.5]
<b>GEOLOGIA DA ROCHA (abaixo <i>cutoff</i>)</b> $w_{F(rg)}$	Calcário [5] Dolomita [3] Salina (gipsita) [5] Basalto [3]	Tufo [1.5] Riolita [2] Mármore [2] Quartzito [2]		Arenito, xisto, rocha argilosa, siltito, pedra argilosa, xisto limoso, cornubianito [0.7] Aglomerado, rocha vulcânica [0.8]	Conglomerado [0.5] andesito, gabro [0.5] granito, gnaisse [0.2] xisto, filito, ardósia [0.5]
<b>OBSERVAÇÕES DE PERCOLAÇÃO</b> $w_{F(obs)}$ OU	Percolação turva, aumento súbito na percolação [até 10]	Percolação aumenta gradualmente, clara/limpa, dolina, borbulhamento de areia e água [2]	Percolação estável, limpa/clara ou não observada [1.0]	Pouca percolação [0.7]	Nenhuma percolação medida ou muito pequena [0.5]
<b>OBSERVAÇÕES DE POROPRESSÕES</b> $w_{F(obb)}$	Aumento súbito de pressões [até 10]	Pressões aumentam gradualmente na fundação [2]	Altas pressões medidas na fundação [1.0]		Baixa poropressão na fundação [0.8]
<b>MONITORAMENTO E SUPERVISÃO</b> $w_{F(mon)}$	Inspeção anual [2]	Inspeções mensais [1.2]	Observações de percolação irregular, inspeções semanais [1.0]	Semanal – mensal – monitoramento de percolação, inspeções semanais [0.8]	Monitoramento diário de percolação, inspeções diárias [0.5]

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 126.

**Tabela 5.23** – Resumo dos fatores de peso para acidentes e rupturas por *piping* do barramento para a fundação

FATOR	FATORES GERAIS QUE INFLUENCIAM A PROBABILIDADE DE INÍCIO DE <i>PIPING</i> – ACIDENTES E RUPTURAS				
	MUITO MAIS PROVÁVEL	MAIS PROVÁVEL	NEUTRO	MENOS PROVÁVEL	MUITO MENOS PROVÁVEL
<b>TIPO DE SEÇÃO</b>	Refere-se à Tabela 5.1 para média anual de probabilidade de ruptura por <i>piping</i> do barramento para a fundação				
<b>FILTROS</b> $w_{EF(fil)}$	Mostra ser independente de presença/ausência de filtros no barramento ou na fundação [1.0]				
<b>FUNDAÇÃO CUTOFF EM TRINCHEIRA</b> $w_{EF(cot)}$	<i>Cutoff</i> em trincheira profundo e estreito [1.5]		<i>cutoff</i> em trincheira com media largura e profundidade [1.0]	Raso ou não usa <i>cutoff</i> em trincheira [0.8]	
<b>TIPO DE FUNDAÇÃO</b> $w_{EF(nd)}$		Fundação totalmente ou parcialmente sobre rocha [1.5]			Fundação totalmente ou parcialmente sobre solo [0.5]
<b>MEDIDAS DE CONTROLE DA EROSÃO NA FUNDAÇÃO DO NÚCLEO</b> $w_{EF(ecm)}$	Nenhuma medida de controle da erosão, juntas abertas na rocha ou cascalho de granulometria aberta (não graduado e com grande condutividade hidráulica) [até 5]	Nenhuma medida de controle, condições da fundação são medianas [1.2]	Nenhuma medida de controle, boas condições na fundação [1.0]	Medidas de controle de erosão foram aplicadas, fundação é ruim [0.5]	Medidas de controle de erosão são muito boas e boa condição da fundação [0.3 – 0.1]
<b>APLICAÇÃO DE GROUT NA FUNDAÇÃO</b> $w_{EF(gr)}$		Nenhuma aplicação de <i>grout</i> na fundação em rocha [1.3]	Somente fundação em solo – não aplicável [1.0]	Fundação em rocha com aplicação de <i>grout</i> [0.8]	
<b>TIPO DE GEOLOGIA DO SOLO</b> $w_{EF(sg)}$	Coluvial [5]	Glacial [2]		Residual [0.8]	Aluvial, eólico, lacustre, marinho, vulcânico [0.5]
<b>OU GEOLOGIA DA ROCHA</b> $w_{EF(rg)}$	Interderrame de arenito com argila xistosa ou calcário, [3] Calcário, gipsita [2.5]	Dolomita, tufo, quartzito [1.5] Riolita, basalto, mármore [1.2]	Aglomerado, brecha vulcânica Granito, andesito, gabro, gnaisse [1.0]	Arenito, conglomerado [0.8] Xisto, filito, ardósia, cornubianito [0.6]	Xisto, siltito, xisto limoso, rocha argilosa [0.2]

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 130.

**Tabela 5.23 – Resumo dos fatores de peso para *piping* do barramento para a fundação – acidentes e rupturas. CONTINUAÇÃO**

FATOR	FATORES GERAIS QUE INFLUENCIAM A PROBABILIDADE DE INÍCIO DE <i>PIPING</i> – ACIDENTES E RUPTURAS				
	MUITO MAIS PROVÁVEL	MAIS PROVÁVEL	NEUTRO	MENOS PROVÁVEL	MUITO MENOS PROVÁVEL
<b>ORIGEM GEOLÓGICA DE MATERIAIS DO NÚCLEO</b> $w_{EF(ego)}$	Aluvial [1.5]	Eólico, coluvial [1.25]	Residual, lacustre, marinho, vulcânico [1.0]		Glacial [0.5]
<b>TIPO DE SOLO APLICADO NO NÚCLEO</b> $w_{EF(cst)}$	Argilas dispersivas [5] Silte de baixa plasticidade (ML) [2.5] Areias com boa graduação (SP, SW) [2]	Areias siltosas e argilosas (SC, SM) [1.2]	Cascalhos bem e/ou mal graduados (GW, GP) [1.0] Silte de alta plasticidade (MH) [1.0]	Cascalhos argilosos e siltosos (GC, GM) [0.8] Argilas de baixa plasticidade (CL) [0.8]	Argilas de alta plasticidade (CH) [0.3]
<b>COMPACTAÇÃO DO NÚCLEO</b> $w_{EF(cc)}$	Mostra ser independente da compactação – todo tipo de compactação [1.0]				
<b>TRATAMENTO APLICADO NA FUNDAÇÃO</b> $w_{EF(ft)}$	Faces verticais não tratadas ou ressaltos/ saliências na fundação do núcleo [1.5]	Irregularidades na fundação ou na lateral, laterais íngremes [1.1]		Cuidado na modificação do perfil da fundação, preenchimento com calda de cimento [0.9]	
<b>OBSERVAÇÕES DE ÁGUA PERCOLADA</b> $w_{EF(obs)}$	Percolação turva, aumento súbito na percolação [até 10]	Percolação aumenta gradualmente, clara/transparente [2]	Percolação estável, limpa/clara ou não monitorada [1.0]	Pouca percolação [0.7]	Não se identifica percolação ou é muito pequena [0.5]
<b>MONITORAMENTO E SUPERVISÃO</b> $w_{EF(mon)}$	Inspeção anual [2]	Inspeções mensais [1.2]	Observações de percolação irregular, inspeções semanais [1.0]	Monitoramento semanal e mensal da percolação, inspeções semanais [0.8]	Monitoramento diário da percolação, inspeções diárias [0.5]

Fonte: Modificado de FOSTER *et al.*, 1.998, p. 131.

## 6 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DA BARRAGEM SÃO SIMÃO POR ÁRVORES DE EVENTOS

Este capítulo apresenta a avaliação da vulnerabilidade da Barragem São Simão, por método indutivo, denominado Análise por Árvore de Eventos (ETA – Event Tree analysis). A aplicação do método consistiu conhecer os dados de projeto, construção e operação da barragem, obtidos em documentação listada no item 4.2 e as etapas descritas nesse mesmo item. Ao final do capítulo, são apresentadas as Árvore de Eventos para os modos de ruptura no barramento, na fundação e do barramento para a fundação.

A análise de relatórios de construção e dados de monitoramento da Barragem de São Simão ao longo de 29 anos permitiu elaborar diagramas lógicos (FIG. 6.2, 6.4 e 6.6) e construção de Árvore de Eventos para os três modos de rupturas: *piping* através do barramento, *piping* pela fundação e *piping* do barramento para a fundação (FIG. 6.3, 6.5 e 6.7).

O estudo dos fatores condicionantes geológicos da fundação, relatórios de controle de qualidade da obra, relatórios de inspeções realizadas pela Gerência de Segurança de Barragens e Manutenção Civil da CEMIG e visita técnica à barragem em janeiro de 2007, pelo autor desta dissertação, possibilitaram levantar dados para a construção das Árvore de Eventos. O método contou com o levantamento de dados, a partir de uma lista de verificação (APÊNDICE A). Essa lista permitiu conhecer as seguintes características descritas a seguir.

### 6.1 Possível ocorrência de *piping* no barramento

Um dos pontos de destaque foi a adoção do critério de Terzaghi para dimensionamento de filtros e o controle de qualidade realizado durante a obra. Na elaboração do diagrama de influências (FIG. 6.2), considerou-se a possibilidade de o sistema de filtros e drenagem interna vir a colmatar-se, mesmo havendo bom controle de qualidade durante a construção.

Outro fator preponderante foi observado em visita técnica, com boa transparência da água de descarga e respectivos volumes, medidos nos medidores de vazão de descarga de água, que se apresentam estáveis e sem ocorrência de material granular nos pontos de observação. Além de não ter sido observado aumento abrupto ou gradual de poropressões nesses 29 anos de operação, conforme gráficos apresentados no capítulo 5. Na construção da Árvore de Eventos, foi considerada a possibilidade de haver aumento do volume de descarga de água percolada e carreamento de material granular pelo maciço.



Os relatórios CEMIG (1978, 1982, 1986, 2003) permitiram identificar estudos das áreas de transição de materiais com granulometrias diferentes. Esses estudos realizados durante a construção foram ensaios de caracterização de materiais, ensaios de compactação (HILF), ensaios de permeabilidade hidráulica após o material ter sido compactado e ensaios para determinação de resistência ao cisalhamento. Um evento aleatório considerado na elaboração da Árvore de Eventos foi a possível falha em alguma camada do maciço que pudesse vir a prejudicar o fluxo de água e, conseqüentemente, o desequilíbrio no estado de tensões da matriz do solo, anulando a tensão efetiva.

Durante o estudo do material técnico, identificou-se que houve início de *piping* durante o primeiro enchimento na área de contato do núcleo com a estrutura de concreto, na seção 9, elevação 377,5 m, fato relatado nesta dissertação, no item 5.4.8. Ressalta-se que houve autocicatrização (embuchamento) do entubamento, graças às características do cascalho de terraço usado no núcleo da barragem.

Outro fator considerado na construção da Árvore de Eventos foi a possibilidade de ruptura do barramento em consideração ao progresso do *piping* para proporções de um grande entubamento.

## **6.2 Possível ocorrência de *piping* pela fundação**

O estudo dos fatores condicionantes geológico-geotécnicos da área permitiu identificar que, nas barragens de terra, direita e esquerda, a fundação da barragem foi construída sobre rocha de basalto alterado, solo transportado e solo de característica residual, sendo este último fator favorável à eventual erosão regressiva nas áreas próximas às margens. Esses fatores foram levados em consideração para desenvolver o diagrama de influência (FIG.6.4).

Outro fato observado durante o estudo foi o tratamento da rocha alterada com *slush-grout*, após limpeza com jatos de água e ar. A elaboração do diagrama de influência e respectiva Árvore de Eventos levaram em consideração a possibilidade de haver fluxo de água percolada pela fundação, mesmo após o tratamento descrito. Isso poderia ser decorrente de alguma rocha fraturada sujeita à erosão ou a alguma junta aberta entre rochas.

A análise de relatórios CEMIG permitiu verificar que, em boa parte das seções da barragem, houve construção de tapete drenante na base da barragem, a jusante do núcleo. O dimensionamento de filtros de acordo com os critérios de Terzaghi assegura a graduação do

material para que o filtro seja suficientemente aberto para permitir a percolação de água, mas suficientemente fechado para não permitir carreamento de material granular do maciço pelos espaços vazios do filtro. Entretanto, mesmo assim, na elaboração da Árvore de Eventos, o fato de haver carreamento de material granular e eventual colmatção de filtros foi considerado um evento aleatório, possível de ocorrer.

Outro fator considerado na elaboração da Árvore de Eventos foi o sistemático monitoramento de dados da instrumentação das barragens de terra, que controla as condições de descarga de água percolada desses filtros nas canaletas de drenagem. Não foram observadas condições preocupantes nesses anos de operação, apenas obras de reparo e melhorias para separar a descarga de filtros da água escoada pelo talude da barragem.

Apesar das boas condições descritas, outro evento aleatório levado em consideração foi o aumento do gradiente hidráulico e incapacidade de descarga dos sistemas internos de drenagem, que levariam à tensão efetiva nula e ao início de erosão regressiva.

O estudo identificou que, na região do random, a jusante da barragem esquerda, houve formação de surgências que estavam relacionadas ao período de maior intensidade de precipitação, não se observando suas ocorrências no período de estação seca, conforme relatado no item 5.4.8. Esse fato foi considerado como possível falha nos sistemas de ligação de filtros e dispositivos de saída da água drenada, podendo haver falhas que levassem ao fluxo de água pela fundação à formação de surgências e ao aumento de subpressão a jusante das barragens de terra. Essa situação também influenciou na elaboração da Árvore de Eventos.

O monitoramento realizado pela CEMIG, através do *software* Inspetor, módulo Monitor, permitiu concluir que não houve aumento súbito em vazões de descarga ou aumento súbito de poropressões, identificados nos medidores de vazão e piezômetros instalados na fundação, respectivamente, conforme relatado no item 5.6.6. Na elaboração da Árvore de Eventos considerou-se a possibilidade de falha nessas estruturas e conseqüente aumento de poropressões.

Outro fator considerado na elaboração da Árvore de Eventos foi a possível ocorrência de áreas de drenança abaixo da fundação da barragem, que pudessem direcionar linhas de fluxo de água sem controle na vazão de descarga, conduzindo ela em camadas de material com alta permeabilidade, podendo ocorrer surgências a jusante com aumento de subpressão.

Como a fundação de parte da barragem foi construída sobre solo transportado, na área próxima às margens direita e esquerda, a medida preventiva tomada foi a construção de *cutoff* de grande extensão, para que as linhas de fluxo de água na fundação tivessem um grande caminho a percorrer e com isso houvesse perda de carga hidráulica. Essa solução foi praticada para se evitarem aumento de poropressões e eventual condição favorável à formação de *piping* pela fundação, fato que foi considerado na elaboração da Árvore de Eventos.

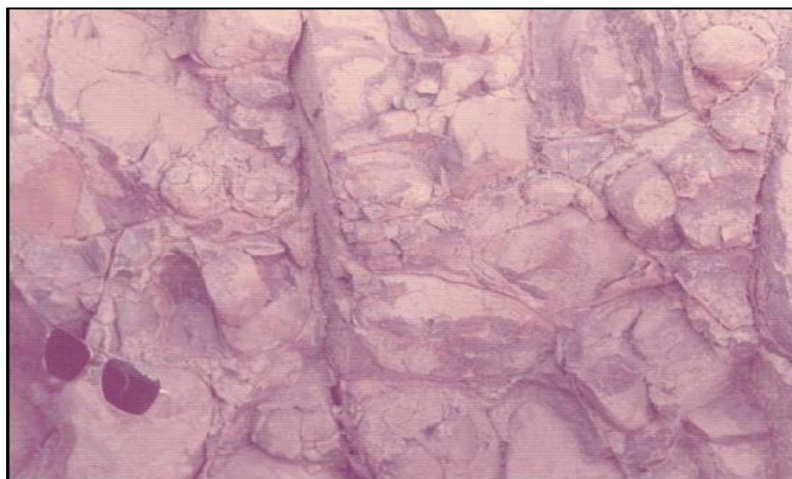
Na elaboração da Árvore de Eventos, procurou-se também considerar a capacidade máxima de vazão dos sistemas de drenagem interna na fundação e as estruturas de ligação desses com o sistema de drenagem externa, numa eventual formação e progresso de *piping*. Colocada essa possibilidade, outro evento relacionado é se essas estruturas suportariam um aumento de fluxo de água sem haver colapso ou deslizamento no talude de jusante, com conseqüente formação de brecha. Na seqüência de eventos considerados, cogitou-se a possibilidade de o *piping* ocorrer e esse se desenvolver e permanecer aberto tempo suficiente para drenar grande volume de água até ocorrer colapso da crista da barragem e total escoamento da água do reservatório.

### **6.3 Possível ocorrência de *piping* do barramento para a fundação**

A análise de desenhos das seções das barragens direita e esquerda e relatório final de projeto, informados por CEMIG (1976), identificaram que as barragens de terra tiveram parte de sua estrutura construída sobre *cutoff* de base larga e grande extensão, para aumentar o caminho da água percolada pela base da barragem, na região próxima às margens, conforme descrito no item 5.6.4.

A área crítica para a fundação seria o antigo leito do rio, mas observou-se que houve adequado tratamento da rocha alterada, conforme descrito no item 5.4.7.

Os estudo dos fatores condicionantes geológico-geotécnicos identificaram que, na área, havia sete derrames e interderrames de espessura aproximada de 200 m, entre as cotas 220,0 e 420,0 m, conforme descrito no item 5.6.3 dessa pesquisa. Além disso, Viotti *et al.* (2006) relatam que, desde o primeiro enchimento, ocorrem surgências a jusante da ombreira esquerda, pois parte da água percolada não é captada pelo sistema de drenagem da barragem. Essas surgências estão relacionadas principalmente às características da rocha de fundação, basalto com intemperismo esferoidal, conforme mostrado na Figura 6.1.



**Figura 6.1** – Fundação em basalto com intemperismo esferoidal (época da construção)  
Fonte: Modificado de VIOTTI, *et al.*, 2006, p. 53.

Na construção do diagrama de influências (FIG. 6.6) e Árvore de Eventos (FIG. 6.7), esses fatos foram considerados, pois pode haver juntas abertas, mesmo após tratamento descrito no item 5.4.7. Outra possível situação é o solo residual de base da fundação da barragem esquerda, próximo à margem, permitir carreamento de material do núcleo junto ao fluxo de água, levando ao início de erosão regressiva.

Outro fator preponderante já descrito foi o dimensionamento e a construção de filtro do tipo tapete drenante, relatado nos itens 5.4.2 e 5.6.2 desta dissertação. As análises de dados de volume de água percolada, evidenciados nos gráficos do item 5.4.8, mostram que os resultados atendem aos parâmetros de controle, permitindo concluir que esses filtros têm funcionado de forma apropriada. Foi considerada a possibilidade de esse sistema não suportar alta descarga a jusante das barragens de terra, vindo a dar condições de formação de *piping*.

Além disso, no diagrama de influências, considerou-se o potencial de erosão do material do núcleo, em possível falha na área de transição entre núcleo e fundação. Essa falha poderia ocorrer caso os materiais de transição não fossem graduados o suficiente, permitindo ocorrer carreamento de material do núcleo por juntas abertas na rocha ou mesmo nos espaços vazios do solo, que formam a base das barragens próxima às margens.

Nas situações de possível ocorrência de *piping* pelo barramento e do barramento para a fundação, foi levado em consideração o progresso do fenômeno em função de possíveis falhas no *cutoff*, eventual falha no sistema de filtros ou surgimento de trincas na fundação, mesmo após tratamento aplicado na rocha alterada. Como o *cutoff* construído na área de solo residual

é extenso, com longo caminho para o fluxo de água, isso favorece a perda de carga e eventual cicatrização de erosão regressiva que viesse a iniciar.

Outro fator considerado na elaboração do diagrama de influência foi a largura do núcleo. Segundo Fell (2000) núcleos de menor largura tendem a formar entubamento com maior frequência do que núcleos de maior largura.

As Figuras 6.3, 6.5 e 6.7 mostram a configuração do arranjo entre eventos nos ramos das árvores e avaliação das probabilidades de ocorrências de cada evento, conforme Tabela 4.1 de descrição de incertezas, modificada de Vick, 1992 *apud* Foster e Fell, 1999, apresentada no capítulo 4.

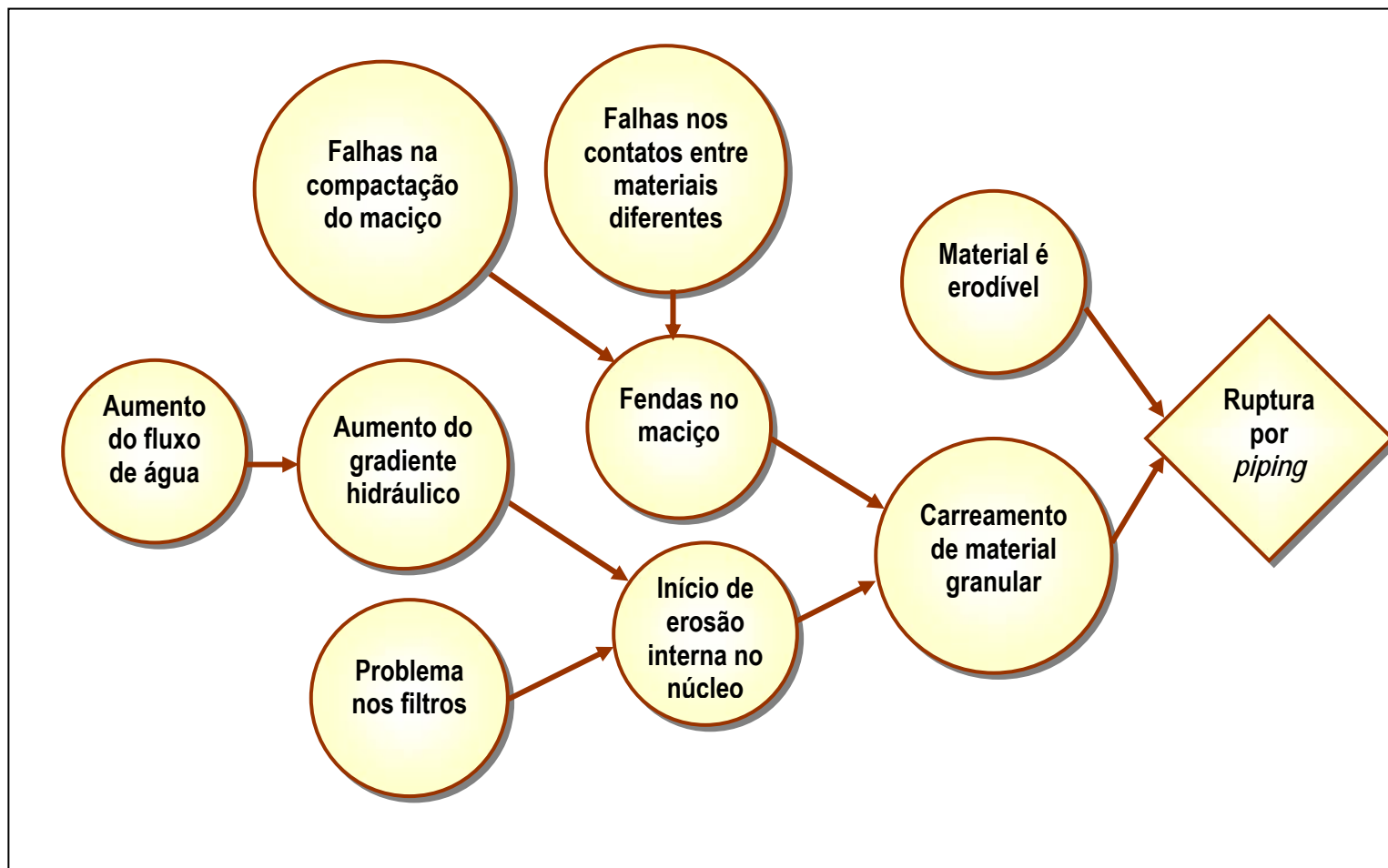
#### **6.4 Cálculo da probabilidade anual de ruptura por piping na barragem da UHE São Simão (CEMIG):**

As probabilidades marginais, estimadas pelas Árvores de Eventos das Figuras 6.3, 6.5 e 6.7, são somadas para determinar a estimativa de probabilidade total de ocorrência de *piping* no sistema de barragens da usina UHE – São Simão, conforme tabela 6.1.

**Tabela 6.1 – Probabilidade anual de ruptura por *piping* nas barragens UHE – São Simão**

<b>Modo de ruptura</b>	<b>Probabilidades estimadas (ETA)</b>
<i>Piping</i> através do barramento	$P_e = 5,3 \times 10^{-5}$
<i>Piping</i> através da fundação	$P_f = 4,7 \times 10^{-5}$
<i>Piping</i> do barramento para a fundação	$P_{ef} = 1,3 \times 10^{-5}$
<b>TOTAL: <math>P_p = P_e + P_f + P_{ef}</math></b>	<b><math>P_p = 1,1 \times 10^{-4}</math></b>

**Análise de dados:** Em comparação com a de análise de estatísticas históricas, usado no método UNSW (University of New South Wales), pode-se observar coerência entre probabilidades totais, na ordem de grandeza de  $10^{-4}$  pelos métodos de performance histórica e Árvore de Eventos.



**Figura 6.2** – Diagrama de influência para ocorrência de *piping* através do barramento nas barragens de terra da UHE – São Simão  
 Fonte: Modificado de HARTFORD e BAECHER, 2004, p. 209.



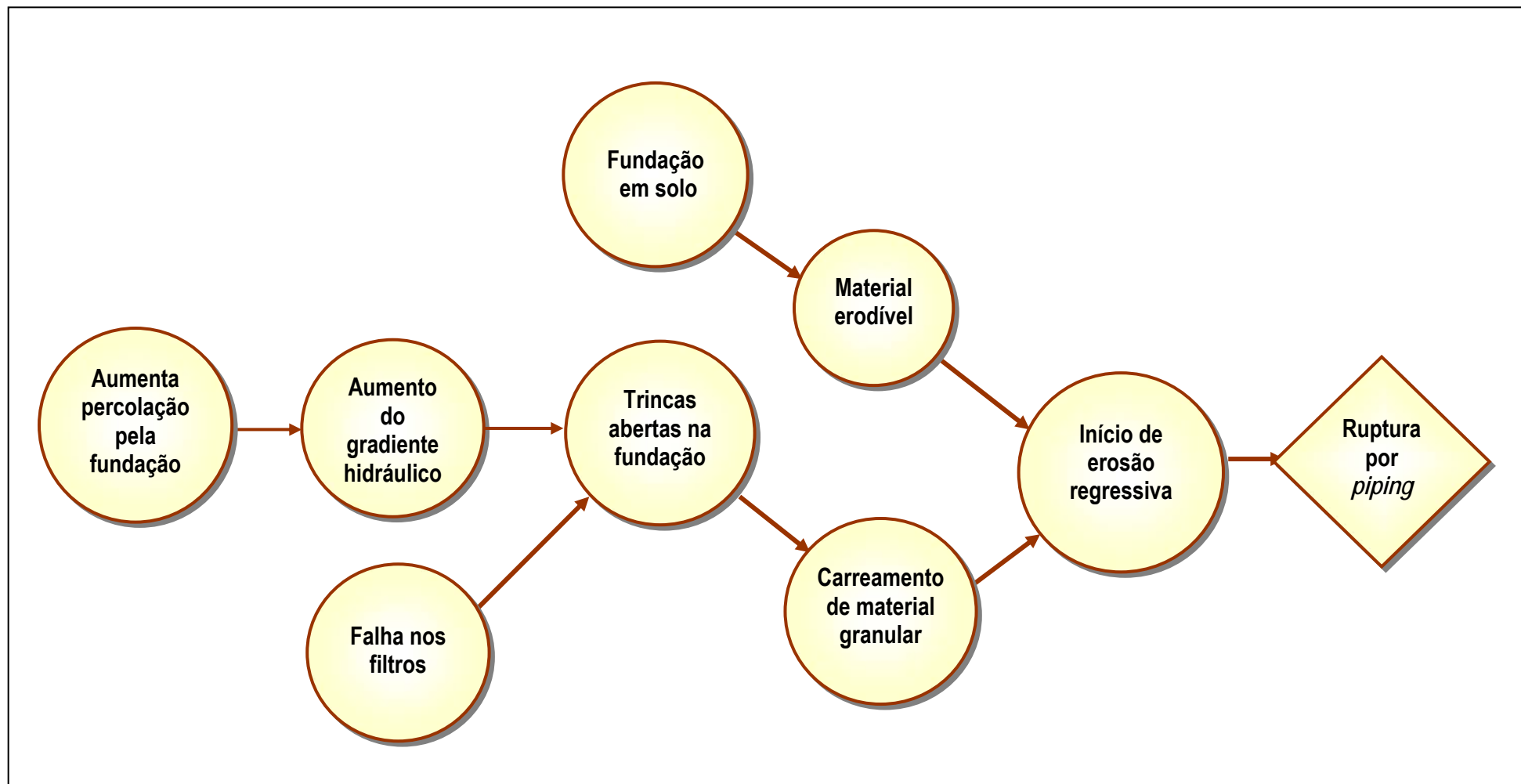


Figura 6.4 – Diagrama de influência para ocorrência de *piping* através da fundação nas barragens de terra da UHE – São Simão





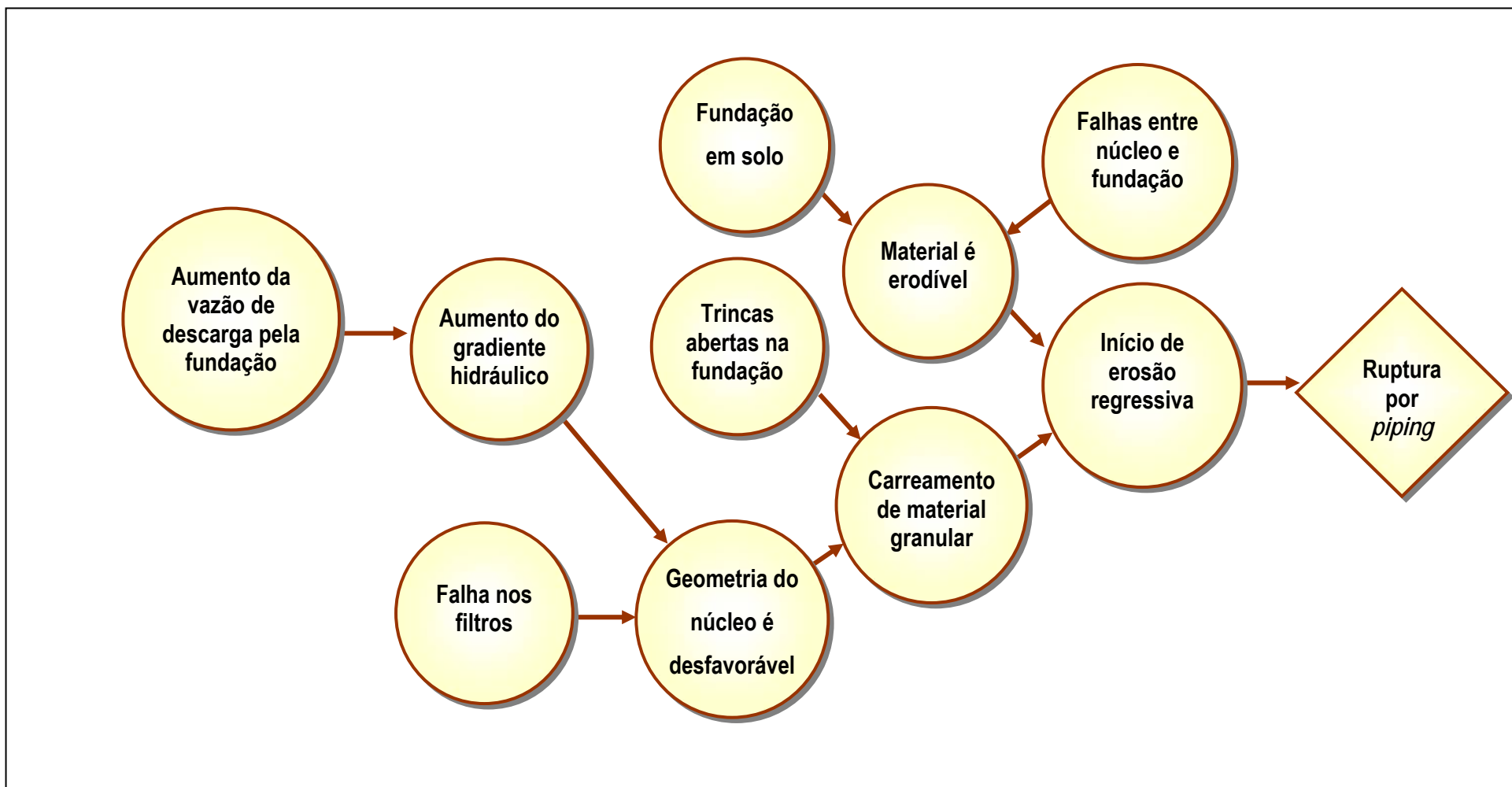


Figura 6.6 – Diagrama de influência para ocorrência de *piping* através do barramento para a fundação nas barragens de terra da UHE São Simão

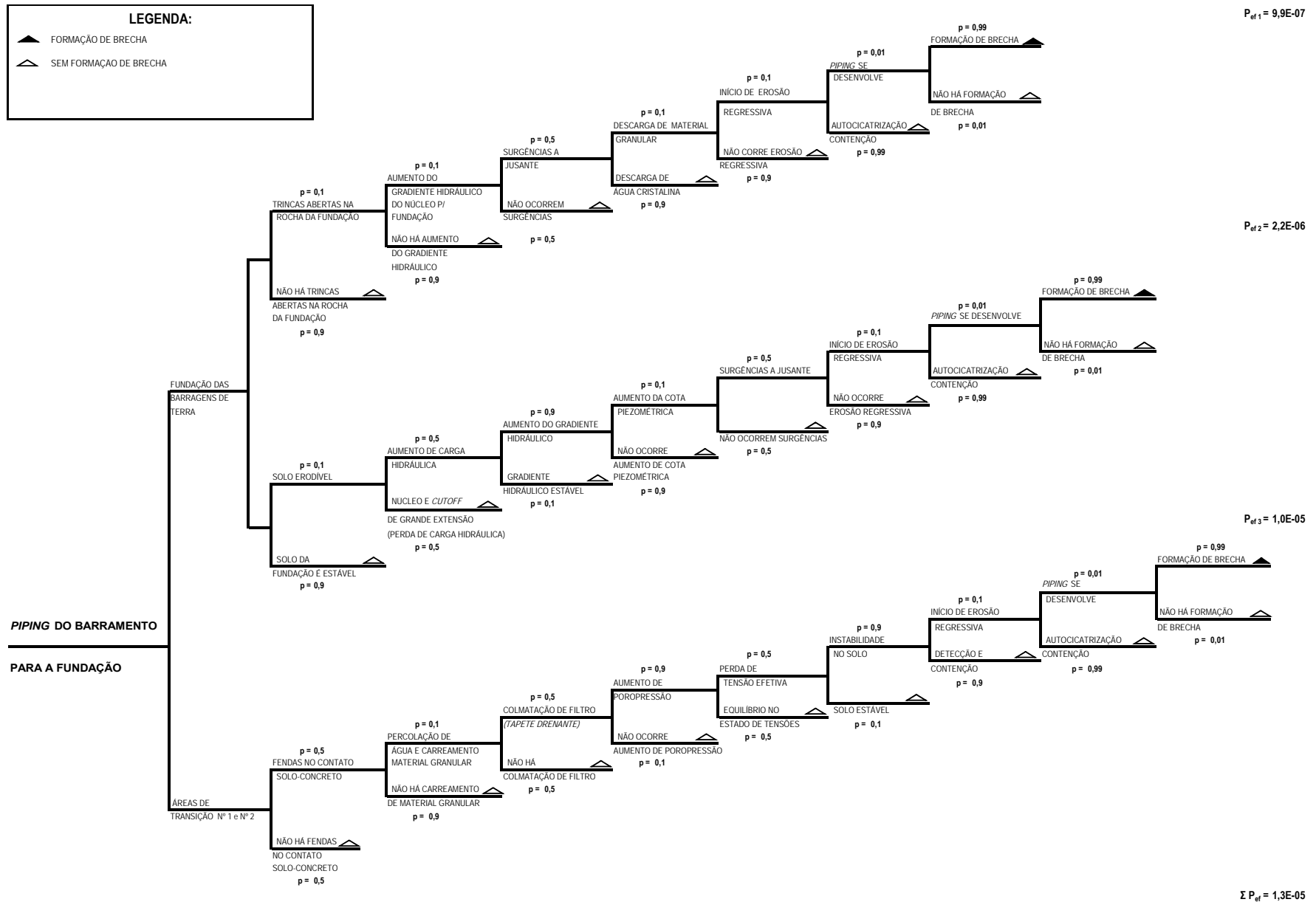
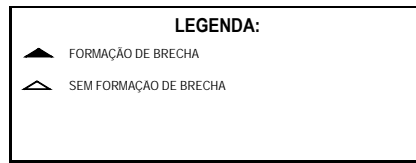


Figura 6.7 – Árvore de Eventos – pipping do barramento para fundação nas barragens de terra da UHE São Simão

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Considerações finais

A pesquisa inicialmente abordou o mecanismo de rupturas em barragens de terra, especificamente o desenvolvimento de erosão interna regressiva no maciço e o processo de desenvolvimento até a ruptura em barragens de terra. Foram identificados aspectos geotécnicos relacionados à vulnerabilidade de obras em relação às características de projeto, fatores condicionantes geológicos da fundação e fatores condicionantes geotécnicos dos materiais usados na construção de barramentos, tipo de seções adotadas, métodos construtivos, dados estatísticos relacionados às rupturas pela ocorrência de erosão regressiva, e dados relacionados ao *piping* por três modos: ocorrência no barramento, na fundação e do barramento para a fundação.

Foram expostos os princípios de avaliação de risco, dos quais a avaliação de vulnerabilidade de um sistema é parte integrante da gestão de risco. Em atendimento a esses princípios, foram expostos argumentos legais e normativos que reforçam a idéia que se desenvolve no país, que é a instituição de uma política nacional de segurança de barragens.

Para facilitar a compreensão do método usado, foram apresentados vários métodos de avaliação de risco, dos quais se escolheu o método de performance histórica comparado ao método de Análise por Árvore de Eventos (ETA - Event Tree Analysis). Essa apresentação foi demonstrada pela fundamentação teórica dos aspectos qualitativo e probabilístico no desenvolvimento das ferramentas de avaliação, inclusive com exemplos de aplicações em outras barragens.

A partir da fundamentação teórica, foi feita a avaliação de vulnerabilidade das barragens de terra da Usina Hidrelétrica São Simão (UHE – São Simão), em consonância com a metodologia desenvolvida por Foster *et al.* (1998) e Aamdal (1998). Essa avaliação foi realizada graças ao apoio da Gerência de Segurança de Barragens e Manutenção Civil da CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais (GA/SM). A avaliação compreendeu a pesquisa de informações documentadas desde o período de projeto, obra, dados de monitoramento e supervisão durante 29 anos de operação.

Ressalta-se que a avaliação da segurança das barragens de terra foi feita no principal empreendimento do sistema energético da CEMIG, que conta com adequados registros de

projeto e execução da obra, além de sistemático monitoramento de dados de auscultação. Isso permitiu aplicar a metodologia de avaliação pela performance histórica em sua plenitude e compará-la aos resultados obtidos pelo método de Árvore de Eventos. A usina UHE – São Simão é um sistema de barragens composto por duas barragens de terra, à esquerda e à direita, duas transições de terra que abraçam as estruturas de concreto, além de uma barragem de terra e enrocamento.

## **7.2 Ações para se evitar formação de piping**

A geometria da barragem deve ser projetada de acordo com o material disponível na fundação. Sempre que possível, faz-se uma cortina impermeável de calda de cimento que liga a rocha sã até o núcleo impermeável, podendo ser uma trincheira de vedação. Isso é feito para impedir a percolação de água no contato entre materiais de diferentes características de permeabilidade.

Nos casos em que a rocha sã está em grandes profundidades, há necessidade de projetar a barragem com um núcleo impermeável mais robusto, com materiais apropriados na transição entre este e a fundação, provida de filtro, para se evitar a elevação da superfície freática e conseqüente aumento de poropressões que venha a desequilibrar o par tensão *versus* resistência no estado de tensões da matriz do solo.

Outra área de contato de materiais diferentes que deve ser protegida contra o fenômeno de *piping* é o contato entre as paredes rochosas do vale e a barragem. Essas superfícies devem ser providas de cortinas de vedação construídas, a partir de trincheiras escavadas no talude rochoso do vale. Para se evitar o aumento das poropressões no interior do núcleo da barragem, deve-se colocar material mais permeável na face jusante da barragem. Taludes mais suaves devem ser empregados a montante, com emprego de material impermeável, para evitar a percolação de água e eventuais deslizamentos em momentos de rebaixamento do nível d'água do reservatório.

Como o maciço de terra é um meio heterogêneo, devem-se atenuar as diferenças de comportamento físico na massa em diversos pontos pelo controle da densidade, teor de umidade e conseqüente grau de compactação durante a construção, de modo a assegurar baixa condutividade hidráulica nas superfícies de contato entre materiais de características e parâmetros geotécnicos diferentes.

### 7.3 Conclusões

Os resultados obtidos para a probabilidade anual de ruptura devem ser entendidos não como a possibilidade de rompimento do barramento, pois não foi usado um modelo estocástico na determinação de probabilidade absoluta. O método usado foi de determinação qualitativa, subjetivo nas determinações de valores de probabilidades, mas que serve para comparar dados do mesmo sistema.

De acordo com esse entendimento as probabilidades totais obtidas por ambos os métodos foram de mesma ordem de grandeza, igual a  $10^{-4}$ , conforme mostra a Tabela 7.1. Entretanto, observa-se que, pelo método de performance histórica (UNSW – University of New South Wales), o modo de ruptura dominante no valor da probabilidade total foi a possível ocorrência de *piping* pela fundação ( $2,2 \times 10^{-4}$ ). No item 5.7 são apresentados os dados resumidos, possibilitando identificar que os fatores de pesos que mais contribuíram no ajuste da probabilidade média histórica foram o tipo de fundação próximo às ombreiras e a geologia da rocha da fundação.

As Árvores de Eventos tiveram probabilidades marginais de mesma ordem de grandeza  $10^{-5}$ , para os três modos de *piping*, enquanto o método de performance histórica (UNSW) identificou a probabilidade de *piping* pela fundação na ordem de grandeza igual a  $10^{-4}$ , e  $10^{-6}$  pela ocorrência de *piping* do barramento para a fundação. Isso demonstrou que o método UNSW foi mais sensível, pois é baseado em dados históricos de desempenho da obra.

A observação de cada uma das Árvores de Eventos, Figuras 6.3, 6.5 e 6.7, permite concluir que a estrutura da barragem mais vulnerável é o barramento, com valor de probabilidade de  $5,3 \times 10^{-5}$ . Na Árvore de Eventos da Figura 6.3, são as áreas das ombreiras e as áreas de contato solo-concreto, nas barragens de transição, que são os pontos mais vulneráveis, pois foram os ramos de probabilidades que mais contribuíram para a probabilidade marginal desse modo de ruptura. A Árvore de Eventos, construída para a eventual ocorrência de *piping* pela fundação, na Figura 6.5 tem como probabilidade o valor de  $4,7 \times 10^{-5}$ , mostrando que os ramos que mais contribuíram para a probabilidade marginal são aqueles relacionados à fundação das barragens de terra, pois estão apoiadas em rocha fraturada, solo residual e solo transportado. Outro fato interessante identificado pela Árvore de Eventos, e coerente com o método UNSW, foi a identificação de probabilidade dominante para a probabilidade marginal, pelo modo de ruptura do barramento para a fundação, na Figura 6.7 com valor de  $1,3 \times 10^{-5}$ . Ou seja, esse valor tem como origem o ramo de eventual início de *piping* as áreas de contato

solo-concreto das barragens de transição, que é o mesmo ponto vulnerável identificado pelo método UNSW.

**Tabela 7.1 – Resultado de avaliação de segurança das barragens de terra – São Simão**

<b>Modo de ruptura</b>	<b>Método UNSW</b>	<b>Método ETA</b>
<i>Piping</i> através do barramento	$P_e = 6,2 \times 10^{-8}$	$P_e = 5,3 \times 10^{-5}$
<i>Piping</i> através da fundação	$P_f = 2,2 \times 10^{-4}$	$P_f = 4,7 \times 10^{-5}$
<i>Piping</i> do barramento para a fundação	$P_{ef} = 1,9 \times 10^{-6}$	$P_{ef} = 1,3 \times 10^{-5}$
<b><math>P_P = P_e + P_f + P_{ef}</math></b>	<b><math>P_P = 2,2 \times 10^{-4}</math></b>	<b><math>P_P = 1,1 \times 10^{-4}</math></b>

Os resultados de probabilidades obtidos em pesquisas anteriores ao longo do tempo mostram que os resultados obtidos pelo método UNSW – University of New South Wales e ETA – Event Tree Analysis foram coerentes com o histórico demonstrado nas Tabelas 7.2 e 7.3.

**Tabela 7.2 – Probabilidade de ruptura anual para barragens, baseada em registros históricos**

<b>País</b>	<b>Autor</b>	<b>Rupturas</b>	<b>Nº de Barragens (total)</b>	<b>Período (anos)</b>	<b>Probabilidade anual</b>
EUA	Gruner (1963, 1967)	33	1764	40	$5 \times 10^{-4}$
EUA	Babb e Mermel (1968)	12	3100	14	$3 \times 10^{-4}$
EUA	USCOLD (1975)	74	4914	23	$7 \times 10^{-4}$
Mundo	Middlebrooks (1953)	125	7500	40	$4 \times 10^{-4}$
Mundo	Mark <i>et al.</i> (1977)	9	7833	6	$2 \times 10^{-4}$
Espanha	Gruner (1967)	150	1620	145	$6 \times 10^{-4}$

Fonte: Modificado de BAECHER *et al.*, 1980 *apud* Collischonn, 1997, p. 36.

Collischonn (1997) afirma que os valores de probabilidades de rupturas apresentados na Tabela 7.2 são baseados em registros históricos e têm como hipótese a estacionariedade dos registros, isto é, a frequência de rupturas não se altera com o passar do tempo. A Tabela 7.3 mostra que essa não é a realidade, pois, com o passar dos anos, melhoram-se as técnicas de projeto, construção e monitoramento. Esse autor cita Marengo (1996) sobre a probabilidade de ruptura para barragens em valor aceitável na ordem de  $1 \times 10^{-5}$ , inferior ao valor sugerido por Baecher *et al.* (1980), conforme relata Collischonn (1997).

**Tabela 7.3** – Freqüência de rupturas por período de construção

Idade em anos	Anterior a 1900	1940 - 1950	1970 - 1980
Construção	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
0 - 5	$2 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$
5 - 10	$1,3 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-5}$
10 - 20	$1 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	
20 - 30	$6 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	
30- 40	$2 \times 10^{-5}$		
40- 50	$2 \times 10^{-5}$		
50 - 60	$1,5 \times 10^{-5}$		
60-70	$1,5 \times 10^{-5}$		

Fonte: Modificado de MARENGO, 1996 *apud* Collischonn, 1997, p. 39.

A Tabela 7.4 mostra que o valor de probabilidade estimado pelos dois métodos, performance histórica (UNSW) e análise por Árvore de Eventos (ETA), na ordem de  $10^{-4}$  barragem/ano está coerente com os valores históricos informados por Foster *et al.* (2000b).

Conclui-se que, para essa ordem de grandeza de probabilidade, não há cenário plausível para eventual ocorrência de *piping*, conforme informações da Tabela 3.21, a qual já foi validada e reconhecida por diversas fontes.

**Tabela 7.4** – Freqüência média de rupturas em grandes barragens

	Barragens construídas antes de 1950	Barragens construídas depois de 1950	Todas barragens
Nº de grandes barragens construídas	2.356	8.836	11.192
Nº de rupturas em grandes barragens por todos os modos	88	48	136
Nº de barragens que romperam por problemas estruturais	41	25	66
Média de freqüência de ruptura sobre a vida de barragens	$3,8 \times 10^{-2}$	$0,5 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$
Média de freqüência de ruptura sobre a vida de barragens por problemas estruturais	$1,7 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,6 \times 10^{-2}$
Freqüência média anual de rupturas por todos os modos	$8,6 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-4}$
Freqüência média anual de rupturas por problemas estruturais	$3,6 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$

Fonte: FOSTER *et al.*, 2000b, p. 1007.

## 7.4 Recomendações

A pesquisa foi fundamentada em avaliação qualitativa, pois a avaliação determinística para o fenômeno em avaliação, *piping*, é baseada no mecanismo de falha de cada um dos princípios físicos envolvidos, como pode ser observado na Figura 7.1. Essa é a grande dificuldade, pois



no cenário de rupturas interagem inúmeras causas, as quais, caso sejam analisadas isoladamente podem apresentar-se mais complexas do que a análise de todo o sistema. Entretanto, durante o desenvolvimento desta dissertação foi identificado que existem pesquisas em desenvolvimento nesse sentido, na University of Vermont, Burlington, EUA, por Nathan Shaffer e professor Mandar Dewoolkar. Essa pesquisa trata de estudo experimental para classificar os solos quanto à suscetibilidade a erosão interna, associando os resultados ao risco para a barragem (SHAFFER e DEWOOLKAR, 2006). Esse estudo envolve ensaios em um aparato de laboratório, procurando contornar as dificuldades citadas no capítulo 3 e demonstradas na Figura 7.2.

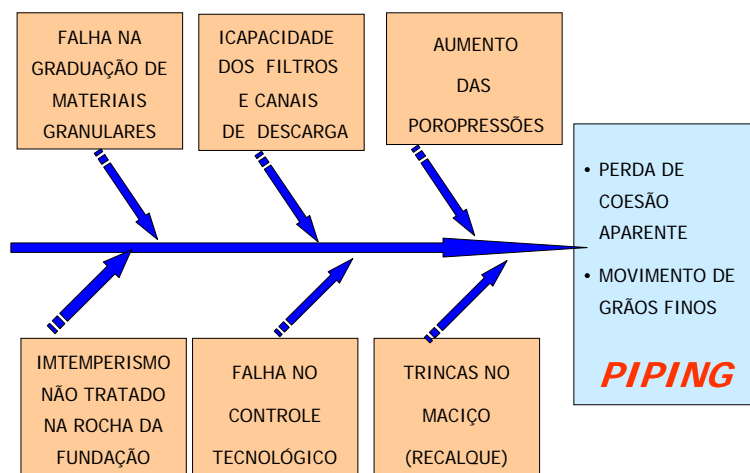


Figura 7.1 – Representação de causas no processo de *piping*

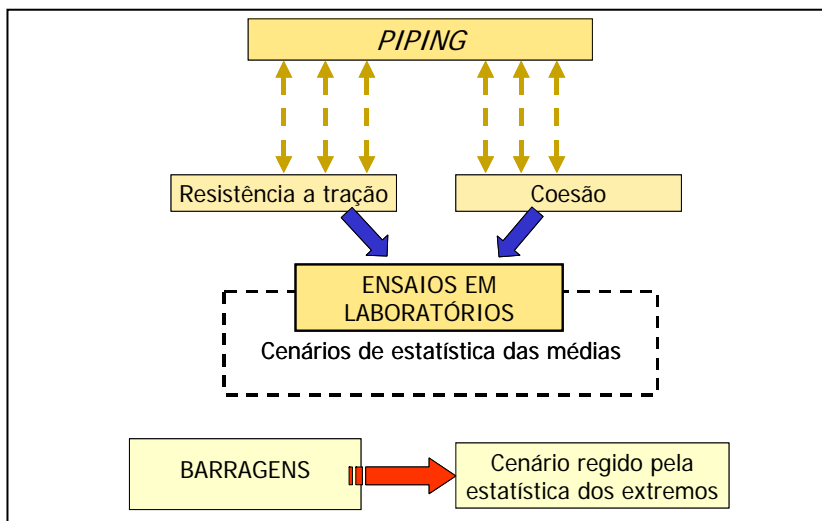


Figura 7.2 – Representação do cenário de avaliação de *piping* em laboratório e em campo

Outra pesquisa em andamento é sobre modelagem numérica bifásica na interface sólida/fluida sujeita à erosão interna, na Université du Sud, Toulon – França, por Stéphane Bonelli (CR, Cemagref), Frédéric Golay (MDC, Univ. Toulon) e Philippe Helluy (Mdc HDR, Univ.

Toulon). O objetivo dessa pesquisa é quantificar o limiar e a cinética de erosão para determinadas condições hidráulicas em um solo. Para alcançar esse objetivo, estão em desenvolvimento modelos numéricos 2D/3D, estacionários, por volumes finitos e/ou elementos finitos, para descrever o escoamento turbulento bifásico que faz a erosão em meios porosos, como o solo sujeito a escoamento, conforme lei de Darcy. A pesquisa citada procura responder às questões: Qual é a lei da erosão? Quais são as variáveis mecânicas associadas ao desenvolvimento da erosão? Qual é a forma da lei no limiar da ruptura? (BONELLI *et al.*, 2006).

Outro fato relevante identificado foi a criação de um grupo de trabalho, em 1993, na Europa, para examinar o risco em barragens atribuído à erosão interna. O coordenador desse grupo é Jean-Jacques Fry. Esse grupo em seu relatório de progresso relata as pesquisas referentes a 47 casos históricos de rupturas por *piping* em barragens da Europa. Nesse relatório, as barragens são classificadas segundo quatro critérios: severidade e causa do incidente, indicadores de ocorrência do incidente e trabalhos de remediação executados.

Uma das recomendações do grupo de trabalho é a avaliação da efetividade de técnicas usadas para identificação e investigação de erosão interna, como resistividade elétrica, sondagem por radar e medidas de temperatura do maciço. Portanto, são fundamentais o desenvolvimento e o entendimento de mecanismos da erosão interna, em especial a resistência à erosão pelas argilas (FRY, 2004).

O desenvolvimento desta dissertação permitiu conhecer alguns aspectos relacionados à avaliação de risco em desenvolvimento e outros que necessitariam ser pesquisados.

Um dos aspectos por meio do qual essa pesquisa pode ser conduzida em trabalhos futuros é a consideração das conseqüências além da vulnerabilidade, pois a avaliação de susceptibilidade é apenas um dos passos para avaliação do risco. Sua avaliação deve ser associada à avaliação de conseqüências, as quais são de difícil determinação. Para avaliar essas conseqüências, é necessário estimar para cada seção no trecho jusante do rio a possível cota atingida pela água, a velocidade associada a essa cota e o tempo de chegada da onda de cheia em cada seção. Os aproveitamentos hídricos a jusante devem ser avaliados em relação à onda de cheia e se há outra barragem a jusante, deve-se avaliar o efeito em cascata de possível amortecimento no reservatório ou eventual galgamento, de acordo com a onda de cheia, ou seja, é necessário conhecer o hidrograma para as barragens a jusante.

Além de gerenciar o risco, é necessário controlar as eventuais consequências, por isso o desenvolvimento de planos de ações de emergências é fundamental para atenuar os danos ambientais como alterações no hábitat de populações de animais, destruição da flora e fauna, modificações morfológicas de cursos d'água, além de prejuízos econômicos e perdas de vidas.

Outro assunto que pode ser pesquisado futuramente é levantar dados nacionais, completos, sobre barragens que se romperam e definir fatores que ajustem a probabilidade média de ruptura baseada em estatística nacional em apoio às estatísticas do banco de dados ERDATA1 (UNSW) e, ainda, obter dados mais recentes desse banco de dados.

## REFERÊNCIAS

- AAMDAL, T. Risk analysis for a slab buttress dam in Norway. In: 66<sup>th</sup> ICOLD ANNUAL MEETING, New Delhi, India, p. 314-323, 1998.
- ALVES, A. M. L.; MARIA, P. L. S. Análise probabilística de problemas geotécnicos: Aplicação à argila do Rio Sarapuí. *Solos e Rochas*, São Paulo, v. 24, p. 83-93, 2001.
- ANDERSON, L. R. Workshop on Risk Assessment for Seepage and Piping in Dams and Foundations. CENTER FOR GEOTECHNICAL PRACTICE AND RESEARCH - VIRGINIA TECH - U. S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., EUA, p.66-88, 2000.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15&idPerfil=2>>. Acesso em 01 de maio de 2007
- ANG, A. H-S.; TANG, W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Decision, risk, and reliability*, v. II, New York: *Copyright* dos autores, 1990. 562 p.
- BONELLI, S.; GOLAY, F.; HELLUY, P. Modélisation numérique diphasique d'une interface solide/fluide avec érosion, application à l'érosion interne. Projet de thèse, 2006. Disponível em:<[HTTP://www.cemagref.fr/informations/Actualites/theses/2006/these2006/these2006OIA\\_X.pdf](HTTP://www.cemagref.fr/informations/Actualites/theses/2006/these2006/these2006OIA_X.pdf)>. Acesso em 02 de maio de 2007.
- CEMIG – Relatório Final do projeto São Simão SS-RC-97 – Estruturas de terra e enrocamento, v. I, Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. DOC N°. 05D010364 (Div. Geotécnica), 1976.
- CEMIG – Controle de qualidade de obras de terra e enrocamento e injeção de cimento – Dossier Técnico Final, v. I, Geotécnica S.A Engenheiros Consultores – PV – 15/73, 1978.
- CEMIG – Instrumentação de Solos – Relatório Final – Estruturas de Terra e Enrocamento. Usina Hidrelétrica de São Simão. v. I, Divisão de Controle de Estruturas Civas 11.128-PG/EC4-001 CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, 1982.
- CEMIG – Relatório de inspeção da barragem de terra e enrocamento de São Simão 11.128-PG/EE-121, Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. DOC N° 728-01-P1-E – Div. Geotécnica, 1986.
- CEMIG – Relatório Final da Drenagem das Áreas a jusante da Margem Esquerda e Projeto Como Construído - Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, Rel. 11.128-140103, GA/SM – Gerência de Segurança de Barragens e Manutenção Civil, 2003.
- CICCO, de F. *Gestão de riscos: Diretrizes para a implementação da AS/NZS 4360:2004*. São Paulo: Risk Tecnologia Editora, 2005. 91 p.
- COLLISCHONN, W. *Análise do rompimento da barragem Ernestina*. 1997. 213 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- COMISSÃO DE MINAS E ENERGIA: Substitutivo ao Projeto de Lei nº 1.181, de 2003
- CRUZ, P. T. *100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.
- CUMMINS, P.; *Guidelines on risk assessment*. ISBN: 0 731 027 620, Sydney, Austrália: Ed. Australian National Committee on Large Dams Inc. ANCOLD, 2003. 156 p.

DAM PROJETOS DE ENGENHARIA – Projeto do sistema de drenagem da área a jusante da Barragem da Margem Esquerda e Avaliação da Margem Direita – Relatório Final AZT-E-RE-001-2, 2001.

FELL, R.; BOWLES, D. S.; ANDERSON, L. R.; BELL, G. The status of methods for estimation of the probability of failure of dams for use in quantitative risk assessment. International Commission on Large Dams. In: Q76-R, 20<sup>th</sup> CONGRESS AND LARGE DAMS, Beijing, China, p.1-20, 2000.

FELL, R. Workshop on risk assessment for seepage and piping in dams and foundations. CENTER FOR GEOTECHNICAL PRACTICE AND RESEARCH - VIRGINIA TECH - U. S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., EUA, p.113-143, 2000.

FELL, R.; WAN, C. F.; FOSTER, M. Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping – piping through the embankment. UNICIV Report No R-428, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales. ISBN 85841 395 7, Sydney, Austrália, 2004.

FONSECA, A. R. *Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – Estudo de caso das barragens da UHE São Simão*. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. Analysis of embankment dam incidents. UNICIV Report N° R-374 - UNSW, Sydney, Austrália, 1998.

FOSTER, M.; FELL, R. A framework for estimating the probability of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods. UNICIV Report No R-377, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales. ISBN 85841 344 2, Sydney, Austrália, 1999.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. Canadá: Can. Geotech. J. 37, p.1025–1061, 2000 (a).

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. Canadá: Can. Geotech. J. 37, p.1000–1024, 2000 (b).

FRANÇA, J. L.; VASCONCELLOS, A. C. *Manual para normalização de publicações técnico-científicas*. 7. ed. Belo Horizonte: Ed.UFMG, 2004. 242 p.

FRY, J-J. Progress Report – Working Group in Internal Erosion in Embankment Dams – ICOLD European Club, França, 2004.

FUSARO, T. C. Metodologia de classificação de barragens baseada no risco. In: XXV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, Salvador-Brasil, 2003.

GOMES, A. S.; ALMEIDA, A. B.; CASTREO, A. T.; PAIXÃO, J.; CALDEIRA, L.; PIMENTA, L.; VISEU, T. 1º Relatório de Progresso – Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens. Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens – CNPGB, Lisboa, Portugal, 2005.

HARTFORD, D. N. D.; BAECHER G. B. *Risk and uncertainty in dam safety* – CEA Technologies Dam Safety Interest Group. ISBN 0 7277 3270 6, Londres, Inglaterra: Thomas Telford Publishing, 2004. 391 p.

HILL, P.; BOWLES, D.; JORDAN, P.; NATHAN. Risk Workshop. Estimating overall risk of dam failure: practical considerations in combining failure probabilities. ANCOLD, Sydney, Austrália, p.1-10, 2003.

JANSEN, R.B.; ALDRICH, H. P.; DAVID, S. D. *Safety of existing dams – Evaluation and Improvement*. 3 ed. Washington DC: Ed. National Academy of Sciences, 1986. 354 p.

MENESCAL, R. A. (Org.). *A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil*. Brasília: Proágua, 2004. 314p.

RAMOS, F. D. Risk analysis applied to dam safety – Internal erosion risk analysis in embankment dams with granular filters. In: SEMANA INTERNACIONAL SOBRE LA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGOS A LA SEGURIDAD DE PRESAS, Universidad de Granada, Espanha. p. 1-91, 2005.

ROGERS, J.D.; HASSELMANN, K.F. Retrospective on the failure of Teton dam. Disponível em: <<http://campus.umn.edu/geotech/>>. Acesso em: 24 de abril de 2007.

ROSS, S.; *A first course in probability*. ISBN: 0 02 946600 8. 3 ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1988, 565 p.

SEDDON, M.B. *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. Dams, Water and Energy – A Statistical Profile. Report of the World Commission on Dams. Anexo V, Espanha, p.368-382, 2000.

SILVEIRA, J. A. ; MACHADO, J. A. Construção das árvores de eventos e análise de risco da barragem João Leite da SANEAGO. In: XXVI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS – T95 A02, Goiânia, Brasil, p. 1-16, 2005.

SHAFFER, N.; DEWOOLKAR, M. An experimental study to classify erodibility of soils and evaluate associated risks for dams, embankments and levees. University of Vermont, Burlington, EUA, 2006.

SYLVESTER, A.G. Página web compilada. Disponível em: <<http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/teton%20dam-pages/Image0.html>> Acesso em: 24 de abril de 2007.

TSCHEBOTARIOFF, G. P. *Fundações, estruturas de arrimo e obras de terra*. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 513 p.

VIOTTI, C.B. Instrumentação das fundações em São Simão. In: X SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Tema 3. Curitiba - PR, 1975.

VIOTTI, C.B.; CARVALHO, E.; BRITO, S. N. A. Relatório da Inspeção Formal - Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais - GA/SM – Gerência de Segurança de Barragens e Manutenção Civil, 2006.

# **APÊNDICE A**

## **Lista de verificação de dados para avaliação de segurança em barragem**

# LEVANTAMENTO DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA

## 1. CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM

- Altura
- Extensão do barramento
- Volume de água represado
- Localização

## 2. ITENS PARA ENTRADA NAS TABELAS DE FATORES DE PESOS

### *2.2 Piping através do barramento*

#### **2.2.1 Tipo de seção**

#### **2.2.2 Nível do reservatório em períodos do ano (variação)**

#### **2.2.3 Tipo de filtro presente no maciço**

- Método de construção do filtro
- Curva granulométrica dos materiais usados no filtro

#### **2.2.4 Origem geológica dos materiais usados no núcleo**

#### **2.2.5 Tipo de material/solo usado no núcleo (classificação)**

#### **2.2.6 Curvas granulométricas dos materiais/solo usados no núcleo**

#### **2.2.7 Processo de construção do maciço**

#### **2.2.8 Controle tecnológico durante a construção**

#### **2.2.9 Existência de tubulações/conduitos de passagem através do barramento**

- Projeto de construção
- Estado de conservação atual

#### **2.2.10 Tratamento aplicado na fundação**

#### **2.2.11 Observações de vazões de percolação (aspecto da água)**

- Primeiro enchimento
- Primeiros 5 anos
- Após 5 anos de operação

#### **2.2.12 Medidas de poropressões ao longo do tempo**

- Primeiro enchimento
- Primeiros 5 anos
- Após 5 anos de operação

#### **2.2.13 Frequência de monitoramento e supervisão**



## **2.3 Piping através da fundação**

### **2.3.1 Tipo de seção**

### **2.3.2 Filtros aplicados na fundação**

- Método de construção do filtro
- Curva granulométrica

### **2.3.4 Tipo de fundação (abaixo do *cutoff*), condições da rocha ou solo (estado de intemperismo)**

### **2.3.5 Tipo de *cutoff* no solo da fundação**

- Profundidade (penetrante ou parcialmente penetrante)

### **2.3.6 Tipo de *cutoff* na rocha da fundação**

- Profundidade de penetração (penetrante ou parcialmente penetrante)

### **2.3.7 Tipo de geologia da rocha da fundação**

### **2.3.8 Observações de vazões de percolação pela fundação (aspecto da água)**

- Primeiro enchimento
- Primeiros 5 anos
- Após 5 anos de operação

### **2.3.9 Medidas de poropressões ao longo do tempo**

- Primeiro enchimento
- Primeiros 5 anos
- Após 5 anos de operação

### **2.3.10 Frequência de monitoramento e supervisão**

## **2.4 Piping do barramento para fundação**

### **2.4.1 Profundidade do *cutoff* em trincheira (se aplicado)**

### **2.4.2 Tipo de fundação (rocha ou solo)**

### **2.4.3 Medidas de controle da erosão na fundação (se foram aplicadas ao longo do tempo)**

### **2.4.4 Verificar processo de aplicação de *grout* na fundação (se aplicado)**

### **2.4.5 Tipo de geologia do solo da fundação**

### **2.4.6 Tipo de geologia da rocha da fundação**

### **2.4.7 Origem geológica do solo/materiais usados no núcleo**

### **2.4.8 Tipo de solo do núcleo**

- Curvas granulométricas

### **2.4.9 Tratamento aplicado na fundação**

### **2.4.10 Observações de vazões de percolação pela fundação e pelo maciço (aspecto da água)**

- Primeiro enchimento
- Primeiros 5 anos
- Após 5 anos de operação

### **2.4.11 Piezometria ao longo do tempo**

- Primeiro enchimento
- Primeiros 5 anos
- Após 5 anos de operação

### **2.4.12 Frequência de monitoramento e supervisão**

# **ANEXO A**

## **ERDATA1 - Base de dados de rupturas e acidentes**

ERDATA 1 - BASE DE DADOS DE RUPTURAS								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de seção (1)	Altura	Grande Barragem	Ano de construção	Ano do Incidente	Modo de Ruptura
1	Ahraura	Índia	2	26	Sim	1953	1953	<i>Piping</i> através do barramento
2	Apishapa	EUA	2	35	Sim	1920	1923	<i>Piping</i> através do barramento
3	Avalon II	EUA	4	18	Sim	1894	1904	<i>Piping</i> através do barramento
4	Battle River	Canadá	0	14	Sim	1956	1956	<i>Piping</i> através do barramento
5	Bila Desna	Tchecoslo vâquia	0	18	Sim	1915	1916	<i>Piping</i> através do barramento
6	Bilberry	Grã- Bretanha	8	30	Sim	1845	1852	<i>Piping</i> através do barramento
7	Blackbrook I	Grã- Bretanha	8	28	Sim	1797	1799	<i>Piping</i> através do barramento
8	Campbelltown Golf Course	Austrália	1	10	Não	1974	1974	<i>Piping</i> através do barramento
9	Caulk Lake	EUA	0	20	Sim	1950	1973	<i>Piping</i> através do barramento
10	Clandeboye	Grã- Bretanha	8	5	Não	1888	1968	<i>Piping</i> através do barramento
11	Dale Dyke	Grã- Bretanha	8	29	Sim	1864	1864	<i>Piping</i> através do barramento
12	Ema	Brasil	13	18	Sim	1932	1940	<i>Piping</i> através do barramento, deslizamento a jusante
13	Emery	EUA	0	16	Sim	1850	1966	<i>Piping</i> através do barramento
14	Fred Burr	EUA	3	16	Sim	1947	1948	<i>Piping</i> através do barramento
15	Ghattara	Líbia	1	38	Sim	1972	1977	<i>Piping</i> através do barramento
16	Greenlick	EUA	0	19	Sim	1901	1904	<i>Piping</i> através do barramento
17	Hatchtown (B)	EUA	1	19	Sim	1908	1914	<i>Piping</i> através do barramento
18	Hebron (A)	EUA	0	17	Sim	1913	1914	<i>Piping</i> através do barramento
19	Hinds Lake	Canadá	13	12	Sim	1980	1982	<i>Piping</i> através do barramento
20	Horse Creek (Colorado)	EUA	6	17	Sim	1912	1914	<i>Piping</i> através do barramento, <i>Piping</i> através da fundação
21	Ibra	Alemanha	6	10	Não		1977	<i>Piping</i> através do barramento
22	Kaihua	Finlândia	0		Não		1959	<i>Piping</i> através do barramento
23	Kantalai	Sri Lanka	0	27	Sim	612	1986	<i>Piping</i> através do barramento
24	Kedar Nala	Índia	2	20	Sim	1964	1964	<i>Piping</i> através do barramento

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE RUPTURAS								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de seção (1)	Altura	Grande Barragem	Ano de construção	Ano do Incidente	Modo de Ruptura
25	Kelly Barnes	EUA	12	6	Não	1899	1977	<i>Piping</i> através do barramento, deslizamento a jusante
26	La Escondida	México	0	13	Sim	1970	1972	<i>Piping</i> através do barramento
27	Lake Cawndilla Outlet Regulator Embankment	Austrália	0	12	Sim	1961	1962	<i>Piping</i> através do barramento
28	Lake Francis (A)	EUA	0	15	Sim	1899	1899	<i>Piping</i> através do barramento
29	Lawn Lake	EUA	2	8	Não	1903	1982	<i>Piping</i> através do barramento
30	Leeuw Gamka	África do Sul	13	15	Sim	1920	1928	<i>Piping</i> através do barramento
31	Little Deer Creek	EUA	2	26	Sim	1962	1963	<i>Piping</i> através do barramento
32	Lyman (A)	EUA	8	20	Sim	1913	1915	<i>Piping</i> através do barramento
33	Mafeteng	Lesoto	1	23	Sim	1988	1988	<i>Piping</i> através do barramento
34	Mena	Chile	13	17	Sim	1885	1888	<i>Piping</i> através do barramento
35	Mill Creek (California)	EUA	12	20	Sim	1899	1957	<i>Piping</i> através do barramento
36	Owen	EUA	13	17	Sim	1915	1914	<i>Piping</i> através do barramento
37	Pampulha	Brasil	6	18	Sim	1941	1954	<i>Piping</i> através do barramento
38	Panshet	Índia	3	49	Sim	1961	1961	<i>Piping</i> através do barramento
39	Piketberg	África do Sul	0	12	Não	1986	1986	<i>Piping</i> através do barramento
40	Ramsgate, Natal	África do Sul	0	14	Não	1984	1984	<i>Piping</i> através do barramento
41	Senekal	África do Sul	3	8	Não	1974	1974	<i>Piping</i> através do barramento
42	Sheep Creek	EUA	3	18	Sim	1969	1970	<i>Piping</i> através do barramento
43	Smartt Syndicate	África do Sul	0	28	Sim	1912	1961	<i>Piping</i> através do barramento
44	Stockton Creek	EUA	2	29	Sim	1949	1950	<i>Piping</i> através do barramento
45	Toreson	EUA	13	15	Sim	1898	1953	<i>Piping</i> através do barramento
46	Trial Lake (dike)	EUA	0	5	Não	1925	1986	<i>Piping</i> através do barramento, <i>Piping</i> através da fundação
47	Tupelo Bayou	EUA	0	15	Sim	1973	1973	<i>Piping</i> através do barramento

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE RUPTURAS								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de seção (1)	Altura	Grande Barragem	Ano de construção	Ano do Incidente	Modo de Ruptura
48	Utica	EUA	0	21	Sim	1873	1902	<i>Piping</i> através do barramento, deslizamento a jusante
49	Walter Bouldin	EUA	3	50	Sim	1967	1975	<i>Piping</i> através do barramento
50	Wheatland N°1	EUA	0	13	Não	1893	1969	<i>Piping</i> através do barramento, deslizamento a jusante
51	ZoekNãog	África do Sul	1	40	Sim	1992	1993	<i>Piping</i> através do barramento
52	FP&L Martin Co. Dike	EUA	0	10	Não	1977	1979	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
53	Manivali	Índia	2	18	Sim	1975	1976	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
54	Quail Creek	EUA	3	24	Sim	1984	1988	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
55	Teton	EUA	4	93	Sim	1976	1976	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
56	Alamo Arroyo Site 2	EUA	3	21	Sim	1960	1960	<i>Piping</i> através da fundação
57	Baldwin Hills	EUA	6	71	Sim	1951	1963	<i>Piping</i> através da fundação
58	Black Rock (A)	EUA	11	21	Sim	1907	1909	<i>Piping</i> através da fundação
59	Blyderivier	África do Sul	13	22	Sim	1924	1922	<i>Piping</i> através da fundação
60	Corpus Christi	EUA	0	19	Sim	1930	1930	<i>Piping</i> através da fundação
61	El Salto	Bolívia	13	15	Sim		1976	<i>Piping</i> através da fundação
62	Embalse Aromos	Chile	13	42	Sim	1979	1984	<i>Piping</i> através da fundação
63	Hauser Lake I	EUA	12	21	Sim	1906	1908	<i>Piping</i> através da fundação
64	Jennings Creek Watershed N°16	EUA	2	17	Sim	1960	1964	<i>Piping</i> através da fundação
65	Jennings Creek Watershed N°3	EUA	2	21	Sim	1962	1963	<i>Piping</i> através da fundação
66	Julesberg (B)	EUA	6	18	Sim	1905	1911	<i>Piping</i> através da fundação
67	La Laguna	México	9	17	Sim	1912	1969	<i>Piping</i> através da fundação
68	Lake Toxaway	EUA	9	19	Sim	1902	1916	<i>Piping</i> através da fundação
69	Log Falls	Canadá	12	11	Sim	1921	1923	<i>Piping</i> através da fundação
70	Lower Khajuri	Índia	13	16	Sim	1949	1949	<i>Piping</i> através da fundação

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

**ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE RUPTURAS**

<b>Nº</b>	<b>Nome da Barragem</b>	<b>País</b>	<b>Tipo de seção (1)</b>	<b>Altura</b>	<b>Grande Barragem</b>	<b>Ano de construção</b>	<b>Ano do Incidente</b>	<b>Modo de Ruptura</b>
71	Nanak Sagar	Índia	0	16	Sim	1962	1967	Piping através da fundação
72	Roxboro Municipal Lake	EUA	13	7	Não	1955	1984	Piping através da fundação
73	Ruahihi Canal	Nova Zelândia	2	9	Sim	1981	1981	Piping através da fundação
74	St-Lucien	Argélia	13	27	Sim	1861	1862	Piping através da fundação
75	Frazier	EUA	0	8	Não	1915	1935	deslizamento a jusante
76	Fruitgrowers	EUA	0	11	Não	1898	1937	deslizamento a jusante
77	Gouhou	China	6	71	Sim	1988	1993	deslizamento a jusante
78	Hell Hole	EUA	5	67	Sim	1966	1964	deslizamento a jusante
79	Jackson's Bluff	EUA	0	9	Não	1930	1957	deslizamento a jusante
80	Littlefield	EUA	4	37	Sim	1929	1929	deslizamento a jusante
81	Sinker Creek	EUA	11	21	Sim	1919	1943	deslizamento a jusante
82	Snake Ravine	EUA	11	19	Sim	1898	1898	deslizamento a jusante
83	Kaila	Índia	9	26	Sim	1955	1959	Deslizamento a montante
84	Embalse Lo Ovalle	Chile	13	12	Sim	1932	1985	Abalo Sísmico
85	Lliu-Lliu	Chile	0	20	Sim	1934	1985	Abalo Sísmico
86	Armando de Salles Oliveira	Brasil	1	41	Sim	1958	1977	Galgamento
87	Avalon I	EUA	3	18	Sim	1890	1893	Galgamento
88	Bagaudó	Nigéria	13	20	Sim	1970	1988	Galgamento
89	Banqiao	China	13	24	Sim	1956	1975	Galgamento
90	Belci	Roménia	3	16	Sim	1963	1991	Galgamento
91	Bolan	Paquistão	13	23	Sim	1958	1976	Galgamento
92	Briseis	Austrália	7	24	Sim	1926	1929	Galgamento
93	Castlewood	EUA	13	28	Sim	1890	1933	Galgamento
94	Cazadero	EUA	13	21	Sim	1906	1965	Galgamento
95	Dantiwada	Índia	13	61	Sim	1969	1973	Galgamento
96	Dhanibara	Índia	3	21	Sim	1975	1976	Galgamento
97	Dykstra	EUA	13	15	Sim		1926	Galgamento
98	East Pittsford	EUA	13	12	Não		1947	Galgamento
99	Elandsdrift	África do Sul	13	28	Sim	1975	1974	Galgamento
100	Euclides da Cunha	Brasil	1	63	Sim	1960	1977	Galgamento
101	Goose Creek	EUA	12	20	Sim	1900	1900	Galgamento
102	Gopinathapura (?)	Índia	13	2	Não		1981	Galgamento
103	Hans Strijdom Cofferdam	África do Sul	5	18	Sim	1980	1977	Galgamento
104	Hatfield	EUA	9	10	Não	1909	1911	Galgamento
105	Hebron (B)	EUA	0	17	Sim	1918	1942	Galgamento
106	Heiwaiké	Japão	0	20	Sim	1949	1951	Galgamento
107	Horse Creek (Nebraska)	EUA	0	14	Não		1935	Galgamento
108	Hyogiri	Coréia	13	16	Sim	1940	1961	Galgamento
109	Irukaike (C)	Japão	0	27	Sim	1633	1868	Galgamento

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

**ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE RUPTURAS**

Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de seção (1)	Altura	Grande Barragem	Ano de construção	Ano do Incidente	Modo de Ruptura
110	Kaddam	Índia	13	41	Sim	1957	1958	Galgamento
111	Kharagpur	Índia	0	24	Sim	1956	1961	Galgamento
112	Killington	Grã-Bretanha	13	18	Sim	1820	1836	Galgamento
113	Lake Barcroft	EUA	13	21	Sim	1913	1972	Galgamento
114	Lake Hemet	EUA	13	45	Sim	1923	1927	Galgamento
115	Lake Vera	EUA	13	15	Sim	1880	1905	Galgamento
116	Lookout Shoals	EUA	13	25	Sim	1915	1916	Galgamento
117	Lower Idaho Falls	EUA	13	15	Sim	1914	1976	Galgamento
118	Lower Otay	EUA	13	47	Sim	1901	1916	Galgamento
119	Machhu-II	Índia	13	25	Sim	1972	1979	Galgamento
120	McMahon Gulch	EUA	13	17	Sim	1925	1926	Galgamento
121	Näoppikoski	Suécia	13	18	Sim	1966	1985	Galgamento
122	Odiel	Espanha	13	35	Sim	1970	1968	Galgamento
123	Ogayarindo Tameike	Japão	0	24	Sim	1944	1963	Galgamento
124	Oklahoma City	EUA	9	16	Sim	1919	1923	Galgamento
125	Ovcar Banja	Iugoslávia	0	27	Sim	1952	1965	Galgamento
126	Overholser	EUA	13	16	Sim	1920	1923	Galgamento
127	Presa Frias	Argentina	13	18	Sim	1938	1970	Galgamento
128	Saragazonskaya	Rússia	13	23	Sim	1980	1987	Galgamento
129	Schaeffer	EUA	9	30	Sim	1911	1921	Galgamento
130	Scott Falls	Canadá	13	15	Sim	1921	1923	Galgamento
131	Sepulveda	EUA	9	20	Sim		1914	Galgamento
132	Shimantan	China	13	25	Sim	1952	1975	Galgamento
133	South Fork	EUA	13	22	Sim	1839	1889	Galgamento
134	Sweetwater Main	EUA	13	36	Sim	1911	1916	Galgamento
135	Swift (Montana)	EUA	13	57	Sim	1914	1964	Galgamento
136	Tabia	Argélia	13	25	Sim	1876	1876	Galgamento
137	Toccoa	EUA	13	6	Não		1977	Galgamento
138	Tous	Espanha	5	70	Sim	1977	1982	Galgamento
139	Vanch	Tajiquistão	13		Não		1994	Galgamento
140	Waghad (A)	Índia	0	32	Sim	1884	1883	Galgamento
141	Walnut Grove	EUA	13	33	Sim	1888	1890	Galgamento
142	Wisconsin Dells	EUA	9	18	Sim	1909	1911	Galgamento
143	Xonxa	África do Sul	5	24	Sim	1974	1972	Galgamento
144	Balsam	EUA	9	18	Sim	1927	1929	Comporta do vertedouro
145	Boa Esperança	Brasil	13	17	Sim	1976	1977	Comporta do vertedouro
146	Bully Creek	EUA	13	38	Sim	1913	1925	Comporta do vertedouro
147	Chambers Lake I	EUA	13	15	Sim	1885	1891	Comporta do vertedouro
148	Chambers Lake II	EUA	13	15	Sim	1885	1907	Comporta do vertedouro
149	Del Monte	Colômbia	13		Sim		1976	Comporta do vertedouro

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista



ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE RUPTURAS								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de seção (1)	Altura	Grande Barragem	Ano de construção	Ano do Incidente	Modo de Ruptura
150	English	EUA	12	30	Sim	1858	1883	Comporta do vertedouro
151	Erindale	Canadá	9	11	Não	1912	1910	Comporta do vertedouro
152	Graham Lake I	EUA	9	34	Sim	1922	1923	Comporta do vertedouro
153	Lake Francis (B)	EUA	11	24	Sim	1901	1935	Comporta do vertedouro
154	Mammoth	EUA	9	23	Sim	1916	1917	Comporta do vertedouro
155	Molteno	África do Sul	13	15	Sim	1881	1882	Comporta do vertedouro
156	Ojirami	Nigéria	13	13	Não		1980	Comporta do vertedouro
157	Santa Helena	Brasil	13	17	Sim	1979	1985	Comporta do vertedouro
158	Tirlyan	Rússia	13	10	Não	1949	1994	Comporta do vertedouro
159	Torside (B)	Grã-Bretanha	8	31	Sim	1855	1854	Comporta do vertedouro
160	Wagner Creek	EUA	11	15	Sim	1918	1938	Comporta do vertedouro
161	Wesley E. Seale	EUA	13	35	Sim	1958	1965	Comporta do vertedouro
162	Whitewater Brook Upper	EUA	13	19	Sim	1949	1972	Comporta do vertedouro
163	Anaconda	EUA	9	22	Sim	1898	1938	Modo de ruptura desconhecido
164	Chitauni	Índia	13		Sim		1968	Modo de ruptura desconhecido
165	Colley Lake	EUA	13	19	Sim		1963	Modo de ruptura desconhecido
166	Cuba	EUA	13	16	Sim	1851	1868	Modo de ruptura desconhecido
167	Elmali I	Instambul	13	23	Sim	1892	1916	Modo de ruptura desconhecido
168	Guddah	Índia	13	28	Sim	1956	1956	Modo de ruptura desconhecido
169	Kohodiar	Índia	13	36	Sim	1963	1983	Modo de ruptura desconhecido
170	Rhodesworth	Grã-Bretanha	13	21	Sim	1855	1852	Modo de ruptura desconhecido
171	Spitskop	África do Sul	13	18	Sim	1974	1988	Modo de ruptura desconhecido

Tipo de seção da barragem	Código
Terra homogênea	0
Terra com filtro	1
Terra com enrocamento de pé	2
Terra, zoneada	3
Terra, zoneada e enrocamento	4
Terra com núcleo central e enrocamento	5
Terra com face de concreto	6
Enrocamento com face de concreto	7
Terra com cortina espessa	8
Enrocamento com cortina espessa	9
Terra com núcleo impermeável	10
Aterro Hidráulico	11
Outro tipo de barragem	12
Tipo de seção não conhecido	13

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
1	Apa (A)	Turquia	13	31	Sim	1962	1963	<i>Piping</i> através do barramento
2	Arbon	Espanha	5	32	Sim	1967	1967	<i>Piping</i> através do barramento
3	Arkabutla (A)	EUA	13	25	Sim	1943	1948	<i>Piping</i> através do barramento
4	Balderhead	Grã-Bretanha	5	48	Sim	1965	1967	<i>Piping</i> através do barramento
5	Barreiras (A)	Brasil	2	40	Sim	1965	1974	<i>Piping</i> através do barramento
6	Bolaso	Espanha	0		Não	1949	1973	<i>Piping</i> através do barramento
7	Bubali	Índia	4	21	Sim	1983	1983	<i>Piping</i> através do barramento
8	Bullileo	Chile	5	70	Sim	1945	1982	<i>Piping</i> através do barramento
9	Cedegren Example 1	Não conhecido	0	27	Sim			<i>Piping</i> através do barramento
10	Churchill Falls FF-11	Canadá	5	21	Sim	1972	1972	<i>Piping</i> através do barramento
11	Cobar	Austrália	13	9	Não	1900	1971	<i>Piping</i> através do barramento
12	Coulter	Grã-Bretanha	8	24	Sim	1907	1912	<i>Piping</i> através do barramento
13	Crane Creek (C)	EUA	9	30	Sim	1920	1928	<i>Piping</i> através do barramento; deslizamento a jusante
14	Cwmtillery	Grã-Bretanha	8	13	Não	1895	1954	<i>Piping</i> através do barramento
15	Daggs	EUA	3	19	Sim	1919	1973	<i>Piping</i> através do barramento
16	Davis Battle Creek Watershed E1	EUA	13	19	Sim	1968	1974	<i>Piping</i> através do barramento
17	De Sabla Forebay	EUA	0	16	Sim	1903	1932	<i>Piping</i> através do barramento
18	Deep Creek	EUA	10	28	Sim	1927	1990	<i>Piping</i> através do barramento
19	Dick Capik	EUA	13	5	Não	1965	1966	<i>Piping</i> através do barramento
20	Doe Park	Grã-Bretanha	8	18	Sim	1861	1863	<i>Piping</i> através do barramento
21	Douglas	EUA	2	12	Sim	1901	1990	<i>Piping</i> através do barramento, <i>Piping</i> através da fundação
22	Electric Lake	EUA	3	62	Sim	1974	1975	<i>Piping</i> através do barramento
23	Flagstaff	Austrália	5	16	Sim	1963	1963	<i>Piping</i> através do barramento
24	Fonte Longa	Portugal	1	22	Sim	1988	1988	<i>Piping</i> através do barramento
25	Gostei	Portugal	1	29	Sim	1993	1993	<i>Piping</i> através do barramento

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
26	Grahamstown	Austrália	3	12	Sim	1969		Piping através do barramento
27	Greenbooth (B)	Grã-Bretanha	8	35	Sim	1962	1983	Piping através do barramento
28	Grundsjon	Suécia	5	43	Sim	1972	1990	Piping através do barramento
29	Guadalupe	EUA	4	42	Sim	1935	1952	Piping através do barramento
30	Hewenden	Grã-Bretanha	8	12	Não	1841	1972	Piping através do barramento
31	Holdenwood	Grã-Bretanha	8	17	Sim	1841	1945	Piping através do barramento
32	Hop Brook	EUA	5	30	Sim	1968	1986	Piping através do barramento
33	Hrinova (A)	Tchecoslováquia	5	42	Sim	1965	1966	Piping através do barramento
34	Hrinova (B)	Tchecoslováquia	5	42	Sim	1965	1968	Piping através do barramento
35	Hyttejuvet	Noruega	5	93	Sim	1965	1972	Piping através do barramento
36	Irukaike (A)	Japão	0	27	Sim	1633	1971	Piping através do barramento
37	João Penido	Brasil	1	13	Não	1936	1974	Piping através do barramento
38	John Zinc Ranch N°2	EUA	0	15	Sim	1972	1973	Piping através do barramento, deslizamento a jusante
39	Juklavatn Secondary	Noruega	5	25	Sim	1974		Piping através do barramento
40	Juktan	Suécia	5	18	Sim	1978	1979	Piping através do barramento
41	Kaldevatn	Noruega	5	24	Sim	1974		Piping através do barramento
42	Kale	Guiné	3	20	Sim	1963	1965	Piping através do barramento
43	Kilburn	África do Sul	13	51	Sim	1981	1981	Piping através do barramento
44	Lac Noir	França	9	15	Sim	1932	1939	Piping através do barramento, Piping através da fundação
45	Lake Darling	EUA	3	11	Não	1935	1988	Piping através do barramento
46	Laurel Creek Lake	EUA	3	16	Sim	1961	1976	Piping através do barramento
47	Lavaud - Gelade	França	0	22	Sim	1943	1991	Piping através do barramento
48	Lincoln Trial State Park	EUA	0	12	Não	1956	1975	Piping através do barramento
49	Lluest Wen	Grã-Bretanha	8	20	Sim	1896	1969	Piping através do barramento
50	Los ReSim	México	11	30	Sim	1912	1940	Piping através do barramento

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
51	Lower Oakdale	Grã-Bretanha	8	11	Não		1986	Piping através do barramento
52	Mac Millan (A)	EUA	4	16	Sim	1893	1915	Piping através do barramento
53	Mac Millan (B)	EUA	4	16	Sim	1893	1937	Piping através do barramento
54	Magic	EUA	2	41	Sim	1910	1911	Piping através do barramento, descarga através da fundação
55	Marston Lake Dike	EUA	0	62	Sim	1911	1925	Piping através do barramento
56	Martin Gonzalo	Espanha	7	54	Sim	1986	1987	Piping através do barramento
57	Masterson	EUA	2	18	Sim	1950	1951	Piping através do barramento
58	Matahina	Nova Zelândia	5	85	Sim	1966	1967	Piping através do barramento
59	Matsuda Tameike	Japão	13	20	Sim	1907	1954	Piping através do barramento
60	McAlpine Locks	EUA	0	15	Sim	1962	1986	Piping através do barramento
61	Milner	EUA	10	26	Sim	1905	1983	Piping através do barramento
62	Morwell Não.2 Fire Service	Austrália	1	9	Não	1968	1968	Piping através do barramento
63	Mosonda Falls	Zâmbia	13	11	Não	1971	1978	Piping através do barramento
64	Mud Mountain	EUA	5	128	Sim	1953	1986	Piping através do barramento
65	Mysevatn	Noruega	5	60	Sim	1973	1973	Piping através do barramento
66	Paduli	Itália	11	19	Sim	1906	1925	Piping através do barramento
67	Penn Forest	EUA	3	52	Sim	1959	1960	Piping através do barramento
68	Poortjie	África do Sul	0	18	Sim	1926	1974	Piping através do barramento
69	Porjus Powerstation	Noruega	5	22	Sim	1980	1993	Piping através do barramento
70	Poroy	Bulgária	2	30	Sim	1972	1986	Piping através do barramento
71	Rhodeswood	Grã-Bretanha	8	21	Sim	1852	1858	Piping através do barramento
72	Rivington Lower	Grã-Bretanha	8	18	Sim	1857	1932	Piping através do barramento
73	Roddlesworth Upper	Grã-Bretanha	8	21	Sim	1865	1904	Piping através do barramento
74	Rowallan	Austrália	5	43	Sim	1967	1968	Piping através do barramento
75	Saint Pardoux	França	2	19	Sim	1974	1991	Piping através do barramento
76	Santa Rosa	EUA	0	12	Sim	1929	1975	Piping através do barramento

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
77	Sapins	França	2	16	Sim	1978	1988	Piping através do barramento
78	Scofield	EUA	4	24	Sim	1926	1928	Piping através do barramento
79	Scotts Peak	Austrália	7	43	Sim	1973	1974	Piping através do barramento
80	Songa	Noruega	5	42	Sim	1962	1976	Piping através do barramento
81	Sorpe	Alemanha	10	69	Sim	1935	1951	Piping através do barramento
82	Stafford	EUA	6	32	Sim	1951	1973	Piping através do barramento
83	Staviste	Tchecoslováquia	3	11	Não	1959	1965	Piping através do barramento
84	Steinaker	EUA	3	49	Sim	1962	1962	Piping através do barramento
85	Stenkullafors	Suécia	3	25	Sim	1983	1987	Piping através do barramento
86	Suorva East	Suécia	5	50	Sim	1972	1983	Piping através do barramento
87	Sydney Theme Park Basin 7	Austrália	0		Não		1985	Piping através do barramento
88	Table Rock Cove	EUA	2	43	Sim	1927	1928	Piping através do barramento, deslizamento a jusante
89	Tarbela Auxiliary Dam-I	Paquistão	3	105	Sim	1974	1977	Piping através do barramento
90	Tarbela Main Dam	Paquistão	3	143	Sim	1974	1984	Piping através do barramento
91	Terrace Reservoir	EUA	11	48	Sim	1912	1957	Piping através do barramento, deslizamento a jusante
92	Tileagd Dyke	Romênia	6	20	Sim	1989	1990	Piping através do barramento, deslizamento a jusante
93	Townshend Lake	EUA	4	42	Sim	1961	1969	Piping através do barramento, Piping através da fundação
94	Viddalsvatn	Noruega	5	80	Sim	1972	1972	Piping através do barramento
95	Wells	EUA	3	49	Sim	1967	1990	Piping através do barramento
96	Whiteman's	Canadá	3	24	Sim	1951	1994	Piping através do barramento
97	Wild Rice Creek	EUA	0	12	Sim	1960	1983	Piping através do barramento
98	Wister	EUA	1	30	Sim	1948	1949	Piping através do barramento
99	Withens Clough	Grã-Bretanha	8	35	Sim	1894	1957	Piping através do barramento
100	Woodruff Narrows	EUA	13	17	Sim	1962		Piping através do barramento

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
101	Yan Yean	Austrália	8	10	Sim	1857	1949	<i>Piping</i> através do barramento
102	Apa (B)	Turquia	13	31	Sim	1962	1966	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
103	Brodhead	EUA	1	33	Sim	1975	1984	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
104	Caspe (B)	Espanha	3	55	Sim	1988	1989	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
105	Chancza	Polônia	6	15	Sim	1994	1994	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
106	Churchill Falls FF-12	Canadá	5	26	Sim		1973	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
107	Churchill Falls GJ-11A	Canadá	4	21	Sim	1972	1972	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
108	Como (B)	EUA	11	21	Sim	1910	1989	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
109	Coursier Lake	Canadá	3	19	Sim	1963	1973	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
110	Cowm	Grã-Bretanha	8	21	Sim	1875	1877	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
111	East Branch	EUA	3	59	Sim	1952	1957	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
112	Fontenelle (A)	EUA	3	42	Sim	1965	1965	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
113	Grizedale	Grã-Bretanha	8	22	Sim	1866	1867	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
114	Gurley Reservoir	EUA	0	21	Sim	1888	1986	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
115	Hallby	Suécia	5	27	Sim	1970	1985	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
116	LG 1 Cofferdam	Canadá	4	19	Sim	1979	1989	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
117	Long Tom	EUA	8	18	Sim	1915	1916	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
118	Lower Lliw	Grã-Bretanha	8	24	Sim	1867	1873	<i>Piping</i> do barramento para a fundação

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
119	Lower Slade	Grã-Bretanha	8	11	Não	1900	1970	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
120	Mogoto	África do Sul	8	36	Sim	1924	1976	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
121	North Springfield Lake	EUA	2	38	Sim	1960	1969	<i>Piping</i> do barramento para a fundação, <i>Piping</i> através da fundação
122	Ochoco (B)	EUA	11	38	Sim	1921	1989	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
123	Patana	Finlândia	3	19	Sim	1967	1987	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
124	Pentwyn	Grã-Bretanha	8	10	Não	1863	1882	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
125	Power Canal	Newfoundland	0	11	Não	1968	1987	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
126	Roxo	Portugal	2	27	Sim	1968	1972	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
127	Taibilla	Espanha	5	39	Sim	1973	1976	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
128	Não conhecido (Sherard – estudo de caso)	Não conhecido	3	45	Sim	1975	1975	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
129	Walshaw Dean Lower	Grã-Bretanha	8	22	Sim	1907	1935	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
130	Walshaw Dean Middle	Grã-Bretanha	8	24	Sim	1907	1935	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
131	Wolf Creek	EUA	1	61	Sim	1951	1967	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
132	Yards Creek	EUA	5	24	Sim	1965	1965	<i>Piping</i> do barramento para a fundação
133	Addicks	EUA	13	15	Sim	1948		<i>Piping</i> através da fundação
134	Bad Axe Watershed Structure Nº 33	EUA	3	16	Sim	1965	1967	<i>Piping</i> através da fundação
135	Bastusel	Suécia	5	40	Sim	1972	1972	<i>Piping</i> através da fundação
136	Beaver Dam Dike	EUA	13	10	Sim	1966	1984	<i>Piping</i> através da fundação

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
137	Bent Run Dike	EUA	6	35	Sim	1969	1971	Piping através da fundação
138	Black Lake	EUA	3	23	Sim	1967	1986	Piping através da fundação
139	Black Rock (B)	EUA	11	21	Sim	1907	1936	Piping através da fundação
140	Bloemhoek	África do Sul	5	21	Sim	1978	1978	Piping através da fundação
141	Borga	Suécia	5	27	Sim	1951	1951	Piping através da fundação
142	Bumping Lake	EUA	11	18	Sim	1910	1992	Piping através da fundação
143	Caballo	EUA	4	33	Sim	1938	1988	Piping através da fundação
144	Caldeirão	Brasil	0	22	Sim	1947	1957	Piping através da fundação
145	Cedar Creek (B)	EUA	4	24	Sim	1920	1971	Piping através da fundação
146	Denison	EUA	3	50	Sim	1994	1992	Piping através da fundação
147	Enid (A)	EUA	3	30	Sim	1952	1957	Piping através da fundação
148	Goczalkowice	Polónia	6	17	Sim	1956		Piping através da fundação
149	Grenada (C)	EUA	13	24	Sim	1954	1959	Piping através da fundação
150	Grenada (D)	EUA	13	24	Sim	1954	1965	Piping através da fundação
151	Koronowo	Polónia	11	23	Sim			Piping através da fundação
152	Lake Alice Não. 1	EUA	3	13	Sim	1912	1972	Piping através da fundação
153	Lake Invernada	Chile	4	30	Sim	1957	1958	Piping através da fundação
154	Langbjorn	Noruega	13		Não	1958	1990	Piping através da fundação
138	Ljusne	Espanha	13	30	Sim	1950	1949	Piping através da fundação
139	Logan Martin	EUA	2	30	Sim	1964	1964	Piping através da fundação
140	Marion County	EUA	0	17	Sim	1938	1938	Piping através da fundação
141	Meeks Cabin	EUA	3	57	Sim	1971	1986	Piping através da fundação
142	Merrit	EUA	3	35	Sim	1964	1966	Piping através da fundação
143	Messaure	Suécia	5	100	Sim	1962		Piping através da fundação
144	Mill Creek (B) (Wash)	EUA	1	44	Sim	1941	1945	Piping através da fundação
145	Nepes	França	9	13	Sim	1945	1988	Piping através da fundação

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista



ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
146	North Springfield Lake	EUA	2	38	Sim	1960	1969	<i>Piping</i> através da fundação, <i>Piping</i> do barramento para a fundação
147	Ochoco (A)	EUA	11	38	Sim	1921	1921	<i>Piping</i> através da fundação
148	Pablo	EUA	0	16	Sim	1913	1913	<i>Piping</i> através da fundação
149	Paloma	Chile	5	85	Sim	1967	1973	<i>Piping</i> através da fundação
150	Sardis (C)	EUA	11	35	Sim	1940	1974	<i>Piping</i> através da fundação
151	Sardis (D)	EUA	11	35	Sim	1940	1945	<i>Piping</i> através da fundação
152	Seitevare	Suécia	5	106	Sim	1967	1967	<i>Piping</i> através da fundação
153	Sir Adam Beck II	Canadá	4	22	Sim	1956		<i>Piping</i> através da fundação, <i>Piping</i> através do barramento
154	Terzaghi	Canadá	4	60	Sim	1960	1962	<i>Piping</i> através da fundação
155	Theodore	Canadá	0	15	Sim	1964	1968	<i>Piping</i> através da fundação
156	Uljua	Finlândia	5	16	Sim	1970	1990	<i>Piping</i> através da fundação
157	Upper Highline Reservoir	EUA	0	26	Sim	1966	1967	<i>Piping</i> através da fundação
158	Walter F. George Lock (A)	EUA	3	52	Sim	1963	1968	<i>Piping</i> através da fundação
159	Walter F. George Lock (B)	EUA	3	52	Sim	1963	1982	<i>Piping</i> através da fundação
160	Washakie	EUA	3	19	Sim	1935	1935	<i>Piping</i> através da fundação
161	Wooderest (B)	EUA	13	12	Não	1953		<i>Piping</i> através da fundação
162	Arm Broke Site	EUA	0	18	Sim	1963	1964	<i>Piping</i> através da fundação, liquefação
163	Bonny	EUA	1	48	Sim	1951	1955	<i>Piping</i> através da fundação, liquefação
164	Cobb Creek N°1 (B)	EUA	1	23	Sim	1959	1962	<i>Piping</i> através da fundação, liquefação
165	Como (A)	EUA	11	21	Sim	1910	1983	<i>Piping</i> através da fundação, liquefação
166	Dudhava	Índia	3	32	Sim	1962	1962	<i>Piping</i> através da fundação, liquefação

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
167	Jocassee	EUA	5	124	Sim	1973	1976	Piping através da fundação, liquefação
168	Kanopolis (A)	EUA	1	34	Sim	1948	1950	Piping através da fundação, liquefação
169	Kurth	EUA	13		Não	1960	1971	Piping através da fundação, liquefação
170	Lake Buckhorn	EUA	13	20	Sim	1967	1974	Piping através da fundação, liquefação
171	LG 3 - Dike TA 26B	Canadá	1	8	Não	1981	1982	Piping através da fundação, liquefação
172	LG 3 - Dike TA 27C	Canadá	3	13	Não	1981	1982	Piping através da fundação, liquefação
173	LG 3 - Dike TA 30	Canadá	3	10	Não	1981	1982	Piping através da fundação, liquefação
174	Mohawk	EUA	13	34	Sim	1937	1969	Piping através da fundação, liquefação
175	Montepelier Creek	EUA	3	25	Sim	1969	1971	Piping através da fundação, liquefação
176	Nagarjunasagar	Índia	3	26	Sim	1968		Piping através da fundação, liquefação
177	Nilford	EUA	13	45	Sim	1967	1973	Piping através da fundação, liquefação
178	Orwell	EUA	0	18	Sim	1953	1976	Piping através da fundação, liquefação
179	Prezcyce	Polônia	6	11	Não			Piping através da fundação, liquefação
180	Sarda Sagar	Índia	1	16	Sim	1961	1961	Piping através da fundação, liquefação
181	Senator Wash	EUA	3	29	Sim	1966	1966	Piping através da fundação, liquefação
182	Tuttle Creek (A)	EUA	13	48	Sim	1962	1962	Piping através da fundação, liquefação
183	West Hill	EUA	3	17	Sim	1961	1979	Piping através da fundação, liquefação

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
184	Keban (A)	Turquia	13	208	Sim	1974	1975	<i>Piping</i> através da fundação (reservatório)
185	Ludington Pumped Storage Plant	EUA	6	52	Sim	1972	1988	<i>Piping</i> através da fundação (reservatório)
186	Tarbela	Paquistão	13	145	Sim	1974	1974	<i>Piping</i> através da fundação (reservatório)
187	Three Sisters	Canadá	0	21	Sim	1952	1974	<i>Piping</i> através da fundação (reservatório)
188	Arkabutla (C)	EUA	13	25	Sim	1943	1970	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
189	Estevam Marinho	Brasil	13		Não	1943		<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
190	Morden	Canadá	13	20	Sim	1953	1957	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
191	Admiral	Canadá	13	13	Sim	1949	1958	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
192	Arkabutla (B)	EUA	13	25	Sim	1943	1967	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
193	Forsythe	EUA	0	20	Sim	1920	1921	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro), Deslizamento a montante
194	Gouverner	Canadá	13	16	Sim	1951	1958	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
195	Homme (A)	EUA	13	22	Sim	1951	1955	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
196	Middle Fork (A)	EUA	13	29	Sim	1939		<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
197	Sardis (A)	EUA	11	35	Sim	1940	1945	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
198	Tiber	EUA	13	62	Sim	1956	1967	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
199	Tongue River (A)	EUA	4	43	Sim	1939	1965	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)
200	Waucondah	EUA	0	13	Não	1867	1977	<i>Piping</i> através da fundação (vertedouro)

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
201	Alexander	EUA	11	29	Sim	1932	1930	deslizamento a jusante
202	Antílope	Antílope	13		Não	1971		deslizamento a jusante
203	Aran	Índia	3	30	Sim	1977	1978	deslizamento a jusante
204	Arroyito	Argentina	1	20	Sim	1978	1984	deslizamento a jusante
205	Ashti	Índia	3	18	Sim	1883	1962	deslizamento a jusante
206	Barton (A)	EUA	0	12	Não	1910	1922	deslizamento a jusante
207	Bear Gulch (B)	EUA	0	19	Sim	1929	1930	deslizamento a jusante
208	Beargamil (A)	Austrália	9	16	Sim	1912	1945	deslizamento a jusante
209	Beargamil (B)	Austrália	9	16	Sim	1912	1950	deslizamento a jusante
210	Benamarias	Espanha	0	14	Não	1972	1973	deslizamento a jusante
211	Bendsura	Índia	12	22	Sim	1955	1962	deslizamento a jusante
212	Bon Accord	África do Sul	13	18	Sim	1925	1937	deslizamento a jusante
213	Buckieburn Reservoir	Grã-Bretanha	13	23	Sim	1900	1970	deslizamento a jusante
214	Cave Creek	EUA	0	24	Sim	1963	1969	deslizamento a jusante, descarga através do barramento
215	Chingford	Grã-Bretanha	8	10	Não	1945	1937	deslizamento a jusante
216	Chmelar	Tchecoslováquia	0	5	Não	1962	1965	deslizamento a jusante
217	Colorado Springs N°4	EUA	0	15	Sim		1912	deslizamento a jusante, descarga através do barramento
218	Combs	Grã-Bretanha	0	16	Sim	1809	1976	deslizamento a jusante
219	Costilla (B)	EUA	1	47	Sim	1920	1942	deslizamento a jusante
220	Ekruk	Índia	0	27	Sim	1871	1973	deslizamento a jusante
221	El Estribon	México	5	21	Sim	1946	1963	deslizamento a jusante
222	Garza	EUA	11	37	Sim	1927	1927	deslizamento a jusante, deslizamento a montante
223	Great Western	EUA	0	19	Sim	1907	1958	deslizamento a jusante

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
224	Greenbooth (A)	Grã-Bretanha	8	36	Sim	1962	1962	deslizamento a jusante
225	Harrogate	Grã-Bretanha	8	9	Não	1951	1869	deslizamento a jusante
226	Hatchtown (A)	EUA	1	19	Sim	1908	1910	deslizamento a jusante
227	Kenray	EUA	0	17	Sim	1962	1964	deslizamento a jusante
228	Lafayette	EUA	3	30	Sim	1929	1928	deslizamento a jusante
229	Lake Marie	EUA	0	15	Sim	1880	1970	deslizamento a jusante
230	Lake Waxahachie	EUA	13	15	Sim	1956	1968	deslizamento a jusante
231	Lake Yosemite	EUA	0	16	Sim	1884	1943	deslizamento a jusante
232	Msinje Farm	Rodésia	2	16	Sim	1970	1974	deslizamento a jusante, descarga através do barramento
233	Nher	Índia	0	23	Sim	1890	1989	deslizamento a jusante
234	North Lake	EUA	13		Não	1957	1975	deslizamento a jusante
235	Northridge	Grã-Bretanha	1	20	Sim	1956	1953	deslizamento a jusante
236	Park Reservoir (A)	EUA	2	24	Sim	1909	1969	deslizamento a jusante, deslizamento a montante
237	Pleasant Valley (Idaho)	EUA	2	17	Sim	1905	1907	deslizamento a jusante
238	Round Valley Reservoir South	EUA	3	54	Sim	1961	1983	deslizamento a jusante
239	Saluda (C)	EUA	11	63	Sim	1930	1930	deslizamento a jusante
240	Sampna Tank (A)	Índia	3	22	Sim	1956	1959	deslizamento a jusante
241	San Pablo Clearwell	EUA	1	11	Não	1922	1922	deslizamento a jusante
242	Seven Sisters Dike	Grã-Bretanha	5	7	Não	1949	1956	deslizamento a jusante
243	Slavujevce-I	Yugoslavia	1	9	Não	1964	1992	deslizamento a jusante
244	Spring Creek	Austrália	9	17	Sim	1947	1966	deslizamento a jusante
245	Standley Lake (A)	EUA	0	34	Sim	1912	1912	deslizamento a jusante
246	Standley Lake (B)	EUA	0	34	Sim	1912	1914	deslizamento a jusante

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
247	Stanislau Forebay	EUA	0		Não	1908		deslizamento a jusante
248	Tamar Lake	Grã-Bretanha	8	8	Não	1825	1943	deslizamento a jusante
249	Victor Braunig	EUA	1	24	Sim	1962	1969	deslizamento a jusante
250	Waco (B)	EUA	1	43	Sim	1965	1961	deslizamento a jusante
251	Waghad (B)	Índia	0	32	Sim	1884	1884	deslizamento a jusante
252	Waghad (C)	Índia	0	32	Sim	1884	1907	deslizamento a jusante
253	Waghad (F)	Índia	0	32	Sim	1884	1976	deslizamento a jusante
254	Waverly	EUA	9	21	Sim	1880	1973	deslizamento a jusante, deslizamento a montante
255	Woodmoor Reservoir	EUA	1	18	Sim	1968	1972	deslizamento a jusante, descarga através da fundação
256	Woodrat Knob	EUA	0	26	Sim	1956	1961	deslizamento a jusante, descarga através dobarramento
257	Wyandotte County	EUA	3	28	Sim	1941	1937	deslizamento a jusante
258	Yuba (New dam)	EUA	0	8	Não	1949	1951	deslizamento a jusante
259	Açu	Brasil	3	35	Sim	1981	1982	Deslizamento a montante
260	Bear Gulch (A)	EUA	0	14	Não	1896	1914	Deslizamento a montante
261	Bear Gulch (C)	EUA	0	19	Sim	1929	1936	Deslizamento a montante
262	Bear Gulch (D)	EUA	0	19	Sim	1929	1942	Deslizamento a montante
263	Bear Gulch (E)	EUA	0	19	Sim	1929	1944	Deslizamento a montante
264	Belle Fourche	EUA	0	38	Sim	1909	1931	Deslizamento a montante
265	Brush Hollow (B)	EUA	8	30	Sim	1910	1928	Deslizamento a montante
266	Calaveras	EUA	11	67	Sim	1925	1918	Deslizamento a montante
267	Carsington	Grã-Bretanha	3	35	Sim	1992	1984	Deslizamento a montante
268	Cercey (A)	França	3	12	Não	1836	1842	Deslizamento a montante
269	Cercey (B)	França	3	12	Não	1836	1866	Deslizamento a montante

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
270	Charmes	França	0	17	Sim	1906	1909	Deslizamento a montante
271	Clendening	EUA	5	20	Sim	1937	1937	Deslizamento a montante
272	Eildon	Austrália	10	40	Sim	1927	1929	Deslizamento a montante
273	Fort Peck	EUA	11	76	Sim	1940	1938	Deslizamento a montante
274	Grosbois	França	6	18	Sim	1900	1921	Deslizamento a montante
275	Holmes Creek (B)	EUA	11	20	Sim	1903	1924	Deslizamento a montante
276	Hume (A)	Austrália	9	50	Sim	1936	1939	Deslizamento a montante
277	Jewellbrook Watershed N°2	EUA	1	18	Sim	1969	1970	Deslizamento a montante
278	La Calera	México	5	28	Sim	1963	1964	Deslizamento a montante, abalo sísmico
279	Lake Shelbyville	EUA	1	33	Sim	1970	1970	Deslizamento a montante
280	Mount Pisgah (A)	EUA	6	23	Sim	1910	1928	Deslizamento a montante
281	Muirhead	Grã-Bretanha	8	21	Sim		1941	Deslizamento a montante
282	Narraguinep (B)	EUA	2	23	Sim	1908	1928	Deslizamento a montante
283	Narraguinep (C)	EUA	2	23	Sim	1908	1947	Deslizamento a montante
284	Palakmati	Índia	1	15	Sim	1938	1953	Deslizamento a montante
285	Park Reservoir (B)	EUA	3	24	Sim	1982	1981	Deslizamento a montante
286	Phoenix	EUA	0	27	Sim	1908	1968	Deslizamento a montante
287	Pilarcitus	EUA	8	37	Sim	1866	1969	Deslizamento a montante
288	Prospect (A)	Austrália	8	26	Sim	1888	1888	Deslizamento a montante
289	Saluda (B)	EUA	11	63	Sim	1930	1929	Deslizamento a montante
290	Sampna Tank (B)	Índia	3	22	Sim	1956	1961	Deslizamento a montante
291	Sampna Tank (C)	Índia	3	22	Sim	1956	1964	Deslizamento a montante
292	San Luis	EUA	3	116	Sim	1967	1981	Deslizamento a montante
293	Scout Reservation	EUA	1	14	Não	1984	1984	Deslizamento a montante
294	Standley Lake (C)	EUA	0	34	Sim	1912	1916	Deslizamento a montante

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
295	Standley Lake (D)	EUA	0	34	Sim	1912	1922	Deslizamento a montante
296	Standley Lake (E)	EUA	0	34	Sim	1912	1926	Deslizamento a montante
297	Standley Lake (F)	EUA	3	36	Sim	1966	1971	Deslizamento a montante
298	Waghad (D)	Índia	0	32	Sim	1884	1919	Deslizamento a montante
299	Washusett North Dike	EUA	13	25	Sim	1904	1907	Deslizamento a montante
300	Wassy	França	6	16	Sim	1883	1883	Deslizamento a montante
301	Abiquiu	EUA	3		Não	1963	1973	Deslizamento no reservatório
302	Brooktrails N°3 North	EUA	13		Não	1970		Deslizamento no reservatório
303	Broomhead	Grã-Bretanha	13	30	Sim	1934	1930	Deslizamento no reservatório
304	Gepatsch	Austria	13		Não	1966	1966	Deslizamento no reservatório
305	Hasznoos	Hungria	13		Não	1984	1985	Deslizamento no reservatório
306	Homme (B)	EUA	13	22	Sim	1951	1970	Deslizamento no reservatório
307	Jemez Canyon	EUA	13	42	Sim	1953	1958	Deslizamento no reservatório
308	Kalapanayiotis	Chipre	3	25	Sim	1966	1966	Deslizamento no reservatório
309	La Laye	França	13	32	Sim	1965	1974	Deslizamento no reservatório
310	North Hartland Lake	EUA	13		Não	1964		Deslizamento no reservatório
311	Olive Hills	EUA	13	32	Sim		1963	Deslizamento no reservatório
312	Sance	Tchecoslováquia	13		Não	1971		Deslizamento no reservatório
313	Surry Mountain	EUA	3	28	Sim	1942	1962	Deslizamento no reservatório
314	Surry Mountain	EUA	3	28	Sim	1942	1943	Deslizamento no reservatório
315	Birusawa	Japão	13	24	Sim	1948	1978	abalo sísmico
316	Dry Canyon (A)	EUA	11	20	Sim	1912	1952	abalo sísmico
317	Hebgen	EUA	9	37	Sim	1915	1959	abalo sísmico
318	Lower San Fernando (B)	EUA	11	43	Sim	1921	1971	abalo sísmico
319	Murayamakami	Japão	8	24	Sim	1923	1923	abalo sísmico
320	Nizhne Svirskaya	Rússia	13	18	Sim	1934	1935	abalo sísmico
321	Onoo	Japão	9	49	Sim	1913	1923	abalo sísmico
322	Otaniike	Japão	3	27	Sim	1920	1946	abalo sísmico
323	San Andreas	EUA	8	30	Sim	1870	1906	abalo sísmico

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista



ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
324	Straz	Tchecoslováquia	13	7	Não	1913	1974	abalo sísmico
325	Upper San Fernando (B)	EUA	11	25	Sim	1921	1971	abalo sísmico
326	Vir (C)	Índia	13	24	Sim	1961	1967	abalo sísmico
327	Antilope	EUA	3	34	Sim	1964	1964	Descarga através do barramento
328	Arnensee	Suíça	0	17	Sim	1956	1956	Descarga através do barramento
329	Barton (B)	EUA	0	15	Sim	1910	1936	Descarga através do barramento
330	Beaver Park	EUA	7	30	Sim	1914	1914	Descarga através do barramento (e fundação)
331	Bitdalen (B)	Noruega	5	45	Sim	1971	1972	Descarga através do barramento
332	Blaen-Y-CWM	Grã-Bretanha	9	18	Sim	1937	1937	Descarga através do barramento
333	Bomba	Itália	13	60	Sim	1960	1961	Descarga através do barramento
334	Calero	EUA	3	28	Sim	1935	1989	Descarga através do barramento (e fundação)
335	Cogswell	EUA	7	85	Sim	1935	1934	Descarga através do barramento
336	Cooney (B)	EUA	13		Não	1936		Descarga através do barramento
337	Costilla (A)	EUA	1	47	Sim	1920	1924	Descarga através do barramento
338	Courtright	EUA	7	95	Sim	1958	1959	Descarga através do barramento
339	Divor	Portugal	13	17	Sim	1965		Descarga através do barramento
340	Drum Forebay	EUA	0	16	Sim	1913	1914	Descarga através do barramento
341	Encino (A)	EUA	0	36	Sim	1924	1924	Descarga através do barramento
342	Fairfax Lake	EUA	8	17	Sim	1936	1992	Descarga através do barramento
343	Fourth Lake	Canadá	4	18	Sim	1960	1961	Descarga através do barramento (e fundação)
344	Golder	EUA	3	40	Sim	1964	1964	Descarga através do barramento (e fundação)
345	Graham Lake (rebuilt)	EUA	9	34	Sim	1925	1989	Descarga através do barramento
346	Great Lake	Grã-Bretanha	0	8	Não	1798	1967	Descarga através do barramento
347	Hautapera	Finlândia	1	25	Sim	1976		Descarga através do barramento

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

<b>ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES</b>								
<b>Nº</b>	<b>Nome da Barragem</b>	<b>País</b>	<b>Tipo de Seção (1)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Grande Barragem</b>	<b>Ano de Construção</b>	<b>Ano do Acidente</b>	<b>Modo de Acidente</b>
348	Hebron (C)	EUA	0	17	Sim	1913	1913	Descarga através do barramento
349	Hills Creek	EUA	3	92	Sim	1962	1969	Descarga através do barramento
350	Juklavatn	Noruega	5	60	Sim	1974		Descarga através do barramento
351	Kanopolis (C)	EUA	1	34	Sim	1948	1958	Descarga através do barramento
352	Konar	Índia	3	38	Sim	1955	1963	Descarga através do barramento
353	Kurth-Wildenstein	França	6	37	Sim	1964	1964	Descarga através do barramento
354	Lake Coleman	EUA	13		Não	1966	1970	Descarga através do barramento
355	Little Flint Creek	EUA	3	35	Sim	1977	1985	Descarga através do barramento
356	Lyman (B)	EUA	3	20	Sim	1913	1915	Descarga através do barramento (e fundação)
357	Marte R Gómez	México	3	49	Sim	1946	1947	Descarga através do rramento
358	Miraflores	Espanha	7	40	Sim	1976	1976	Descarga através do barramento
359	New Exchequer (A)	EUA	13		Não	1967		Descarga através do barramento
360	Nyrsko	Tchecoslováquia	7		Não	1970	1970	Descarga através do barramento
361	Obecnice	Tchecoslováquia	5		Não	1966	1967	Descarga através do barramento
362	Ogwashita-Ike	Japão	13	26	Sim	1948	1949	Descarga através do barramento
363	Paradela	Portugal	7	110	Sim	1958	1959	Descarga através do barramento
364	Piedmont Não.1	EUA	0	15	Sim	1903	1905	Descarga através do barramento
365	Portillon	França	7	22	Sim	1950	1953	Descarga através do barramento
366	Priest Rapid	EUA	13		Não	1959		Descarga através do barramento
367	Priest Rapids	EUA	13	56	Sim	1959	1964	Descarga através do barramento
368	Rayburn	EUA	13	35	Sim	1973	1974	Descarga através do barramento
369	Sallisaw Creek Não.29	EUA	13	19	Sim	1964	1964	Descarga através do barramento
370	Salt Springs	EUA	7	96	Sim	1931		Descarga através do barramento
371	Shell Oil (B)	EUA	0	24	Sim	1945	1954	Descarga através do barramento
372	Sylvenstein	Alemanha	3	41	Sim	1958		Descarga através do barramento

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
373	Uvas	EUA	13	36	Sim	1957		Descarga através do barramento (e fundação)
374	Wingecarribee	Austrália	4	20	Sim	1974	1974	Descarga através do barramento (e fundação)
375	Winscar	Grã-Bretanha	7	53	Sim	1974	1977	Descarga através do barramento
376	Wiston	EUA	7	80	Sim	1958		Descarga através do barramento
377	Yorba	EUA	11	15	Sim	1907	1907	Descarga através do barramento (e fundação)
378	Alum Fork	EUA	1	35	Sim	1936	1938	Descarga através da fundação
379	Beardmore	Austrália	13	17	Sim	1972	1972	Descarga através da fundação
380	Bell Canyon	EUA	13	29	Sim	1959	1960	Descarga através da fundação
381	Broomhead	Grã-Bretanha	13	30	Sim	1934	1929	Descarga através da fundação
382	Callide	Austrália	13	45	Sim	1965	1965	Descarga através da fundação
383	Camanche	EUA	3	52	Sim	1963		Descarga através da fundação
384	Caspe (A)	Espanha	3	55	Sim	1988	1988	Descarga através da fundação
385	Crooked Creek (B)	EUA	3	49	Sim	1940	1972	Descarga através da fundação
386	Demirkopru	Turquia	13	77	Sim	1960	1963	Descarga através da fundação
387	Dry Canyon (B)	EUA	11	20	Sim	1912		Descarga através da fundação
388	Eagle Valley Dam J-78	EUA	3	22	Sim	1965	1965	Descarga através da fundação
389	Edith C. Justus	EUA	0	28	Sim	1971	1971	Descarga através da fundação
390	El Chocon	Argentina	3	92	Sim	1972	1982	Descarga através da fundação
391	Enders	EUA	3	27	Sim	1951	1951	Descarga através da fundação
392	English Water Supply	EUA	3	16	Sim	1965	1966	Descarga através da fundação
393	Enid (B)	EUA	3		Não	1952	1957	Descarga através da fundação
394	Estanca de Alcaniz	Espanha	3	15	Sim	1932	1991	Descarga através da fundação
395	Gilbert Run Não.2 (A)	EUA	0	15	Sim	1913	1913	Descarga através da fundação
396	Glenbawn	Austrália	13		Não	1958		Descarga através da fundação

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
397	Grenada (B)	EUA	13		Não	1954	1954	Descarga através da fundação
398	Harmon Creek Site PA 483	EUA	3	20	Sim	1973	1973	Descarga através da fundação
399	Helgedalsvatn	Noruega	5	25	Sim	1968		Descarga através da fundação
400	Hill	EUA	0	15	Sim	1951	1951	Descarga através da fundação
401	Jaburu	Brasil	5	47	Sim	1983	1988	Descarga através da fundação
402	Jennings Creek Watershed N.13	EUA	2	22	Sim	1962	1962	Descarga através da fundação
403	Jennings Creek Watershed N.17	EUA	0	23	Sim	1964	1965	Descarga através da fundação
404	Jennings Creek Watershed N.18	EUA	0	29	Sim	1963	1965	Descarga através da fundação
405	Jennings Creek Watershed N.5	EUA	2	20	Sim	1962	1962	Descarga através da fundação
406	Jesenice (B)	Tchecoslováquia	13		Não	1961		Descarga através da fundação
407	Julesberg (A)	EUA	6	18	Sim	1905	1906	Descarga através da fundação
408	Kern	EUA	2	18	Sim	1948	1951	Descarga através da fundação
409	Kern River State Park	EUA	13	5	Não	1959		Descarga através da fundação
410	Kumari	Índia	3	41	Sim	1973	1973	Descarga através da fundação
411	Lar	Iran	13	105	Sim	1981	1981	Descarga através da fundação
412	LG 3 - Dike TA 29C	Canadá	3	8	Não	1981	1982	Descarga através da fundação
413	LG 3 Dike D-20	Canadá	3	52	Sim	1979	1979	Descarga através da fundação
414	LG3 - Dike TA 32	Canadá	3	8	Não	1981	1982	Descarga através da fundação
415	Little Rocky Run	EUA	0	18	Sim	1971	1972	Descarga através da fundação
416	Los Sauces	Argentina	10	42	Sim	1931	1977	Descarga através da fundação
417	Lower San Fernando (A)	EUA	11	43	Sim	1918	1921	Descarga através da fundação
418	Madera Lake	EUA	13	10	Não	1958	1958	Descarga através da fundação
419	Mill Creek (A), (Wash)	EUA	0	44	Sim	1939	1940	Descarga através da fundação
420	Moose Creek	EUA	3	14	Não	1980	1985	Descarga através da fundação
421	Narraguinep (A)	EUA	2	23	Sim	1908	1908	Descarga através da fundação

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

ERDATA 1 – BASE DE DADOS DE ACIDENTES								
Nº	Nome da Barragem	País	Tipo de Seção (1)	Altura (m)	Grande Barragem	Ano de Construção	Ano do Acidente	Modo de Acidente
422	Nechranice	Tchecoslováquia	13		Não	1960		Descarga através da fundação
423	Otter Creek Watershed Structure N.9	EUA	0	18	Sim	1970	1970	Descarga através da fundação
424	Rattle Snake	EUA	13	22	Sim	1959		Descarga através da fundação
425	Red Mountain	EUA	13	18	Sim	1949	1950	Descarga através da fundação
426	Red Rock (2)	EUA	13	29	Sim	1968		Descarga através da fundação
427	Red Willows	EUA	13	38	Sim	1962	1963	Descarga através da fundação
428	Rocky Ford	EUA	0	21	Sim	1914	1915	Descarga através da fundação
429	Rocky Run	EUA	0	20	Sim	1971	1972	Descarga através da fundação
430	Samanalawewa	Sri Lanka	5		Não	1992	1992	Descarga através da fundação
431	San Antonio (B)	EUA	13	61	Sim	1965		Descarga através da fundação
432	Sidie Hollow	EUA	0	16	Sim	1965	1965	Descarga através da fundação
433	Sublette (B)	EUA	1	13	Não	1915	1915	Descarga através da fundação
434	Summer Lake	EUA	0	18	Sim	1925	1925	Descarga através da fundação
435	Tiyabenzi	Rodésia	13		Não	1973	1974	Descarga através da fundação
436	Twin Buttes	EUA	13		Não	1963		Descarga através da fundação
437	Upper Elk Creek N.22	EUA	1	19	Sim	1970	1971	Descarga através da fundação
438	Upper San Fernando (A)	EUA	11	25	Sim	1921	1922	Descarga através da fundação
439	Waroona	Austrália	13	42	Sim	1966	1966	Descarga através da fundação
440	Xavantes	Brasil	4	90	Sim	1970	1970	Descarga através da fundação
441	Zoccolo	Itália	7	66	Sim	1965	1966	Descarga através da fundação
442	Boleraz	Tchecoslováquia	13	9	Não	1966	1967	Permeabilidade no reservatório
443	Ira Price	EUA	13	12	Não	1965	1964	Permeabilidade no reservatório
444	Lone Pine	EUA	13	31	Sim	1936	1936	Permeabilidade no reservatório
445	May	Turquia	13	28	Sim	1960	1960	Permeabilidade no reservatório
446	San Ildefonso	México	13		Não	1942		Permeabilidade no reservatório

Nota: (1) Refere-se ao código de tipo de seção ao final da lista

<b>Tipo de seção da barragem</b>	<b>Código</b>
Terra homogênea	0
Terra com filtro	1
Terra com enrocamento de pé	2
Terra, zoneada	3
Terra, zoneada e enrocamento	4
Terra com núcleo central e enrocamento	5
Terra com face de concreto	6
Enrocamento com face de concreto	7
Terra com cortina espessa	8
Enrocamento com cortina espessa	9
Terra com núcleo impermeável	10
Aterro Hidráulico	11
Outro tipo de barragem	12
Tipo de seção não conhecido	13