

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO
APLICADAS EM PLANOS DE AÇÃO DE
EMERGÊNCIA DE BARRAGENS: *AUXÍLIO AO
PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO***

Luiz Filipe Venturi Vianna

Belo Horizonte

2015

Luiz Filipe Venturi Vianna

**METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO
APLICADAS EM PLANOS DE AÇÃO DE
EMERGÊNCIA DE BARRAGENS: AUXÍLIO AO
PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Terezinha de Jesus Espósito Barbosa

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2015

V617m

Vianna, Luiz Filipe Venturi.

Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens [manuscrito]: auxílio ao processo de tomada de decisão / Luiz Filipe Venturi Vianna. – 2015.

xxi, 118 f., enc.: il.

Orientadora: Terezinha de Jesus Espósito Barbosa.

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

Bibliografia: f.110-118.

1. Mecânica do solo - Teses. 2. Barragens e açudes - Segurança - Teses. 3. Avaliação de riscos ambientais - Teses. I. Espósito, Terezinha de Jesus. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624.13(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

**METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO APLICADAS EM PLANOS
DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA DE BARRAGENS: AUXÍLIO AO
PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO**

LUIZ FILIPE VENTURI VIANNA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 03 de setembro de 2015, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Terezinha de Jesus Espósito Barbosa - Orientador
UFMG

Prof. Gustavo Ferreira Simões
UFMG

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento
UFMG

Belo Horizonte, 03 de setembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, em especial aos meus pais, Walmo e Liliana, pelo apoio e motivação em todos os momentos.

À minha esposa Juliana, pelo companheirismo, dedicação e auxílio na formatação do trabalho. Te amo muito!

À professora Terezinha, pela paciência, ajuda, incentivo e disponibilidade. Seus ensinamentos ampliaram meu interesse pela geotecnia. Suas contribuições foram fundamentais para a elaboração deste trabalho.

À toda a equipe da MG/SB, em especial ao Alexandre e ao Diego, que contribuíram efetivamente para o desenvolvimento deste trabalho.

À equipe do Núcleo de Emergência Ambiental - NEA, pelo convívio e experiência compartilhada. Particularmente ao Antônio Carlos e Milton, que me incentivaram a ingressar no curso de Geotecnia.

À todos os professores do curso de Geotecnia da UFMG, pelos relevantes conhecimentos transmitidos. À Kátia, pela atenção. Aos colegas do curso, pelo companheirismo e assistência.

À todos os meus amigos, que mesmo distantes, estão sempre presentes.

Muito obrigado por tudo!

“Eu sempre me preparo para o fracasso e acabo surpreendido pelo sucesso.”

Steven Spielberg

RESUMO

Neste trabalho são aplicadas técnicas de análise de risco, especificamente a Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos (Failure Modes and Effects Analysis - FMEA) e Análises por Árvores de Eventos (Event Trees Analysis – ETA), visando contribuir para o processo de tomada de decisão dos Planos de Ação de Emergência – PAE's de barragens. O estudo de caso foi realizado na barragem da usina hidrelétrica de Irapé, considerando informações de projeto, dados de relatórios de instrumentação, relatórios de inspeção em campo e algumas informações da literatura. A metodologia FMEA foi aplicada para identificação dos aspectos mais críticos da barragem e priorização de estudos complementares. Com relação à aplicação de análises por árvores de eventos, foi considerada não a condição atual da estrutura, mas o comportamento mais provável esperado para o fenômeno (modo de falha) caso este venha a se concretizar, de acordo com as particularidades da estrutura. Foram realizadas também análises comparativas entre este comportamento previsto para o fenômeno e os resultados esperados após a aplicação de ações preventivas e corretivas no contexto do PAE. O resultado demonstrará que as técnicas de análise de risco podem favorecer o processo de tomada de decisão dos PAE's de barragens, melhorando o tempo de resposta e a confiabilidade das ações.

Palavras Chave: Análise de Risco, Gerenciamento de Risco, Plano de Ação de Emergência, Segurança de Barragens

ABSTRACT

This paper applied risk analysis techniques, specifically the Failure Modes and Effects Analysis - FMEA and Event Trees Analysis - ETA in order to contribute to the decision-making process of the Emergency Action Plan - EAP for dams. The case study was conducted at the Irapé dam, considering design information, instrumentation reporting data, field inspection reports and some literature information. The FMEA methodology was applied to identify the most critical aspects of the dam and prioritize additional studies. Regarding the application of analysis by event trees, it was not considered the current condition of the structure, but the most likely expected behavior for the phenomenon (failure mode) if it occur, according to the particularities of the structure. Also comparative analyzes were made between that expected behavior for the phenomenon and the results expected after the implementation of preventive and corrective actions in the EAP context. The result will demonstrate that the risk analysis techniques can facilitate the decision-making process of EAP's for dams, improving response time and the reliability of the actions.

Key Words: Risk Analysis, Risk Management, Emergency Action Plans, Dam Safety

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	2
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	3
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2	REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1	AS BARRAGENS	5
2.2	SEGURANÇA DE BARRAGENS E GERENCIAMENTO DE RISCOS.....	8
2.3	ALGUNS ACIDENTES ENVOLVENDO BARRAGENS.....	18
2.3.1	<i>Barragem de Orós – Ceará – 1960</i>	<i>19</i>
2.3.2	<i>Barragem de Vajont – Itália – 1963.....</i>	<i>20</i>
2.3.3	<i>Barragem Teton – Estados Unidos – 1976.....</i>	<i>21</i>
2.3.4	<i>Barragens de Euclides da Cunha e Limoeiro – Brasil – 1977</i>	<i>23</i>
2.3.5	<i>Barragem de rejeito da Rio Verde – Brasil – 2001</i>	<i>24</i>
2.3.6	<i>Barragem de rejeito da indústria de papel Rio Pomba-Cataguases – Brasil - 2003</i>	<i>25</i>
2.3.7	<i>Barragem de Camará – Brasil – 2004.....</i>	<i>27</i>
2.3.8	<i>Barragem de rejeito de Miraf – Brasil – 2007</i>	<i>29</i>
2.3.9	<i>Barragens de Algodões I – Brasil – 2009 (Portal de notícias 180 graus).....</i>	<i>29</i>
2.3.10	<i>Barragem de rejeito da Herculano Mineração – Brasil – 2014</i>	<i>31</i>
2.4	ANÁLISE DE RISCOS	32
2.4.1	<i>FMEA - Failure Mode and Effects Analysis (Análise dos modos de falhas e efeitos).....</i>	<i>33</i>
2.4.2	<i>ETA - Event Tree Analysis (Análise por árvore de eventos).....</i>	<i>38</i>
2.5	PLANOS DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA	40
2.6	PROJETO GT490/APQ-03314-11 - SISTEMA INTELIGENTE INTEGRADO COM TECNOLOGIA WEB E MÓVEL PARA GESTÃO DE EMERGÊNCIAS (CEMIG/FAPEMIG, 2013)	45
3	MATERIAL E MÉTODOS	51
3.1	LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES	51
3.2	IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA MAIS CRÍTICOS PARA A ESTRUTURA	51
3.3	ELABORAÇÃO DA ÁRVORE DE EVENTOS RELATIVA AO MODO DE FALHA MAIS CRÍTICO.....	52
3.4	ELABORAÇÃO DE ÁRVORES DE EVENTOS CONSIDERANDO INTERVENÇÕES PREVENTIVAS NO CONTEXTO DO PAE 53	
3.5	DEFINIÇÃO DO CASO ESTUDO – UHE IRAPÉ.....	54
3.6	DESCRIÇÃO GERAL DA UHE IRAPÉ.....	56
3.7	INSTRUMENTAÇÃO DA UHE IRAPÉ	72
3.7.1	<i>Análise de percolações e pressões totais.....</i>	<i>75</i>
3.7.2	<i>Análise das vazões.....</i>	<i>82</i>
3.7.3	<i>Análise de deslocamentos horizontais superficiais.....</i>	<i>83</i>
3.7.4	<i>Análise recalques.....</i>	<i>85</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
4.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO FMEA	89
4.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO ETA	96
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
	APÊNDICE A	I
A.1	TABELA ANÁLISE FMEA	I
A.2.1	ÁRVORE DE EVENTOS DO COMPORTAMENTO ESPERADO PARA O PIPING.....	XVII
A.2.2	ÁRVORE DE EVENTOS CONSIDERANDO A APLICAÇÃO DE FILTRO A JUSANTE	XVIII
A.2.3	ÁRVORE DE EVENTOS CONSIDERANDO A APLICAÇÃO DE MATERIAL VEDANTE A MONTANTE	XIX
A.2.4	ÁRVORE DE EVENTOS CONSIDERANDO O REBAIXAMENTO DO RESERVATÓRIO	XX
A.2.5	ÁRVORE DE EVENTOS CONSIDERANDO O REBAIXAMENTO DO RESERVATÓRIO E APLICAÇÃO DE FILTRO A JUSANTE	XXI

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Seção transversal da barragem de Sadd El Karafa. Fonte: Melo, 2014.....	5
Figura 2.2: Barragem Proserpina, do século II, na Espanha. Fonte: Balbi, 2008.....	6
Figura 2.3: Processo de formação de piping por erosão regressiva. Fonte: Perini, 2009.....	10
Figura 2.4: Processo de formação de piping por meio de alargamento das paredes das trincas. Fonte: Perini, 2009	10
Figura 2.5: Processo de formação de piping por meio de carreamento de finos. Fonte: Perini, 2009	11
Figura 2.6: Sequência erosiva devido ao galgamento para barragens de enrocamento com núcleo impermeável. Fonte: Perini, 2009	11
Figura 2.7: Estatística geral de modos de ruptura de grandes barragens de terra, até 1986. Fonte: Foster, Fell e Spannagle, 2000	12
Figura 2.8: Atividades fundamentais na gestão de riscos. Fonte: Pimenta, 2009.	13
Figura 2.9: Perspectivas de (a) uma sociedade orientada para a segurança e (b) uma sociedade orientada para o risco. Fonte: Adaptado de Rettemeier <i>et al.</i> , 2002.....	15
Figura 2.10: Relação entre risco e investimentos em projeto e construção. Fonte: VII Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Tema 31 - Segurança de Barragens Fonte: Fusaro, 2012	18
Figura 2.11: Rompimento da barragem de Orós. Fonte: Maestri, 2012.....	19
Figura 2.12: Vista parcial da cidade de Longarone antes e após o desastre. Fonte: CBDB, 2003	21
Figura 2.13: Parte de uma série de fotos da ruptura de Teton e foto do local após o desastre.	23
Figura 2.14: Barragem Euclides da Cunha - Situação do maciço após ruptura por galgamento (1977). 1 - Galeria do Cut off. Fonte: Cardia, 2007.	24
Figura 2.15: Vista aérea da Barragem da Mineração Rio Verde. Fonte: Precisão Consultoria, 2014.	25
Figura 2.16: Imagem aérea da barragem de Cataguases e do ribeirão do Cágado, após a ruptura. Fonte: Vianna, 2012.....	26
Figura 2.17: Contaminação da Bahia de Guanabara em decorrência do acidente. Fonte: Vianna, 2012.....	27
Figura 2.18: Aspecto da ruptura da fundação da barragem, vista de jusante. Fonte: Kanji, 2004.	28
Figura 2.19: Vista da área inundada em Mirai Fonte: Menescal, 2007.....	29

Figura 2.20: Rompimento da barragem de Algodões I. Fonte: Portal de notícias 180 Graus, 2009.....	31
Figura 2.21: Busca de vítimas após o rompimento da barragem da Herculano Mineração. Fonte: Jornal O Tempo, 2014.....	32
Figura 2.22: Matriz de risco para elementos críticos da barragem de Três Marias. Fonte: Melo, 2014.....	37
Figura 2.23: Características das Árvores de Eventos. Fonte: Ladeira, 2007, adaptado de Hartford e Baecher, 2004.....	39
Figura 2.24: Exemplo de Árvore de Eventos para o evento inicial de abalo sísmico. Fonte: Ladeira, 2007, adaptado de Hartford e Baecher, 2004.....	39
Figura 2.25: Mapa de zoneamento e plano de evacuação (Balbi, 2008).....	43
Figura 2.26: Visão geral do PAE de Barragens da CEMIG. Fonte: Relatório da Etapa 1 - Projeto GT490, 2013.....	46
Figura 2.27: Proposta inicial para o Sistema Integrado. Fonte: Relatório da Etapa 1 - Projeto GT490, 2013.....	47
Figura 2.28: Trecho de uma árvore de eventos. Fonte: Ladeira, 2007.....	48
Figura 2.29: Interface de comunicação do PAEWEB. Fonte: Relatório Etapa 4 - Projeto GT490, 2014.....	49
Figura 3.1: Resumo da metodologia.....	54
Figura 3.2: Vista geral da UHE Irapé. Fonte: Arquivo CEMIG GT.....	55
Figura 3.3: Localização da UHE Irapé. Fonte: Google Earth, 2014.....	56
Figura 3.4: Foto de um quadro instalado na UHE Irapé, com imagem da fase final de construção da barragem. Vista geral do maciço. Fonte: Autor, 2014.....	57
Figura 3.5: Barragem de Irapé concluída. Fonte: CEMIG, 2006.....	57
Figura 3.6: Arranjo geral da UHE de Irapé. Fonte: Arquivo CEMIG GT.....	58
Figura 3.7: Oxidação de testemunho de sondagem. Fonte: CEMIG, 2014.....	59
Figura 3.8: Formação de sulfato em testemunho de sondagem, com expansão da rocha. Fonte: CEMIG, 2014.....	60
Figura 3.9: Vista do corte da tomada d'água/vertedouro. Fonte: CEMIG, 2014.....	61
Figura 3.10: Aplicação de proteções impermeabilizantes em galeria de drenagem, para teste. Fonte: Autor, 2014.....	62
Figura 3.11: Seção transversal de maior altura da UHE de Irapé. Fonte: Lima, 2009.....	64
Figura 3.12: Detalhe da proteção contra chuvas no talude de jusante. Fonte: Lima, 2009.....	66

Figura 3.13: Rebaixamento instantâneo do reservatório – $\Phi=33^\circ$, com superfície circular. Fonte: CEMIG, 2004.....	70
Figura 3.14: Vista de jusante e montante das 3 torres da tomada d'água. Fonte: CEMIG, 2012	71
Figura 3.15: Emboque das estruturas vertentes e tomada d'água. Fonte: Lima, 2009	71
Figura 3.16: Perfil da UHE Irapé com a localização e legenda dos instrumentos. Fonte: CEMIG, 2011	74
3.17: Piezômetros e células de carga da Seção 1. Fonte: CEMIG, 2011.....	75
Figura 3.18: Piezômetros e células de carga da Seção 5. Fonte: CEMIG, 2011	75
Figura 3.19: Piezômetros e células de carga da Seção 2. Fonte: CEMIG, 2011	76
Figura 3.20: Piezômetros e células de carga da Seção 4. Fonte: CEMIG, 2011	77
Figura 3.21: Piezômetros da Seção 3. Fonte: CEMIG, 2011	79
Figura 3.22: Células de pressão total da Seção 3. Fonte: CEMIG, 2011	80
Figura 3.23: Localização dos medidores de vazão. Fonte: CEMIG, 2011	82
Figura 3.24: Deslocamentos horizontais no final de construção pelo modelo linear-elástico com incrementos. Fonte: Aires, 2006.....	84
Figura 3.25: Localização dos marcos superficiais e direção dos deslocamentos horizontais superficiais. Fonte: CEMIG, 2012.....	84
Figura 3.26: Vista de deslocamento em escada de acesso à instrumentação. CEMIG, 2014...	85
Figura 3.27: Recalques no final de construção pelo modelo linear-elástico com incrementos. Fonte: Aires, 2006	85
Figura 3.28: Medidores de recalque na seção 3. Fonte: CEMIG, 2011	87
Figura 4.1: Sistemas utilizados na FMEA de Irapé.....	89
Figura 4.2: Seção transversal de maior altura da UHE de Irapé. Fonte: Lima, 2009	90
Figura 4.3: Layout utilizado para a análise FMEA	92
Figura 4.4: Matriz de risco para os elementos mais significativos da barragem de Irapé.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Risco individual de morte estimado para diversas atividades	13
Tabela 2.2: Descrições de incertezas	36
Tabela 2.3: Severidade (S) avaliada sobre diferentes aspectos	36
Tabela 3.1: Descrições de incertezas	53
Tabela 3.2: Classificação final com base no risco	55
Tabela 3.3: Materiais constituintes da barragem de Irapé	65
Tabela 3.4: Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade	67
Tabela 3.5: Resumo dos coeficientes de Permeabilidade Adotados.	68
Tabela 3.6: Resumo dos Coeficientes Mínimos de Ruptura Encontrados para o talude de montante para o carregamento final de construção e rebaixamento rápido	69
Tabela 3.7: Instrumentos instalados na UHE Irapé.	72
Tabela 4.1: Materiais constituintes da barragem de Irapé	91
Tabela 4.2: Descrições de incertezas	92
Tabela 4.3: Descrições de incertezas	97
Tabela 4.4: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, com base no estudo de caso	99
Tabela 4.5: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, considerando o comportamento esperado para o piping após a aplicação de filtro a jusante.....	101
Tabela 4.6: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, considerando o comportamento esperado após a aplicação de material vedante no talude de montante	102
Tabela 4.7: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, considerando o comportamento esperado após o rebaixamento do reservatório.....	102
Tabela 4.8: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, considerando o comportamento esperado após o rebaixamento do reservatório associado à implantação de um filtro invertido no talude de jusante	103
Tabela 4.9: Tabela com os resultados obtidos	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AS/NZS	Australia Standards / New Zealand Standards
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	Concreto compactado a rolo
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEMIG GT	Cemig Geração e Transmissão S.A.
CMP	Cheia Máxima Provável
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COPAM	Conselho de Política Ambiental
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CSs	Caixas suecas
CW	Células de pressão total
DN	Deliberação Normativa
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EL	Elevação
EMGERPI	Empresa de Gestão de Recursos do Piauí
ETA	Análise por árvores de eventos
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FEMA	Federal Emergency Management Agency

FMEA	Análise dos modos de falha e seus efeitos
FMECA	Análise dos modos de falha, efeitos e criticalidade
FTA	Análise Árvore por Falhas
HSE	Health and Safety Executive
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICOLD	International Committee on Large Dams
ID	Inclinômetro
IDEPI	Instituto de Desenvolvimento do Piauí
LCI	Causa e Indicadores de Falhas
MG	Minas Gerais
MS	Marcos Superficiais
NA	Nível de Água
ONU	Organização das Nações Unidas
ORSEP	Organismo Regulador de Seguridade de Presas
PAE	Plano de Ação de Emergência
PC	Piezômetro Casagrande
PCZ	Ponto de carga zero
PE	Piezômetro Elétrico
PEAD	Polietileno de alta densidade
PVC	Policloreto de vinila
PW	Piezômetros elétricos
RM	Placa de recalque magnético

RW	Medidor de recalque elétrico (corda vibrante)
SGA/SCO	Sistema Georreferenciado de Apoio ao Sistema de Comando de Operações
UHE	Usina Hidroelétrica
UK	United Kingdom (Reino Unido)
UNIFAL	Universidade Federal de Alfenas
USA	United States of America (Estados Unidos da América)
USBR	United States Bureau of Reclamation
VV	Vertedouro de Vazão
ZAS	Zona de Autossalvamento

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Abertura da Malha
%	Por cento
”	Polegada
C	Consequência (adimensional)
c'	Intercepto de coesão efetiva (kPa)
cm	Centímetro
CRIT	Criticalidade (adimensional)
D	Índice de detecção (adimensional)
h	altura (m)
h	Hora
h	Horizontal (m)
hm ³	Hectômetro cúbico
i	Gradiente Hidráulico (adimensional)
K	Coefficiente de permeabilidade (cm/s)
k	Quilo
kg	Quilograma
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
kN	Quilonewton
l	Litro

M	Mega
m	Metro
m.c.a.	Metros de coluna de água
m ³	Metros cúbicos
mm	Milímetro
MW	Megawatt
MWh	Megawatt hora
N	Newton
NPR	Número Preliminar de Risco (adimensional)
°	Grau
O	Índice de ocorrência (adimensional)
P	Probabilidade (adimensional)
Pa	Pascal (N/m ²)
pH	Potencial hidrogeniônico (adimensional)
Pr	Probabilidade (adimensional)
Q	Vazão (m ³ /s)
RPN	Risk Priority Number (adimensional)
Ru	Coefficiente de poropressão (adimensional)
s	Segundo
S	Severidade (adimensional)
u	Poropressão (m.c.a.)
v	Vertical (m)

γ	Peso específico (kN/m ³)
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo (°)
ϕ	Diâmetro (")

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As barragens são estruturas que têm sido utilizadas por diversas civilizações há milhares de anos. Além da função de armazenamento de água para o abastecimento humano, irrigação e dessedentação de animais, as barragens também podem ser utilizadas para a geração de energia, controle de cheias, recreação, piscicultura, retenção de resíduos e navegação.

Apesar das barragens já serem aproveitadas em larga escala em todo o mundo, a construção destas estruturas tende a crescer frente a um cenário mundial, atual e futuro, de elevada demanda por água e energia. Atualmente 768 milhões de pessoas não têm acesso à água tratada, embora, segundo algumas estimativas, o número de pessoas cujo direito à água não está satisfeito pode ser tão alto quanto 3,5 bilhões. 2,5 bilhões não possuem condições sanitárias adequadas e 1,3 bilhão não têm acesso à eletricidade. Segundo as previsões, em 2030 a população global irá necessitar de 35% mais comida, 40% mais água e 50% mais energia (ONU, 2014). Deve-se considerar também uma perspectiva de mudanças climáticas, que, caso confirmada, pode aumentar a necessidade de construção de novas barragens.

As barragens exercem um importante papel social e econômico, mas também têm potencial para causar diversos impactos negativos, principalmente quando não são devidamente planejadas, projetadas, construídas, operadas ou mantidas. Além dos impactos inerentes à construção destes empreendimentos, deve-se considerar também o risco que estas estruturas impõem, principalmente para o vale de jusante, em decorrência da possibilidade de ruptura da barragem.

Estudos baseados em dados históricos, como o trabalho de Foster *et al.* (1998), que utiliza registros históricos para estimar a frequência de falhas em barragens de aterro, demonstram que a probabilidade de ruptura de uma barragem é relativamente baixa. As consequências destes eventos, porém, são normalmente catastróficas. Cabe ressaltar que o aumento do número de barragens, assim como o crescimento da população, tornam cada vez mais próximo o convívio da sociedade com estas estruturas.

Apesar dos avanços técnicos e legais que ocorreram no âmbito da gestão da segurança de barragens, a ocorrência de acidentes recentes, inclusive no Brasil, demonstra que tanto os empreendedores quanto o poder público precisam atuar de maneira mais efetiva nesta questão.

Segundo Pimenta (2009), a gestão de segurança de barragens apresenta, tradicionalmente, uma abordagem orientada para a segurança (centrada nas obras), porém é necessário evoluir para abordagens orientadas para o risco, buscando tratar as ações, desempenho e consequências de forma integrada.

Um dos pilares da gestão voltada para o risco é o Plano de Ação de Emergência - PAE. Partindo do princípio que a segurança absoluta não pode ser garantida e existe o risco de ruptura da barragem, o PAE visa estabelecer um conjunto de ações de resposta para atuação em situações críticas, a fim de evitar a ocorrência de acidentes ou minimizar suas consequências.

As ações de resposta durante situações críticas em barragens envolvem, normalmente, processos de tomada de decisão muito complexos, onde diversas variáveis devem ser consideradas em um curto espaço de tempo, sendo que decisões equivocadas podem levar, inclusive, à perda de vidas humanas.

A aplicação de técnicas de análise de risco pode contribuir com estes processos de tomada de decisão, por meio da realização de avaliações prévias dos diversos mecanismos de falha.

Estas simulações podem ser utilizadas como um indicativo da gravidade de cada cenário, favorecendo a emissão de sinais antecipados de alerta, com a respectiva remoção de pessoas das áreas de risco.

Podem ainda apresentar uma diretriz, por meio da realização de análises comparativas, para a escolha das melhores ações de resposta a serem adotadas para evitar o agravamento de uma situação crítica.

1.2 Justificativa e motivação

Dentro desta abordagem dos PAEs, esse trabalho visa contribuir para a gestão de situações emergenciais envolvendo barragens por meio da aplicação de ferramentas de análise de risco, tornando o processo de tomada de decisão mais rápido e confiável, favorecendo deste modo as condições de segurança do vale a jusante.

Pretende-se também colaborar para a implantação, nas barragens gerenciadas pela Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, do "Sistema Inteligente Integrado com Tecnologia Web e Móvel para Gestão de Emergências". Este Sistema visa, entre outras coisas, desenvolver um software que favoreça o processo de classificação do nível de perigo das

barragens em *normal*, *atenção*, *alerta* ou *emergência*, de acordo com o PAE. Um dos dados de entrada utilizados pelo software são árvores de eventos. Estas árvores servem tanto para indicar a probabilidade estimada de ocorrência de uma ruptura em determinado momento, quanto para situar os responsáveis em relação à evolução de um cenário adverso. Nesta perspectiva, esta dissertação procura estabelecer critérios para a identificação dos aspectos mais críticos de uma barragem, para os quais serão realizados estudos de Análises por Árvores de Eventos (*Event Tree Analysis* - ETA). Este projeto será descrito no item 2.6, para melhor compreensão.

1.3 Objetivos do trabalho

Aprimorar o processo de tomada de decisão durante situações emergenciais em barragens utilizando para isso ferramentas de auxílio como Análises de Risco, Análise dos modos de falha e seus efeitos – *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) e Análises por Árvores de Eventos – *Event Tree Analysis* (ETA).

Para alcançar o objetivo principal, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica em relação à gestão de segurança de barragens, tipologia das barragens e estruturas acessórias, prevenção de acidentes, análise de risco com ênfase em FMEA e ETA, modos de falha e planos de ação de emergência;
- Realizar uma FMEA para a identificação dos riscos mais significativos para a barragem da UHE Irapé, com base nas informações levantadas;
- A partir do risco mais crítico identificado para a barragem, elaborar uma ETA descrevendo a evolução do fenômeno físico que está associado ao respectivo modo de falha;
- Desenvolver ETA's simulando o comportamento esperado após a adoção de ações preventivas e corretivas do PAE, e como estas ações podem afetar o risco relacionado ao modo de falha descrito.

1.4 Estrutura da dissertação

Além deste capítulo introdutório, este trabalho está dividido em outros 4 capítulos. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, considerando aspectos sobre a gestão de segurança de barragens, acidentes históricos, técnicas de análise de risco e plano de ação de emergência. Aborda também o Projeto GT490/APQ-03314-11 (CEMIG/FAPEMIG, 2013).

No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa, assim como o estudo de caso abordado, com informações relacionadas à barragem da UHE Irapé.

Os resultados e discussões obtidos com a aplicação da metodologia são apresentados no capítulo 4. O capítulo 5 finaliza o trabalho, apresentando as considerações finais, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 As barragens

Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB, as barragens são definidas como obstáculos artificiais com a capacidade de reter água ou qualquer outro líquido, rejeitos, detritos, para fins de armazenamento ou controle. O termo barragem provém etimologicamente da palavra francesa *barrage*, do século XII, que deriva das palavras *barre*, do francês, e *barra*, do latim vulgar, que significam "travessa, tranca de fechar porta" (CBDB, 2014).

Estas estruturas têm servido muitas civilizações ao longo dos últimos 5 mil anos, como se pode perceber a partir de ruínas ou daquelas ainda em condições de funcionamento, de acordo com a Comissão Internacional de Grandes Barragens (International Committee on Large Dams - ICOLD). Reservatórios projetados para atender a demanda por água, especialmente onde a agricultura, que surgiu no período Neolítico, dependia de irrigação e controle de enchentes, estão entre as primeiras obras do homem. Indícios disso podem ser observados na história antiga ou mesmo na pré-história da China, da Mesopotâmia, da Pérsia, do Egito e da Índia, cujos livros sagrados ou lendas épicas explicitamente mencionam o papel dos reservatórios (ICOLD, 2008).

A barragem mais antiga do mundo é a de Jawa, na Jordânia. Trata-se de um aterro de solo e muros de alvenaria, com 5 m de altura e 80 m de comprimento, datado em torno de 3.000 AC. Outra estrutura que remete à mesma época é a barragem de Sadd el Karafa, localizada no Egito, de aproximadamente 2.650 AC (MELO, 2014). A Figura 2.1 apresenta a seção desta barragem.

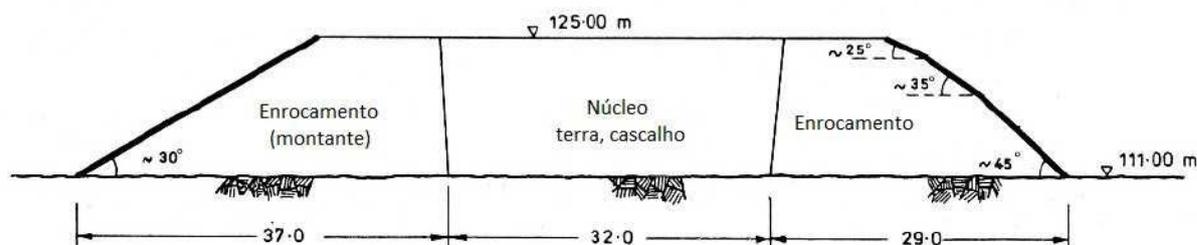


Figura 2.1: Seção transversal da barragem de Sadd El Karafa. Fonte: Melo, 2014

Os romanos construíram inúmeras represas durante o período que perdurou seu vasto império e algumas, como a barragem espanhola de Proserpina, do século II, permanecem em operação até hoje (BALBI, 2008).



Figura 2.2: Barragem Proserpina, do século II, na Espanha. Fonte: Balbi, 2008

Estas estruturas desempenham, atualmente, um papel relevante em relação ao ciclo hidrológico, que refere-se ao movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. No mundo, os recursos hídricos renováveis, que compõem o ciclo hidrológico, podem ser estimados em 40.000 km³ de água por ano. Este valor é aparentemente grande, porém, está distribuído no planeta de forma irregular tanto sazonal quanto geograficamente. Os recursos acessíveis naturalmente somam cerca de 9.000 km³ por ano, dos quais cerca de 3.500 km³ são regulados pelos reservatórios de grandes barragens. Atualmente, estima-se que existem cerca de 50.000 grandes barragens em operação no mundo (ICOLD, 2008).

Apesar dos diversos benefícios sociais e econômicos que podem ser proporcionados pela construção de barragens, estas estruturas também têm potencial para proporcionar impactos socioambientais negativos, o que impõe a necessidade de uma avaliação abrangente, imparcial e ponderada destes empreendimentos durante a análise de viabilidade, projeto, construção, operação e descomissionamento, visando mitigar os diversos conflitos relacionados ao assunto.

Conforme o Relatório Barragens e Desenvolvimento: um novo modelo para tomada de decisões, hoje quase metade dos rios do mundo tem pelo menos uma grande barragem construída em seu leito, o que obrigou o deslocamento compulsório de um número entre 40 e 80 milhões de pessoas. Ressalta ainda que os impactos sobre as populações não são, muitas vezes, adequadamente avaliados e, até mesmo, sequer considerados, constatando falta generalizada de compromisso e de capacidade de empreender ações efetivas de recomposição de suas atividades econômicas, além das perdas culturais de difícil resgate. Destaca, ainda, que aos grupos vulneráveis (pobres, comunidades tradicionais, povos indígenas e minorias étnicas) são impostos os maiores custos sociais e ambientais dos projetos, sem significar, contudo, benefícios econômicos diretos para essas populações (WORLD COMMISSION ON DAMS - WCD, 2000 citado por RIBEIRO, 2008).

Segundo Ribeiro (2008), o Relatório aponta, ainda, como efeitos negativos de muita expressividade, os impactos sobre os ecossistemas naturais e a biodiversidade, destacando: a destruição de florestas e habitats selvagens; o desaparecimento de espécies e a degradação das áreas de captação a montante devido à inundação da área do reservatório; a redução da biodiversidade aquática; a diminuição das áreas de desova a montante e a jusante; o declínio dos serviços ambientais prestados pelas planícies aluviais a jusante, brejos, ecossistemas de rios e estuários; e impactos cumulativos sobre a qualidade da água, inundações naturais e a composição das espécies quando várias barragens são implantadas em um mesmo rio. Revela, também, graus variados de desempenho/eficácia das barragens no tocante aos aspectos técnicos, financeiros e econômicos, apontando para uma realidade desfavorável em termos da relação custo/benefício esperada para um número considerável dos casos estudados, recomendando aperfeiçoamento na seleção de projetos e na sua execução.

Existe no Brasil, atualmente, uma tendência à construção de barragens com reservatórios menores como forma de reduzir estes impactos. Este assunto, porém, tem sido bastante debatido, principalmente em decorrência da restrição hídrica e energética que o país enfrenta no momento.

Hoje, como no passado, as barragens de terra continuam a ser o tipo mais comum, principalmente porque sua construção envolve o uso dos materiais naturais, localmente disponíveis, com o mínimo de processamento. Além do mais, os requisitos topográficos e de fundação para as barragens de terra são menos restritivas do que para os outros tipos de barragem. Seus solos possuem essencialmente granulometria fina com baixa permeabilidade e

o comportamento do aterro é condicionado principalmente pelas poropressões (MELO, 2014). *Bureau of Reclamation* (1987) sustenta que as barragens de terra, provavelmente, devem continuar a ser o tipo mais dominante, em parte porque o número de locais favoráveis para estruturas de concreto está decrescendo como resultado do extensivo desenvolvimento de armazenamento de água.

As primeiras barragens de terra brasileiras foram construídas no Nordeste, no início do Século XX, dentro do plano de obras de combate à seca, e foram projetadas tendo como base o empirismo. A barragem de Curema, erguida na Paraíba em 1938, contava com os novos conhecimentos da Mecânica dos Solos. Mas somente em 1947, com a barragem do Vigário, atual Barragem Terzaghi, localizada no estado do Rio de Janeiro, é que se inaugurou o uso da moderna técnica de projeto e construção de barragens de terra no Brasil. Foi também um marco, pois pela primeira vez Terzaghi empregou o filtro vertical ou chaminé como elemento de drenagem interna de barragens de terra (VARGAS, 1977).

Com relação às barragens de enrocamento, sua utilização teve origem na região da Califórnia em meados de 1850 (ICOLD, 2010a), sendo que sua construção foi ampliada acentuadamente somente a partir de 1960 (enrocamento com face de concreto e também barragens de terra-enrocamento). O material enrocamento tem como características principais a condição de livre drenagem e o elevado ângulo de atrito. As barragens de enrocamento são geralmente assentadas em fundações mais resistentes do que as de terra, pois elas necessitam ser compatíveis com a deformabilidade e resistência dos materiais utilizados na estrutura (MELO, 2014).

Cruz (1996) considera que as barragens devem atender basicamente a três princípios de projeto: do controle do fluxo, da estabilidade e da compatibilidade das deformações. Apesar da grande diversidade observada na configuração das seções transversais e nos materiais empregados, os projetos de barragens devem possuir, portanto, alguns elementos essenciais, como vedação, drenagem interna e estabilização.

2.2 Segurança de barragens e gerenciamento de riscos

Os primeiros construtores de barragens fizeram uso prático de aluvião que geralmente se encontrava disponível ao longo dos córregos. Por esse motivo, os primeiros aterros de barragens inspiraram pouca confiabilidade por milhares de anos. Até o século XX, grande parte do conhecimento aplicado no projeto de barragens era empírico. É fato que o

conhecimento na engenharia de barragens foi ampliado, em grande medida, aplicando as lições de projetos que falharam (MELO, 2014).

Os filtros a jusante do núcleo em barragens de aterro zonado, por exemplo, começaram por ser considerados como segundas linhas de defesa, no âmbito das técnicas para minimização da ocorrência da fratura hidráulica. Em meados dos anos 80, estes filtros passaram a ser designados por filtros críticos e considerados como primeiras linhas de defesa contra a fratura hidráulica. Este fato deveu-se à constatação de que a fratura hidráulica podia ocorrer em barragens projetadas de acordo com as regras da boa arte e, também, porque se demonstrou que o escoamento concentrado através de uma fenda no núcleo pode ser dominado por um filtro adequadamente dimensionado. Os filtros desempenham duas funções essenciais, a de retenção do material filtrado, impedindo a migração das suas partículas finas, e a de permeabilidade, recebendo o fluxo percolado através do material filtrado sem desenvolver pressões intersticiais em excesso (PIMENTA, 2009).

A princípio, toda barragem deveria ser planejada, projetada, construída e mantida adequadamente, mas a observação de acidentes recentes envolvendo barragens tem mostrado que esse objetivo não tem sido plenamente atendido. Os graves impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes das rupturas têm ensejado uma forte demanda da sociedade em saber seu nível de exposição ao risco perante essas estruturas (ICOLD, 2005).

Cabe ressaltar que as barragens são consideradas obras de engenharia de grande complexidade, sendo razoável aceitar, em determinados momentos, que o comportamento verificado em campo não ocorre exatamente como previsto no projeto.

Segundo Melo (2014), a identificação dos modos potenciais de falha (ruptura) de uma barragem de terra e enrocamento converge nas categorias gerais listadas por Lafitte (1993 citado por Hartford e Baecher, 2004):

- Falhas hidráulicas devido a níveis excepcionais: inclui, por exemplo, galgamento e subsequente erosão externa devido a vertedouro com capacidade de descarga insuficiente, ou até mesmo associado a danos em comportas ou erros de operação.
- Movimentos de massa devido a carregamentos excepcionais (excetuando as cheias incluídas no item anterior), propriedades inadequadas dos materiais, ou singularidades geológicas não detectadas: inclui, por exemplo, instabilidade de taludes (por equilíbrio limite), deformações que conduzem a galgamento, liquefação de solos, instabilidades de

fundação ou ombreiras, rebaixamento rápido associado a escorregamento do talude de montante e deslizamentos de encostas para o interior do reservatório que acarretem em galgamento.

- Erosão interna: inclui, entre outros, desenvolvimento de piping no núcleo da barragem e erosão de solos de fundação ou juntas (preenchimento de discontinuidades).

Os processos de piping foram descritos por Foster *et al.* (2000 citado por Perini, 2009):

1. Erosão regressiva, no qual a erosão se inicia no talude de jusante, no ponto de saída do fluxo percolado, e progride para montante, formando um tubo que se liga ao reservatório.

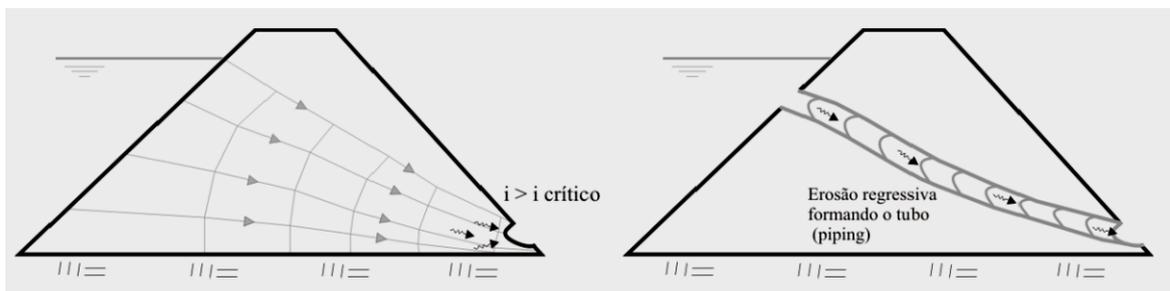


Figura 2.3: Processo de formação de piping por erosão regressiva. Fonte: Perini, 2009

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

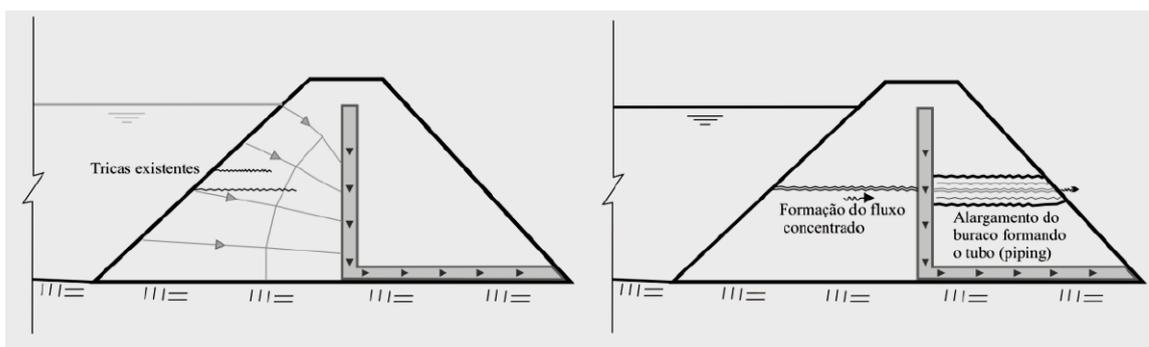


Figura 2.4: Processo de formação de piping por meio de alargamento das paredes das trincas. Fonte: Perini, 2009

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

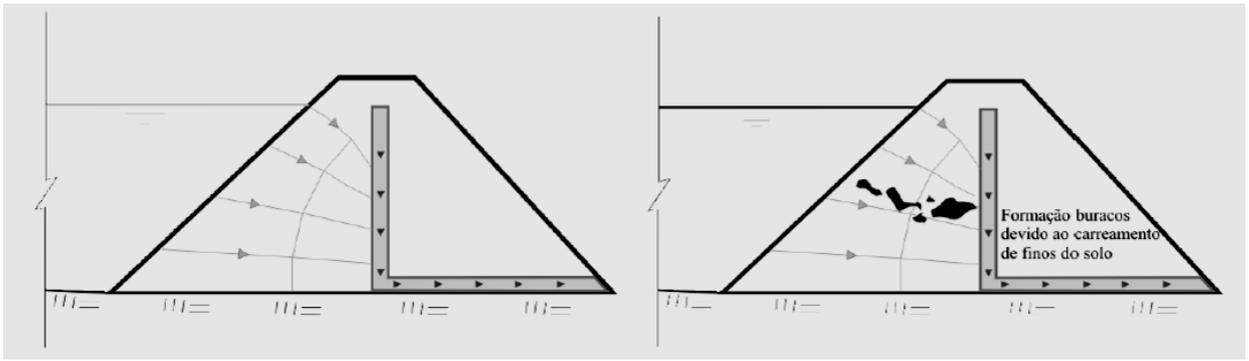


Figura 2.5: Processo de formação de piping por meio de carreamento de finos. Fonte: Perini, 2009

De acordo com Foster, Fell e Spannagle (2000), os acidentes em barragens causados por piping estão relacionadas com o zoneamento das seções e com a existência, ou não, de sistemas de controle de poropressões. Observou-se que a maior frequência de falhas e acidentes ocorreu em barragens homogêneas ou zoneadas sem um eficiente sistema de controle de poropressões, formado apenas por um filtro na fundação, ou por somente enrocamento de pé.

O trabalho de Perini apresenta também uma sequência erosiva devido ao galgamento para barragens de enrocamento com núcleo impermeável, de acordo com Powledge *et al.*, 1988.

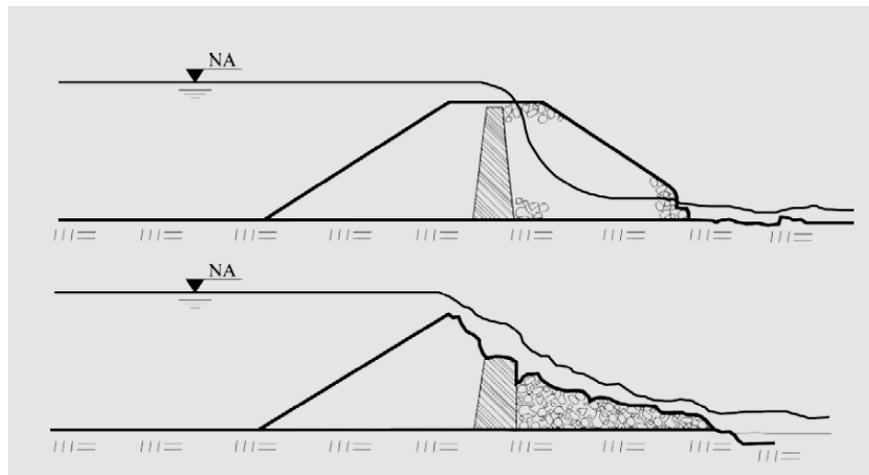


Figura 2.6: Sequência erosiva devido ao galgamento para barragens de enrocamento com núcleo impermeável. Fonte: Perini, 2009

Foster, Fell e Spannagle (2000) relatam que a média histórica anual de probabilidade de falha em grandes barragens de terra, com altura superior a 15m, é estimada em $4,5 \times 10^{-4}$ barragens por ano (136 barragens de aterro falharam em um universo de 300.400 barragens de aterro/ano, construídas após o ano de 1986).

A Figura 2.7 apresenta uma estatística dos modos de ruptura verificados neste trabalho de Foster *et al.* (2000), excluindo barragens construídas no Japão pré 1930 e na China.

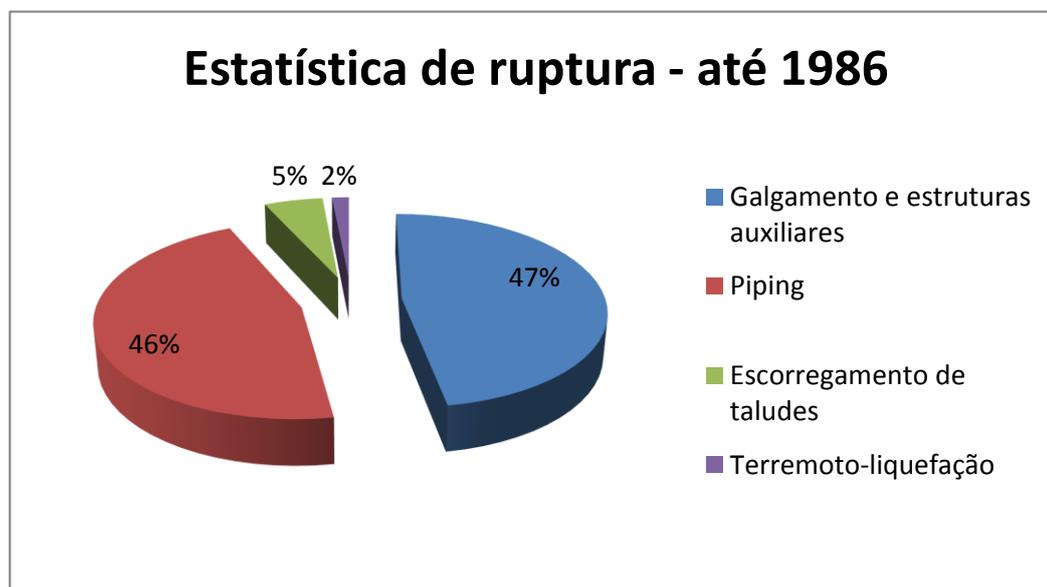


Figura 2.7: Estatística geral de modos de ruptura de grandes barragens de terra, até 1986.
Fonte: Foster, Fell e Spannagle, 2000

No caso de uma barragem nova, que adota critérios mais rigorosos baseados nas melhores práticas conhecidas atualmente, a probabilidade de falha é da ordem de 10^{-6} (VISEU T.; ALMEIDA A. B., 2011).

Estes valores de referência podem ser considerados baixos quando comparados a outras atividades, porém nem sempre a sociedade percebe o risco de forma verdadeira, sendo influenciada por fatores emocionais e psicológicos. Covello e Sandman (2001) afirmam que: "os riscos que matam as pessoas e os riscos que as alarmam são completamente distintos". Os acidentes com aviões comerciais, por exemplo, causam comoção nas pessoas devido à grande quantidade de vítimas causadas por evento e à incapacidade dos passageiros de tomarem qualquer tipo de ação de defesa. O número de vítimas fatais em acidentes aéreos no Brasil, contudo, é quase 2700 vezes menor do que o decorrente de acidentes de trânsito, considerando os dados de 2007 (ROSA, 2008).

O trabalho de Rosa (2008) apresenta uma tabela comparativa de riscos individuais para diversas atividades, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Risco individual de morte estimado para diversas atividades

Atividade	Risco Individual (ano ⁻¹)
Tomar Pílula (1)	2,0 x 10 ⁻⁵
Jogar futebol (1)	4,0 x 10 ⁻⁵
Dirigir automóvel (1)	1,7 x 10 ⁻⁶
Fumar (20 cigarros /dia) (1)	5,0 x 10 ⁻³
Meteoritos (2)	6,0 x 10 ⁻¹¹
Transporte de substâncias químicas (2)	2,0 x 10 ⁻⁶
Explosão de um vaso pressurizado (USA) (2)	5,0 x 10 ⁻⁶
Raio (UK) (2)	1,0 x 10 ⁻⁷
Enchentes por barragens (Holanda) (2)	1,0 x 10 ⁻⁷
Vazamento de uma Planta Nuclear a 1 km (UK) (2)	1,0 x 10 ⁻⁷
Leucemia (2)	8,0 x 10 ⁻⁵

1 - Risco voluntário 2 - Risco involuntário

Fonte: HSE, 1989

Apesar dos acidentes envolvendo grandes barragens não serem muito frequentes, suas consequências são normalmente catastróficas. Visando contornar este cenário, teve início o desenvolvimento do conceito atual de gestão de risco no âmbito da segurança de barragens. A Figura 2.8 apresenta um fluxograma deste processo segundo Pimenta (2009).

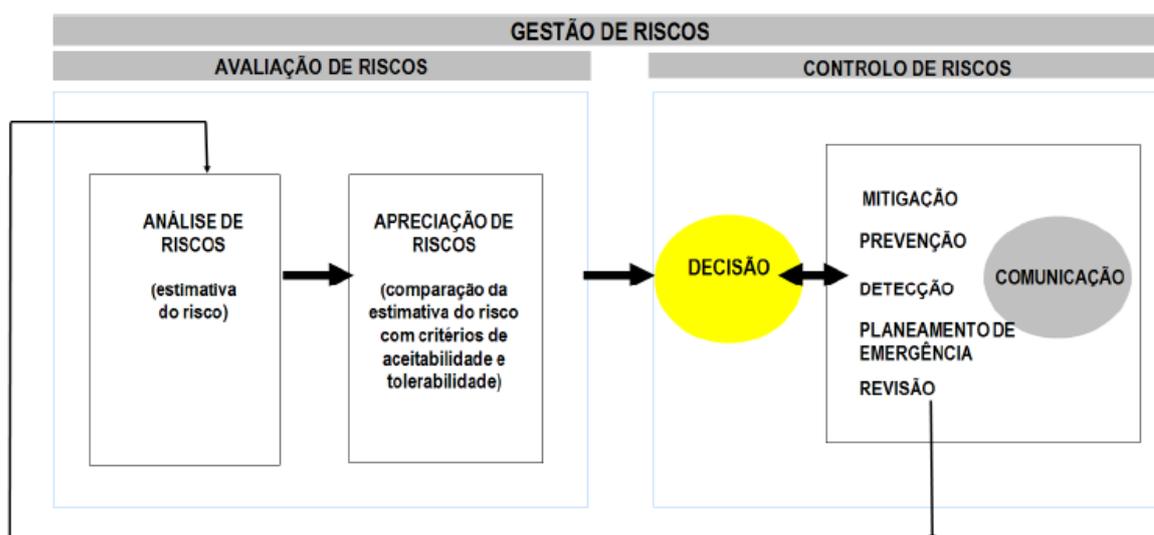


Figura 2.8: Atividades fundamentais na gestão de riscos. Fonte: Pimenta, 2009.

O Risco é usualmente definido como o produto da probabilidade de ocorrer um evento pela sua consequência.

A identificação dos modos de falhas é considerada uma etapa preliminar na avaliação de riscos, sendo de fundamental importância. Segundo Caldeira (2008), é importante que a identificação dos riscos seja realizada de forma exaustiva e sistemática. Para Foster, Fell e Spannagle (2000), a parte mais crítica de qualquer avaliação de riscos é a identificação completa dos cenários que resultam nas falhas.

Este conceito de gestão de riscos consiste em um conjunto de atividades integradas, tais como a avaliação de risco (análise de risco e apreciação de risco) e controle de risco (mitigação, prevenção, detecção, plano de ação de emergência - PAE, revisão e comunicação). Essa nova abordagem insere-se como uma melhoria da prática tradicional e não como um senso de substituição (MELO, 2014).

De acordo com Hartford e Baecher (2004), o processo de análise de risco geralmente envolve as etapas de definição de escopo e seleção do método de análise, definição e identificação das condições de perigo, estimativa da probabilidade de falha da barragem e consequência, estimativa do risco, documentação, verificação e atualização da análise.

Os métodos de análises de risco podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa. Os métodos de caráter qualitativo se apoiam em formas descritivas ou escalas de ordenação numérica para descrever as grandezas de probabilidade e consequência, enquanto que os quantitativos explicitam as incertezas, baseando-se, portanto, em valores numéricos da probabilidade e consequência (MELO, 2014). As análises qualitativas, que normalmente são menos complexas, podem ser utilizadas como uma avaliação preliminar visando estabelecer quais aspectos serão estudados com maior profundidade.

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

As abordagens orientadas para o risco têm, como grande virtude o tratamento integrado das ações, do desempenho e das consequências. Outro mérito assinalável destas abordagens é o de trazerem para a discussão, técnica e pública, as incertezas inerentes, designadamente, aos

processos de avaliação do desempenho e de identificação e quantificação de riscos (PIMENTA, 2009).

Por várias razões históricas e algumas técnicas, a segurança das barragens no mundo tem sido controlada por uma abordagem tradicional de engenharia baseada em normas de segurança (ICOLD, 2005).

Por outro lado, as sociedades estão evoluindo e as suas populações estão se tornando cada vez mais conscientes de que a segurança não é uma condição absoluta, mas sim uma situação tolerável, com baixos níveis de risco residual sempre presentes. A demanda da sociedade que os riscos sejam mantidos em revisão e propriamente controlados tem resultado na aplicação da avaliação de risco sobre um largo espectro de atividades públicas e privadas com potencial para afetar o bem estar e os interesses da comunidade (ICOLD, 2005).

Uma comparação entre essas abordagens pode ser verificada na Figura 2.9.

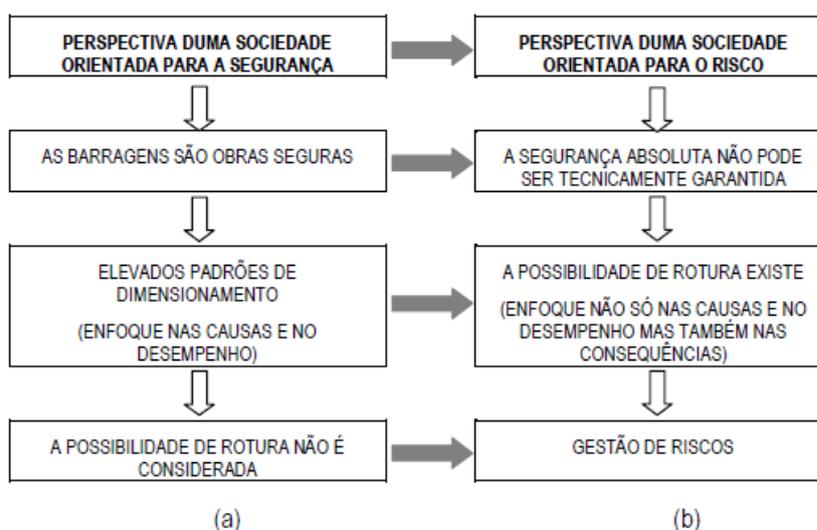


Figura 2.9: Perspectivas de (a) uma sociedade orientada para a segurança e (b) uma sociedade orientada para o risco. Fonte: Adaptado de Rettemeier *et al.*, 2002

Em 2010, a gestão de segurança de barragens no Brasil teve um avanço significativo com a publicação da Lei 12.334, que Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, com o objetivo, inclusive, de fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos (Brasil, 2010). Seus objetivos são:

I - garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências;

II - regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional;

III - promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;

IV - criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;

V - coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos;

VI - estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público;

VII - fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

Apesar de ainda ser recente e não ter sido plenamente regulamentada até a presente data, esta Lei representa um marco para o setor. Uma de suas principais funções é o estabelecimento das competências e obrigações dos empreendedores e órgãos fiscalizadores. Este fato é importante não somente por definir as respectivas responsabilidades, mas também por tornar compartilhado o gerenciamento da segurança de barragens.

De acordo com Hartford e Baecher (2004), o gerenciamento do risco societal e do risco comercial podem não estar sincronizados entre si, e a avaliação de riscos para segurança de barragens envolve frequentemente esta difícil questão de equalizar esta competição de interesses. O risco comercial envolve avaliações onde os beneficiários são os proprietários e acionistas, ou ainda os pagadores de impostos. O risco societal normalmente envolve avaliações de risco para o benefício da sociedade em geral. Contudo, podem existir situações onde o segmento da sociedade que é afetado diretamente pelos riscos assumidos não recebe nenhum tipo de benefício. Estas situações normalmente requerem considerações cuidadosas, o que reforça a importância da participação dos órgãos fiscalizadores e da população no processo de gestão da segurança de barragens.

O estímulo à participação social também é verificado na Lei 12.334, como verificado no Artigo 4º:

II - a população deve ser informada e estimulada a participar, direta ou indiretamente, das ações preventivas e emergenciais.

De acordo com a Lei, as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem. A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

Ressalta-se que o Brasil possui, atualmente, mais de 600 grandes barragens. Estima-se que existam no país cerca de 300.000 barragens de todos os tipos e tamanhos (MENESCAL *et al.*, 2005a).

Enfim, para o êxito de uma estrutura tão complexa quanto uma barragem, que envolve diversas incertezas, é necessária a elaboração de um bom projeto, que tenha uma relação custo/benefício aceitável quando avaliadas todas as variáveis envolvidas - sociais, ambientais e econômicas. Deve-se assegurar condições adequadas de construção, análise de comportamento e manutenção, sustentando a eficiência, as condições de segurança e mantendo o risco em um valor aceitável para a população exposta.

É importante também que todas essas etapas do gerenciamento de segurança de barragens sejam acompanhadas por equipes multidisciplinares compostas por profissionais devidamente habilitados e capacitados.

A Figura 2.10 apresenta uma relação genérica entre o risco de acidente imposto por uma barragem e os investimentos realizados nas fases de projeto e construção. Percebe-se que o risco diminui à medida que os gastos em projeto e construção aumentam, até um determinado ponto onde o valor do risco torna-se estável, independente dos investimentos. Este ponto pode ser considerado a condição ótima em relação aos gastos financeiros nas etapas de projeto e construção, sendo que o risco remanescente é controlado por meio da identificação de falhas (inspeções de campo / análise de instrumentação), adoção de medidas corretivas (manutenção / reforço da estrutura) e ações de resposta em situações críticas (Plano de Ação de Emergência - PAE).

Esta condição, porém, nem sempre é verificada na prática, sendo afetada por motivos como pressão para construção, pressão política ou contenção de recursos. Deste modo, eleva-se de maneira substancial o risco remanescente e os gastos necessários na operação e manutenção da estrutura. Nestes casos, cabe advertir que os elevados recursos necessários para as atividades de operação e manutenção nem sempre estarão disponíveis para esta atividade, podendo afetar a condição de segurança da barragem no futuro.

As atividades de gestão de riscos devem se constituir em um processo transparente de suporte a boas decisões para o benefício da sociedade em geral (Caldeira, 2008).

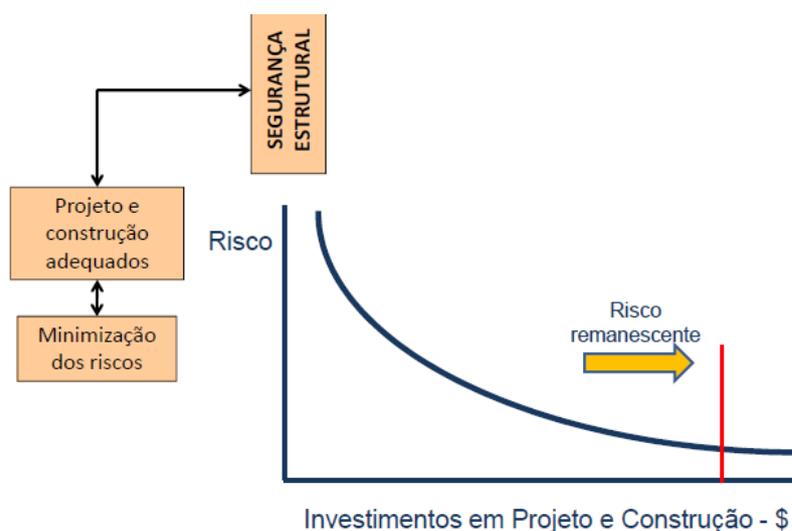


Figura 2.10: Relação entre risco e investimentos em projeto e construção. Fonte: VII Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Tema 31 - Segurança de Barragens
Fonte: Fusaro, 2012

2.3 Alguns acidentes envolvendo barragens

Este item apresenta alguns acidentes com rompimento de barragens, demonstrando que estes eventos devem ser considerados com critério, apesar de não serem muito frequentes.

Muitas vezes o gerenciamento de riscos em barragens não é priorizado pelos gestores da estrutura pelo fato destes assumirem que a probabilidade de ocorrência de acidentes é relativamente baixa. Estas estatísticas, porém, são normalmente baseadas em dados históricos da média de acidentes, e podem não representar a realidade de uma estrutura específica.

Outro aspecto importante relacionado aos acidentes é o seu potencial uso como forma de conscientização das pessoas envolvidas com a gestão de segurança de barragens, alertando que estes cenários podem ocorrer. Admitir a existência do risco e tratá-lo da maneira

adequada é uma ação fundamental para a implementação de uma cultura voltada para a prevenção. Além destes fatores, a investigação das rupturas do passado representam uma grande fonte de conhecimento para evitar novos acidentes.

Para se ter uma ideia da frequência destes eventos no Brasil, durante uma reunião técnica realizada na ANA (Agência Nacional de Águas) em 2009, horas antes da tragédia do Piauí, na barragem de Algodões, falou-se em 800 acidentes ou incidentes com barragens brasileiras nos últimos oito anos. Ou seja, em média, a cada três ou quatro dias, uma barragem apresenta problemas. A grande maioria sem divulgação na mídia nacional (SAYÃO, 2009).

Entre os acidentes apresentados neste item, destacam-se alguns mundiais de grande repercussão, como as barragens de Vajont e Teton, na Europa e Estados Unidos, respectivamente, e outras que ocorreram no Brasil. Todos os casos apresentados possuem uma importância histórica significativa. Alguns casos descrevem falhas de comunicação e de tomada de decisão, demonstrando as dificuldades relacionadas às ações durante situações emergenciais e a importância dos PAE's de barragens.

2.3.1 Barragem de Orós – Ceará – 1960

Um dos maiores acidentes envolvendo barragens no Brasil ocorreu em Orós, no Ceará, como mostra a Figura 2.11.



Figura 2.11: Rompimento da barragem de Orós. Fonte: Maestri, 2012

A barragem de Orós, no rio Jaguaribe, possui uma estrutura de terra semicircular com 54m de altura e 620m de comprimento. O volume do reservatório é de aproximadamente 4.000hm³.

Estava em construção quando foi galgada por uma cheia em 25 de março de 1960, resultante de chuvas de mais de 635mm precipitados em menos de uma semana.

Em 22 de março, com o aumento do nível d'água, tentou-se elevar o aterro com equipamento pesado, mas isso não foi suficiente e o galgamento era inevitável. Então, foi escavado um canal no aterro à direita, onde se esperava que a erosão fosse mais lenta que no centro. Peças metálicas foram lançadas no maciço, para tentar aumentar a resistência contra a passagem da água. Como consequência do galgamento de 30cm sobre a crista, no dia 26, uma brecha de 200m de comprimento por 35m de altura se formou, descarregando uma cheia cujo pico estimado chegou a $9.600\text{m}^3/\text{s}$. Cerca de 90% do reservatório foi esvaziado.

A evacuação de mais de 100.000 pessoas no vale do Jaguaribe foi iniciada no dia 22 de março por forças do exército. Após o galgamento da barragem, alertas foram transmitidos via rádio a todas as áreas em perigo. Panfletos foram distribuídos anunciando a catástrofe, já que muitas pessoas não queriam deixar seus lares. A cidade de Jaguaribe, 75km a jusante, foi atingida em aproximadamente 12 horas depois do início da ruptura. O número de vítimas atribuído a esse acidente varia significativamente, embora algumas fontes apresentem números da ordem de 1.000 mortos (JANSEN, 1980)).

Apesar das importantes medidas que foram adotadas para reduzir os impactos decorrentes do acidente, o número estimado de vítimas fatais demonstra a necessidade da realização de trabalhos adequados de comunicação de risco com a população.

2.3.2 Barragem de Vajont – Itália – 1963

A barragem de Vajont, uma estrutura de concreto com uma altura de 265m, espessura de 3,4m no topo e 22,7m na base, está associada a um dos maiores desastres envolvendo barragens já registrado, apesar de não ter ocorrido a sua ruptura. O acidente consistiu no galgamento da estrutura por uma onda enorme, provocada por um deslizamento de terra em seu reservatório, durante a noite de 9 de outubro de 1963 (JANSEN, 1980).

O volume do reservatório era de 150hm^3 , enquanto que o volume de material deslizado da margem esquerda da encosta foi de 240hm^3 . O movimento rápido desse material para dentro do reservatório atingiu velocidades da ordem de 30m/s produzindo uma onda que galgou a barragem com uma altura superior a 100m sobre a crista.

A inundação atingiu as vilas de Longarone, Pirago, Rivalta, Villanova, Faè e outras pequenas no território de Erto e Casso. Não houve alerta e cerca de 2.600 pessoas perderam a vida. Em Longarone, uma vila a menos de 2km de distância do local do acidente, mais de 1.260 pessoas perderam a vida, o que correspondia a 94% de seus habitantes segundo o USBR (1999).



Figura 2.12: Vista parcial da cidade de Longarone antes e após o desastre. Fonte: CBDB, 2003

2.3.3 Barragem Teton – Estados Unidos – 1976

A ruptura da barragem Teton é um acidente bastante documentado, servindo como referência para diversos estudos de melhoria das condições de segurança de outras estruturas. Conforme apresentado no texto a seguir, este evento pode trazer aprendizado relacionado aos aspectos construtivos, à instrumentação de barragens, à qualidade das inspeções visuais e plano de ação de emergência.

A barragem Teton, de propriedade do *Bureau of Reclamation* dos Estados Unidos, rompeu em 5 de junho de 1976, durante o seu primeiro enchimento, quando o reservatório estava quase cheio. A barragem, situada no rio Teton, no estado de Idaho, nos Estados Unidos, era de terra com altura de 123m e volume do reservatório de 356hm³. O enchimento foi iniciado em 3 de outubro de 1975 e continuou até o dia de sua ruptura em junho de 1976 (JANSEN, 1980).

Segundo Silveira (2014), nenhuma surgência ou outros sinais de aumento das infiltrações tinha sido observado a jusante da barragem antes do dia 03 de junho de 1976. Nesse dia, foram então observadas surgências com a saída de água limpa, aproximadamente 400 a 450m a jusante da barragem. Essas infiltrações ocorriam através de juntas na rocha da ombreira direita, com vazão estimada em 400 l/min. No dia seguinte (04/06/76) foi observada uma pequena surgência nessa mesma ombreira, cerca de 60m a jusante do pé da barragem, com vazão estimada em 80 l/min. Até essa data, não havia maiores preocupações com essas

surgências uma vez que a água apresentava-se limpa e o enchimento do reservatório estava em andamento.

No dia 05 de junho, logo após as 7:00 horas da manhã, foi observado fluxo de água turva escoando no talus da ombreira direita, com vazão estimada entre 600 e 800 l/s observando-se também um pequeno veio de água turva na ombreira direita. Essas infiltrações ocorriam na junção do aterro com a ombreira e ambas aumentaram consideravelmente nas três horas seguintes. Por volta das 10:30h uma grande infiltração, com cerca de 450 l/s, apareceu na face do aterro. Essa infiltração aumentou progressivamente de modo expressivo aparentando estar emergindo de um “túnel” com cerca de 2,0m de diâmetro, perpendicular ao eixo da barragem. Esse túnel logo se transformou em um poço de erosão, desenvolvendo-se talude acima e curvando-se em direção à ombreira direita.

Às 11:00h um vórtice apareceu no reservatório, nas proximidades da crista e, em seguida, às 11:30h, um pequeno *sinkhole* (sumidouro) apareceu do canal de erosão que se desenvolvia no talude de jusante, nas proximidades da crista. Às 11:55h a crista da barragem começou a romper-se, o que vem caracterizar a formação da brecha, localizada entre o vórtice e o canal de erosão a jusante.

Desde o instante em que os primeiros observadores chegaram ao local da barragem e constataram pela primeira vez as pequenas surgências com água turva, até o colapso da barragem, o tempo decorrido foi de aproximadamente 5,0 horas. Julga-se que, entre o aparecimento das primeiras manifestações superficiais da erosão interna, e o colapso da barragem, o tempo decorrido não passou de 15 horas.

Este acidente implicou nas mortes de 14 pessoas e em danos materiais avaliados entre 400 milhões e 1 bilhão de dólares.

Com relação à instrumentação da barragem Teton, cabe observar que, apesar de sua grande altura e utilização de silte de origem eólica como aterro compactado na construção do corpo da barragem, material este altamente susceptível ao piping, não foi incorporado qualquer tipo de instrumentação, a não ser alguns marcos de deslocamento superficial. Mesmo na fundação da barragem, não havia qualquer tipo de instrumentação.

A junta de nove consultores que analisaram as causas do acidente de Teton destacaram, entre outras coisas, que os vigilantes responsáveis pelas observações visuais deveriam estar munidos com um manual de instruções de operação, para orientá-los em suas inspeções de

rotina. Essas pessoas deveriam ter sido treinadas para interpretar condições potencialmente adversas, objetivando relatar prontamente qualquer condição anômala (SILVEIRA, 2014).

Apesar da rápida evolução do acidente, os indícios de mal comportamento observados nos dias 03 e 04/06/1976 poderiam ser suficientes para o estabelecimento de um nível de atenção ou alerta relacionado à segurança da barragem, favorecendo um processo de remoção das pessoas localizadas em áreas de risco.

A Figura 2.13 apresenta uma sequencia de fotos do processo de ruptura da barragem Teton.

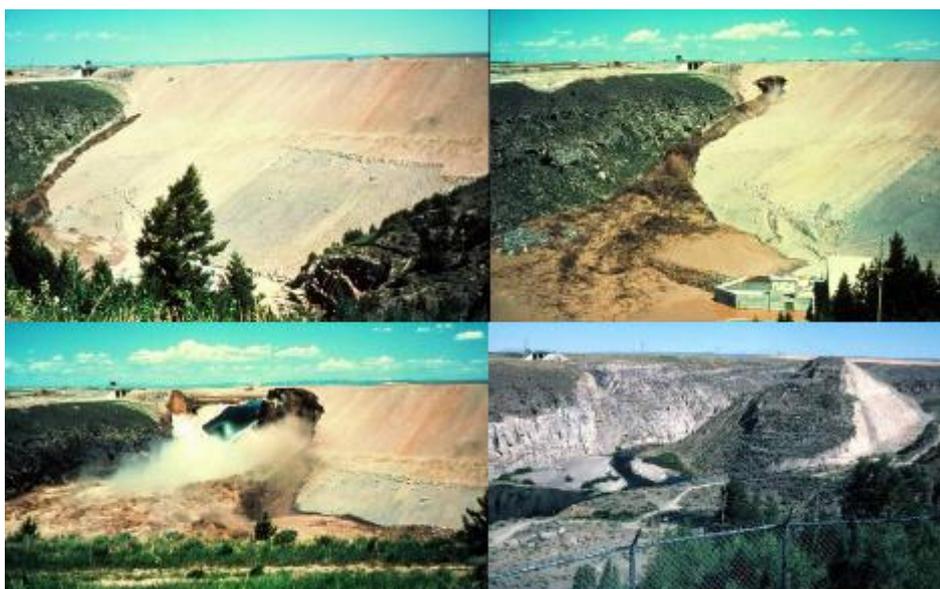


Figura 2.13: Parte de uma série de fotos da ruptura de Teton e foto do local após o desastre (SYLVESTER, 2007)

2.3.4 Barragens de Euclides da Cunha e Limoeiro – Brasil – 1977

Este acidente ocorrido na barragem de Euclides da Cunha chama a atenção para os fenômenos de ruptura em cascata, demonstrando que as avaliações de risco devem contemplar todas os barramentos inseridos na respectiva bacia hidrográfica. Reforça também a importância de manter os sistemas de comunicação em pleno funcionamento, além da necessidade de realizar testes regulares nas estruturas extravasoras.

Segundo Balbi (2008), as duas barragens de terra, Euclides da Cunha e Limoeiro, no rio Pardo, estado de São Paulo, romperam por galgamento no dia 19 de janeiro de 1977. As fortes chuvas que se precipitavam sobre a bacia de drenagem da barragem de Euclides da Cunha geraram uma cheia próxima à de projeto. Um problema de falha de comunicação entre o funcionário local dessa barragem e o centro de operação responsável pela abertura das

comportas, associado ao mau funcionamento dos extravasores no momento de abri-los, permitiu o galgamento da crista da barragem.

Uma lâmina de 1,2m passou por cima da barragem durante um período de 4 horas. A brecha começou na ombreira direita provocando a sua ruptura e, na sequência da cascata, a ruptura da barragem de Limoeiro (SINGH, 1996 citado por BRASIL, 2005).

O acidente causou apenas danos materiais, sem registro de perdas de vidas humanas, mas estimou-se que foram atingidas cerca de 4.000 casas.



Figura 2.14: Barragem Euclides da Cunha - Situação do maciço após ruptura por galgamento (1977). 1 - Galeria do Cut off. Fonte: Cardia, 2007.

2.3.5 Barragem de rejeito da Rio Verde – Brasil – 2001

Segundo Brasil (2005), a barragem de rejeitos da mineração Rio Verde localiza-se no distrito de São Sebastião das Águas Claras, município de Nova Lima, região metropolitana de Belo Horizonte. No dia 22 de junho de 2001 o talude da barragem rompeu, formando uma onda de cheia que se estendeu por mais de 6 km a jusante, matando 5 trabalhadores da mineração.

A vegetação a jusante foi coberta por vários metros de lama. Postes da rede elétrica foram atingidos e uma adutora de água da COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais) rompeu. Além disso, a estrada que liga a BR-040 ao município de São Sebastião das Águas Claras foi interditada após o acidente, devido à lama e rejeitos de minério que se acumularam no local. A Figura 2.15 mostra uma vista aérea do local após o rompimento.



Figura 2.15: Vista aérea da Barragem da Mineração Rio Verde. Fonte: Precisão Consultoria, 2014.

Este acidente levou a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) a desenvolver um Programa de Segurança de Barragens para o Estado de Minas Gerais, iniciado em 2002, visando reduzir o risco de danos ambientais em decorrência de acidentes nestas estruturas.

Segundo Espósito e Duarte (2010), teve início um levantamento do número e do tipo de barragens existentes nas indústrias e nas minerações do Estado. Esse trabalho vem sendo realizado, tendo em vista o cadastramento e a classificação das barragens, seguindo parâmetros da Deliberação Normativa DN 62 (COPAM, 2002), que foi alterada pela DN 87 (COPAM, 2005) e pela DN 113 (COPAM, 2007). A classificação indicada, nessas deliberações, estabelece classes de potencial de dano ambiental (I, II e III), estimando as consequências em relação ao dano ambiental, em caso de uma ruptura. De acordo com essa classificação, devem ocorrer auditorias técnicas periódicas em prazos de um, dois ou três anos, para as barragens classificadas como III, II e I, respectivamente. Essas auditorias são realizadas por consultor externo ao quadro de funcionários da empresa. Os relatórios dessas auditorias têm como objetivos conhecer as condições físicas e estruturais das barragens e atestar se as mesmas apresentam condições de estabilidade. Caso não apresentem, o relatório deve conter um plano de ações, com prazo para implantação de melhorias, a fim de corrigir as falhas e garantir a estabilidade das estruturas.

2.3.6 Barragem de rejeito da indústria de papel Rio Pomba-Cataguases – Brasil - 2003

O acidente ocorrido em 2001 com a barragem de rejeitos da mineração Rio Verde, e principalmente o acidente ocorrido em Cataguases/MG, em 2003, têm uma grande importância histórica para a gestão de segurança de barragens no Brasil, sendo o ponto de

partida de discussões que levaram à proposição do Projeto de Lei 1.181, no dia 03 de junho de 2003, e posteriormente, à publicação da Lei 12.334, no dia 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2003).

A barragem da Cataguases, localizada no município de Cataguases (MG), rompeu no dia 29 de março de 2003. A ruptura despejou no ribeirão do Cágado cerca de 400 milhões de litros de lixívia negra (resíduo gerado no processo de beneficiamento do papel), segundo informações da própria empresa (FLORESTAL CATAGUAZES, 2014).

A lixívia, que possui uma carga orgânica muito elevada, além de pH alto, contaminou o rio Pomba e o rio Paraíba do Sul. Segundo Huamany (2003), o fornecimento de água foi interrompido em oito municípios dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, fazendo com que mais de 500 mil pessoas ficassem sem água por quase duas semanas. Apesar dos significativos impactos ambientais e sociais, não houve vítimas fatais decorrentes deste acidente.

Os prejuízos materiais e ambientais foram enormes, provavelmente muito além dos R\$50 milhões da multa aplicada pelo IBAMA à empresa Cataguases (BRASIL, 2003).

Entre as causas que levaram ao rompimento da estrutura estão falhas ou ausência de manutenção, além da inexistência de um responsável técnico pela estrutura.

A Figura 2.16 mostra a barragem rompida e um trecho afetado do ribeirão do Cágado, enquanto a Figura 2.17 mostra a mancha de contaminação formada na Bahia de Guanabara.



Figura 2.16: Imagem aérea da barragem de Cataguases e do ribeirão do Cágado, após a ruptura. Fonte: Vianna, 2012.



Figura 2.17: Contaminação da Bahia de Guanabara em decorrência do acidente. Fonte: Vianna, 2012.

2.3.7 Barragem de Camará – Brasil – 2004

O acidente ocorrido na barragem de Camará é um dos mais graves relacionado ao setor elétrico brasileiro.

Normalmente considera-se que as barragens de usinas hidrelétricas apresentam condições de segurança melhores que as barragens construídas para outras atividades, em decorrência de fatores como a durabilidade esperada para a obra, ao porte dos reservatórios, uso significativo de equipamentos de instrumentação, realização de campanhas de inspeção e manutenção, entre outros, o que pode ser justificado pelo fato da barragem ser um ativo de importância fundamental para o negócio dos empreendedores.

Apesar destas constatações, o acidente ocorrido em Camará, assim como o de Euclides da Cunha, demonstram que estes eventos também têm afetado o setor de geração de energia.

A barragem de Camará foi construída entre os anos de 2000 e 2002, em concreto compactado com rolo, com altura de 50 metros e comprimento da crista de 296 metros. O seu reservatório tinha capacidade de 26,5 hm³. Localizava-se na Paraíba, a cerca de 150 quilômetros da capital João Pessoa (BALBI, 2008).

No dia 17 de junho de 2004, a barragem apresentou problemas na rocha de fundação da ombreira esquerda, abrindo um orifício que propiciou o esvaziamento do seu reservatório. Onze dias depois, a parte remanescente sobre o orifício também ruiu. A Figura 3.15 indica o local da abertura no corpo da barragem. No momento da ruptura, o reservatório liberou para jusante cerca de 17 hm³ (MENESCAL *et al.*, 2005a). Kanji (2004) afirma que a causa fundamental para a ruptura da barragem foi uma falha geológica existente na ombreira que

não foi devidamente tratada durante a construção. A Figura 2.18 apresenta aspectos da ruptura da fundação.

A onda de cheia gerada provocou 6 mortes, mais de 3.000 desabrigados e destruiu centenas de casas nas cidades de Mulungu e Alagoa Grande. O centro urbano de Alagoa Grande ficou isolado, sem energia e sem comunicação. As pontes sobre mananciais que cercam a cidade e a ligam com cidades maiores foram completamente danificadas, impedindo que a população local recebesse o primeiro atendimento de socorro por parte dos órgãos de emergência. Não havia sido constituída uma Defesa Civil municipal até então, e as ações oficiais de evacuação falharam. “A ausência de medidas preventivas foi tão prejudicial como a demora e insuficiência das ações públicas de reabilitação e reconstrução nos municípios afetados, prevalecendo as formas de ação altruístas, as solidariedades extrafamiliares” (VALENCIO, 2006, citado por BALBI, 2008).

Segundo Balbi (2008), o relatório apresentado pela Universidade Federal da Paraíba aos Ministérios Públicos Federal e Estadual (BARBOSA *et al.*, 2004) concluiu que “a Barragem de Camará não foi construída segundo os bons princípios da engenharia, tão pouco foi considerada após sua entrega como uma obra importante que deveria ser acompanhada no seu primeiro enchimento”. Segundo o relatório, embora a barragem tenha sido entregue em 2002, o seu primeiro enchimento só foi concluído com as chuvas de janeiro de 2004, quando “o doente começou a dar sinais mais fortes de sua doença, e o proprietário não foi ágil o suficiente para bloquear a propagação do mal” (BARBOSA *et al.*, 2004). O documento ainda mostra que teria sido possível baixar o nível do lago para a cota de segurança, se decisões houvessem sido tomadas neste sentido, com uma certa antecedência em relação ao dia da tragédia.



Figura 2.18: Aspecto da ruptura da fundação da barragem, vista de jusante. Fonte: Kanji, 2004.

2.3.8 Barragem de rejeito de Mirai – Brasil – 2007

O rompimento por galgamento da barragem São Francisco, de propriedade da Mineração Rio Pomba, que ocorreu às 3:30 horas do dia 10 de janeiro de 2007, na cidade de Mirai, no estado de Minas Gerais, despejando mais de 2 hm³ de rejeito do processo de beneficiamento da bauxita no rio Fubá, demonstra a importância da emissão de um alerta antecipado para a preservação de vidas no vale a jusante.

A descarga de rejeito atingiu mais de 300 residências, porém não houve vítimas fatais. As autoridades municipais atuaram alertando a população com o auxílio de viaturas com sirene. A prefeitura disponibilizou ônibus para auxiliar na evacuação, que foi iniciada pelo bairro que seria atingido primeiro. No total, 765 moradores ficaram desalojados em Mirai. Este rejeito, que era composto principalmente por água e argila e não era tóxico, afetou o abastecimento de água de inúmeras cidades a jusante (ESTADO DE MINAS, 11/01/2007).

A Figura 2.19 apresenta uma vista aérea da área inundada em Mirai.



Figura 2.19: Vista da área inundada em Mirai Fonte: Menescal, 2007.

2.3.9 Barragens de Algodões I – Brasil – 2009 (Portal de notícias 180 graus)

O rompimento da barragem de Algodões, que ocasionou 9 mortes, demonstra como pode ser delicado o processo de tomada de decisão durante situações críticas, reforçando a importância e a responsabilidade das ações relacionada aos PAE's de barragens. As informações deste acidente foram retiradas de matéria publicada no dia 15/06/2009, pelo Portal de Notícias 180 graus.

A barragem de Algodões I, localizada em Cocal, no Piauí, foi projetada em 1994 e executada a partir de 1995 pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) e COMDEPI, hoje IDEPI (Instituto de Desenvolvimento do Piauí). A obra custou R\$ 51 milhões e teve como propósito fazer o barramento das águas do rio Piranji, na altura do município de Cocal, visando a perenização do rio, controle de cheias, abastecimento humano, irrigação de áreas agricultáveis, o estímulo à criação de peixes e utilização para turismo e lazer. A barragem foi inaugurada em 2001.

Moradores próximos à Barragem Algodões I sempre temeram o rompimento, que eles chamam de "estouro". A EMGERPI (Empresa de Gestão de Recursos do Piauí) admitiu que há pelo menos um ano a barragem Algodões I apresentava fissuras e recebia reforço com injeção de cimento para conter o vazamento d'água pelas paredes da barragem.

A situação levou o governo do Piauí a contratar, uma empresa de consultoria para avaliar a obra. A empresa entregou no dia 19 de abril um pré-projeto à EMGERPI, sugerindo a reconstrução inteira do maciço de terra, com adição de argila.

Mesmo diante da avaliação da empresa de consultoria e do volume de chuva que caía na região, obras de emergência continuaram a ser feitas para sustentação. A última delas, segundo a presidente da EMGERPI, foi feita no começo de maio, com o reforço do dique a 6 metros de profundidade e o início de construção de uma nova estrada de acesso, que serve também para amparar a estrutura. Cerca de 20 dias antes do rompimento, a empresa de consultoria sugeriu ainda retirar os moradores da área e quebrar 2 metros do sangradouro da barragem, para liberar o excesso de água, o que não foi feito. Um outro engenheiro, consultor do Governo do Estado do Piauí, garantiu que a barragem não iria romper. Apenas a rampa cairia, mas as paredes da barragem, de 40 metros de altura, não.

No dia 14 de maio de 2009, surgiu a primeira possibilidade real de rompimento da barragem. Mandaram retirar as famílias, colocadas em escolas e improvisadas nas casas de parentes e amigos dentro da zona urbana de Cocal. A ordem era para deixarem as localidades rurais próximas às águas da barragem. No entanto, no dia 25 de maio, uma reunião definiu a volta das famílias. Diz o documento que saiu desta reunião, que é 'Ata de reunião da comissão mista da operação de socorro na cidade de Cocal': "Feita a abertura dos trabalhos da comissão pela presidente da EMGERPI, a mesma apresentou o engenheiro consultor do Governo do Estado do Piauí, que relatou que não existe em hipótese alguma a possibilidade de

rompimento da barragem. As populações já podem retornar para as suas residências”. Prontamente, as famílias atenderam à determinação.

Em 27 de maio de 2009 ocorreu o rompimento da barragem de Algodões, que arrastou casas, animais e moradores. Oficialmente, nove pessoas morreram. Em menos de uma hora, quase 50 bilhões de litros d'água desapareceram do reservatório. Plantações inteiras foram destruídas e casas foram arrastadas pela água, cuja onda chegou a cerca de 10 metros de altura com velocidade de 80 km/h. Pelo menos 3 mil pessoas ficaram desalojadas ou desabrigadas, segundo balanço da Defesa Civil.



Figura 2.20: Rompimento da barragem de Algodões I. Fonte: Portal de notícias 180 Graus, 2009.

2.3.10 Barragem de rejeito da Herculano Mineração – Brasil – 2014

O recente acidente que ocorreu em Itabirito/MG, no dia 10/09/2014, com o rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro da Herculano Mineração, causou a morte de três funcionários da empresa além de grandes impactos ambientais.

Este fato demonstra que, apesar dos avanços que ocorreram em relação à legislação de segurança de barragens no Brasil, ainda existem muitos desafios a serem vencidos neste setor.

A Figura 2.21 ilustra o momento em que militares do Corpo de Bombeiros realizam a busca das vítimas deste acidente.



Figura 2.21: Busca de vítimas após o rompimento da barragem da Herculano Mineração.
Fonte: Jornal O Tempo, 2014

2.4 Análise de riscos

A análise de riscos consiste basicamente no uso sistemático de informações disponíveis para determinar a frequência que eventos específicos podem ocorrer e a magnitude de suas consequências. A quantificação do risco é considerada uma das etapas mais complexas do processo de gerenciamento de riscos, já que pode envolver uma grande quantidade de variáveis de acordo com o grau de precisão desejado, além de incertezas.

Segundo Melo (2014), tanto as análises qualitativas quanto as quantitativas, de aplicações recentes em barragens, apresentam limitações importantes. Enquanto as qualitativas tendem a ser subjetivas, as quantitativas ainda apresentam-se de aplicação restrita na área de barragens em virtude da dificuldade na caracterização analítica das incertezas envolvidas no processo. Pardo (2009) enfatiza que, na engenharia geotécnica, nenhuma das duas abordagens pode ser considerada totalmente adequada, pois não conseguem modelar a realidade por completo.

De acordo com Hartford e Baecher (2004), o processo de análise de risco geralmente envolve as seguintes atividades:

- Definição de escopo;
- Identificação e definição de carregamentos e perigos;
- Análises probabilísticas dos riscos e carregamentos;
- Identificação dos modos de falha;

- Resposta da barragem e análise da probabilidade de falha;
- Estimativa das consequências correspondentes a cada evento de falha;
- Estimativa do risco;
- Análises de incertezas e sensibilidade;
- Documentação;
- Análise de especialistas e/ou verificação (se possível);
- Atualização da análise (se necessário).

Existem diversas metodologias de Análise de Risco descritas na literatura, tais como:

- Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA);
- Análise por Árvore de Eventos (ETA);
- Análise Árvore por Falhas (FTA);
- Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI);
- Índices de Risco;
- Estudos de Perigo e Operabilidade (HAZOP);
- Simulação de Monte Carlo, entre outras.

As metodologias FMEA e ETA, que serão utilizadas no decorrer deste trabalho, são descritas a seguir.

2.4.1 FMEA - *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise dos modos de falhas e efeitos)

A análise dos modos de falhas e efeitos - FMEA é uma forma de análise de confiabilidade que é usada para o mapeamento das consequências de eventos específicos que podem ocorrer durante a operação de um sistema de engenharia, e para identificar e priorizar as ações necessárias (HARTFORD e BAECHER, 2004).

Segundo Petronilho (2010), a análise FMEA é considerada uma das primeiras técnicas sistemáticas para a análise de falhas. O método teve sua origem em 1949, na norma *Military Standard Mil-STD-1629 – Procedures for performing a Failure mode, Effect and Criticality Analyses*, desenvolvida pelo exército norte-americano.

Fora do âmbito militar, as aplicações mais antigas remontam aos anos 60, na indústria aeronáutica (INERIS, 2003). Atualmente tem sido utilizada em diversos setores como as indústrias química, petrolífera, nuclear e automobilística e contam já com algumas aplicações práticas no domínio das barragens.

A técnica foi desenvolvida originalmente para projetos, mas encontrou aplicações na análise do potencial de falha de sistemas existentes. Seu uso não fica restrito a sistemas de engenharia e já vem sendo aplicado em diversas áreas de atividades sociais, sendo a saúde um exemplo (HARTFORD e BAECHEER, 2004).

A FMEA é um método de apoio a análises de risco qualitativas, extensível a análises semiquantitativas com a incorporação da criticalidade, por intermédio de escalas de probabilidade de ocorrência das falhas e de severidade dos efeitos. As análises semiquantitativas são geralmente denominadas FMECA (Análise dos modos de falha, efeitos e criticalidade). Trata-se de uma avaliação indutiva e descritiva que promove, sem recorrer a formulações matemáticas, o conhecimento fundamentado da importância dos vários riscos através do raciocínio sistemático e lógico (PIMENTA, 2009).

À exemplo de Melo (2014), nesta dissertação a metodologia FMEA/FMECA será referida simplesmente como FMEA.

O método permite: (1) avaliar os efeitos e sequência de acontecimentos decorrentes de cada modo de falha, (2) determinar a importância de cada modo de falha, (3) avaliar o impacto sobre a confiabilidade e segurança do sistema considerado e, por fim, (4) classificar os modos de falhas estudados. Tem como objetivo a eliminação ou controle de todos os modos de falha de um sistema que possam colocar em risco seu funcionamento (CALDEIRA, 2008).

Segundo Melo (2014), a decomposição do sistema em itens é a primeira etapa fundamental do processo e condiciona a análise subsequente. Cada elemento deve ter sua função explicitada. O modo de falha pode ser definido como a maneira com que o item (sistema, subsistema ou componente) falha ou deixa de apresentar a função desejada ou esperada. Pode ser expresso como uma negativa da função que lhe é atribuída. Já o efeito relaciona-se com os resultados

produzidos quando o modo de falha ocorre, ou seja, suas consequências. Pode ser decomposto em efeitos locais (no próprio elemento), próximos (em outros elementos) ou finais (no sistema).

Igualmente importante é o conhecimento das soluções de projeto e dos respectivos critérios de dimensionamento, das especificações construtivas e de alterações em fase de construção, assim como das regras de operação e de segurança que pautam a exploração do sistema (CALDEIRA, 2008).

De acordo com Melo (2014) em relação à implementação do método, existe uma grande variedade de layouts dos formulários de FMEA acessíveis na literatura, não existindo uma padronização. São usualmente apresentados de forma tabular. Geralmente, tais formulários abordam os seguintes itens:

- Identificação do sistema;
- Identificação dos subsistemas, componentes (ou elementos);
- Descrição da função dos componentes;
- Modo de falha;
- Efeito;
- Causa;
- Controle;
- Índice de ocorrência (O) = probabilidade da falha ocorrer;
- Índice de severidade (S) = impacto ou gravidade dos efeitos da falha;
- Índice de detecção (D) = eficiência (ou probabilidade) dos controles de detecção da falha;
- Número de prioridade de risco (NPR ou RPN – *Risk Priority Number*) = produto dos índices de ocorrência, severidade e detecção.

As avaliações dos índices por classes e escalas numéricas são feitas de acordo com critérios previamente definidos. Cada autor utiliza uma classificação própria para pontuar os índices, existindo, portanto, uma gama enorme de diferentes tabelas. O ideal é que cada autor, ou empresa, tenha os seus próprios critérios adaptados à sua realidade específica. No caso da engenharia de barragens brasileira, a aplicação do FMEA em barragens de contenção de rejeitos já conta com alguns anos de experiência, mas no setor elétrico não é prática corrente.

Assim sendo, apresenta-se, na Tabela 2.2, um modelo de tabela para classificação dos índices de severidade, ocorrência e detecção, aplicada no setor de mineração.

Tabela 2.2: Descrições de incertezas

ÍNDICE DE SEVERIDADE (S)		ÍNDICE DE OCORRÊNCIA (O)		ÍNDICE DE DETECÇÃO (D)	
S _i	Efeito	O _i	Probabilidade	D _i	Probabilidade
1	Muito baixo	1	Improvável (0,1%)	1	Quase certo
2, 3	Baixo	2, 3	Remoto (0,1 a 1%)	2	Muito alto
4, 5	Médio	4, 5, 6	Ocasional (1 a 10%)	3	Alto
6, 7, 8	Grave	7, 8, 9	Provável (10 a 20%)	4	Moderadamente alto
9	Muito grave	10	Frequente (>20%)	5	Moderado
10	Catastrófico	..	..	6	Baixo
..	..	..	..	7	Muito baixo
..	..	..	..	8	Remoto
..	..	..	..	9	Muito remoto
..	..	..	..	10	Quase impossível

Fonte: ESPÓSITO e PALMIER, 2013

A severidade também pode ser ponderada e avaliada levando-se em consideração diferentes aspectos, como os efeitos em pessoas, meio ambiente, saúde e segurança. A Tabela 2.3 apresenta um arranjo para definição da severidade.

Tabela 2.3: Severidade (S) avaliada sobre diferentes aspectos

CLASSES DE SEVERIDADE (S)	CONSEQUÊNCIA			
	SAÚDE E SEGURANÇA DE PESSOAS	IMPACTOS AMBIENTAIS	IMPACTOS ECONÔMICOS (€)	IMPACTOS LEGAIS E CENSURA DA OPINIÃO PÚBLICA
A / I	Negligenciável	Sem impacto	Impacto baixo (< 10 mil)	Nenhum
B / II	Pequenos primeiros socorros	Liberação ao meio ambiente local	Impacto médio (10 mil a 100 mil)	Baixo
C / III	Pequenos ferimentos	Violação legal ou permitida	Impacto médio-alto (100 mil a 1 milhão)	Médio-baixo
D / IV	Incapacidade temporária	Impacto negativo no local	Impacto alto (1 milhão a 10 milhões)	Médio
E / V	Incapacidade permanente / fatalidade	Impacto significativo	Impacto muito alto (10 milhões a 100 milhões)	Médio-alto
F / VI	Múltiplas fatalidades	Impacto catastrófico	Impacto massivo (> 100 milhões)	Alto

Fonte: Melo, 2014

A priorização ou ordenação dos modos de falha pode ser realizada por duas formas: pelo índice de criticalidade (expresso pelo produto da ocorrência e severidade) ou pelo NPR. No primeiro caso é mais usual a representação por matrizes bidimensionais, gerando a matriz de risco ou criticalidade. Um exemplo é apresentado na Figura 2.22, onde os eventos expostos são apenas ilustrativos, e cada número representa um respectivo modo de falha. A quantidade de classes e suas denominações variam de acordo com o autor. Cada modo de falha, por meio da sua identificação, deve ser plotado nas células da matriz de risco (MELO, 2014).

Ocorrência	V					
	IV					
	III			1.2 (1) 1.2.1 (1)		
	II				1 (3), 1.2 (3), 2(3), 2(5), 2.4(3), 2.4(5)	1(2), 1.2 (1), 1.6(1), 1.6.1(1), 1.6.2(1), 1.6.3(1), 2(1), 2.4(1)
	I					
		I	II	III	IV	V	VI
		Severidade				

Figura 2.22: Matriz de risco para elementos críticos da barragem de Três Marias. Fonte: Melo, 2014.

Enquanto a representação gráfica favorece a visualização dos modos de falhas em função da probabilidade de ocorrência e da consequência, o NPR permite considerar o Índice de Detecção. Cabe ressaltar que o Índice de Detecção pode ser muito representativo para a segurança de barragens, já que alguns modos de falha podem não ser evidentes.

Segundo Hartford e Baecher (2004), uma limitação associada a estes métodos é a dificuldade de análise de redundâncias, uma vez que modos de falha de componentes individuais podem não resultar em efeitos observáveis no sistema ou determinados estados limite de alguns subsistemas podem não ter impacto no sistema global.

Um outro aspecto que poderá constituir uma limitação é o tratamento isolado dos estados limite de cada subsistema, não considerando efeitos combinados de estados limite simultâneos, do mesmo subsistema ou de diferentes subsistemas. A materialização de alguns

estados limite (ex.: perda de estabilidade global) pode implicar a análise conjunta de vários subsistemas (núcleo e maciços estabilizadores ou corpo da barragem e fundação) (PIMENTA, 2009).

A FMEA, que é um registro, deve ser sempre revisada e atualizada, visando um processo de melhoria contínua. De acordo com Hartford e Baecher (2004), pode ser utilizada tanto como um método único, como pode ser considerada um precursor para uma análise mais detalhada por árvores de eventos ou de falhas.

Cabe destacar que a FMEA é uma metodologia versátil, transparente e eficiente, sendo uma ferramenta bastante aceita e difundida entre os profissionais da área de análise de risco.

2.4.2 ETA - Event Tree Analysis (Análise por árvore de eventos)

Segundo Ladeira (2007), a análise por árvore de eventos é um método indutivo, que 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.

Este método pode ser tratado sob todas as formas de análises, seja qualitativa, semiquantitativa ou quantitativa, sendo usualmente associada à natureza quantitativa.

A árvore de eventos, geralmente utilizada para barragens, refere-se a modelos de sistemas físicos. São construções gráficas, dispostas em ordem cronológica (da esquerda para direita), onde se inicia a análise a partir de um perigo, ou evento iniciador, passando sucessivamente para a sequência lógica de ocorrência do evento e podendo culminar no efeito final. Cada ramo da árvore estratifica-se, binariamente, em dois ramos, representando uma situação de sucesso e outra de falha. O nó representa uma transição de estado do sistema. Quando utilizada na forma quantitativa (ou semiquantitativa) são explicitadas as probabilidades de ocorrência de cada sequência. O único requisito para o resultado das probabilidades dos eventos é que esses sejam mutuamente exclusivos, ou seja, quando a ocorrência de um desses eventos exclui a possibilidade de ocorrência dos outros, e coletivamente exaustivos, que significa que a união desses eventos equivale à população ou espaço amostral (MELO, 2014).

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

sequência lógica entre os eventos até a possível ocorrência da falha em cada ramo (LADEIRA, 2007).

As figuras 2.23 e 2.24 apresentam, respectivamente, os conceitos utilizados para a construção das Árvores de Eventos e um exemplo de aplicação prática do método.

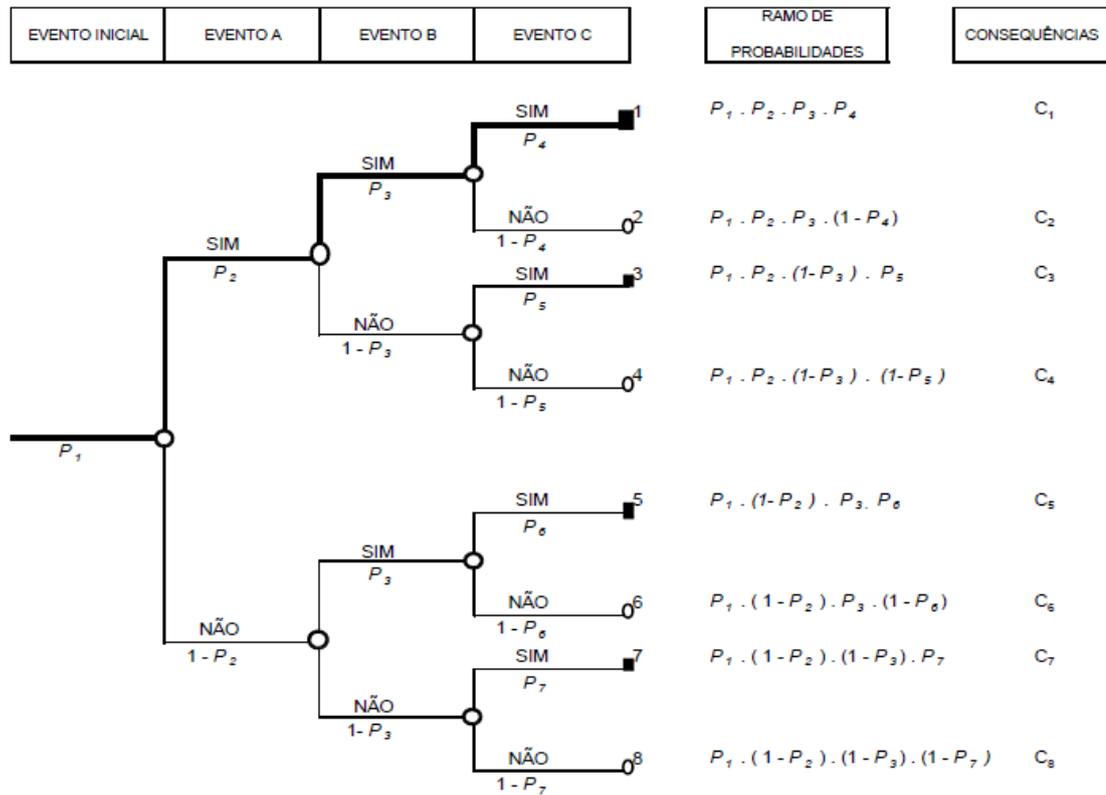


Figura 2.23: Características das Árvores de Eventos. Fonte: Ladeira, 2007, adaptado de Hartford e Baecher, 2004

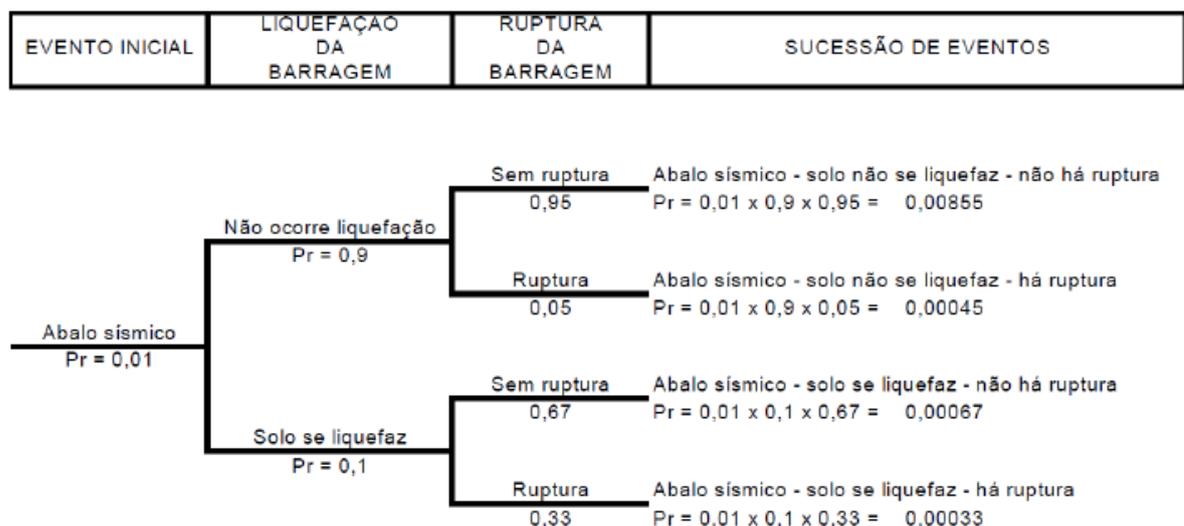


Figura 2.24: Exemplo de Árvore de Eventos para o evento inicial de abalo sísmico. Fonte: Ladeira, 2007, adaptado de Hartford e Baecher, 2004

Bier (1997), citado por Perini (2009), ressalta que a ETA desempenham bem o papel de mostrar a ordem dos eventos, bem como as dependências entre eles. É considerada uma forma muito útil que facilita a comunicação sobre as hipóteses feitas no modelo de risco. Contudo, em função de apresentar várias combinações dos sucessos e das falhas de seus subsistemas, os modelos rapidamente se tornam muito grandes, com inúmeras sequências.

Sobre o método, Hartford e Baecher (2004), ressaltam que a falta de base teórica pode significar que as construções (das árvores) sejam difíceis, se não impossíveis, para alguns modos de falha, de serem desenvolvidas corretamente no tempo presente. Todavia, isso não quer dizer que a ETA não seja útil para avaliação de risco em barragens, mesmo porque fornecem uma estrutura altamente intuitiva, além do que os demais métodos também estão sujeitos, se não mais, à falta de uma base teórica rigorosa.

Ainda segundo Hartford e Baecher (2004), a ETA é utilizada, em última análise, para embasar processos de decisão, explicando como uma barragem pode se comportar. Ela adiciona considerações que no passado não eram ponderadas formalmente: as probabilidades associadas a vários modelos de comportamento e suas consequências para a barragem e para o vale a jusante, que podem ser avaliadas à medida que o fenômeno ocorre. Abordada a partir dessa perspectiva, árvores de eventos são uma ferramenta de diagnóstico; elas não têm a intenção de gerar números por si só, mas de fazer inferências sobre como uma barragem pode se comportar quando sujeita às condições de operação.

2.5 Planos de ação de emergência

Considerando que as barragens são estruturas que induzem riscos e têm potencial para causar acidentes, são desenvolvidos Planos de Ação de Emergência visando preparar os empreendedores, órgãos fiscalizadores, organismos de defesa civil e a população do vale a jusante para o enfrentamento de situações críticas relacionadas à barragem.

Até mesmo pessoas leigas na área de segurança de barragens podem perceber a importância estratégica deste tema para o Brasil, avaliando, por exemplo, as consequências de um cenário hipotético com a ruptura em cascata de barragens numa bacia hidrográfica como a do rio Paraná, que além de grandes reservatórios possui cerca de 60% da capacidade hidrelétrica instalada no País.

O fator tempo pode ser considerado o maior desafio do PAE, sendo que uma resposta rápida, eficiente e organizada é primordial para alcançar os objetivos propostos. Neste contexto, o PAE busca pré-estabelecer um fluxo de ações a serem desempenhadas pelos diversos atores envolvidos neste tipo de cenário, assim como a infraestrutura necessária, visando reduzir a probabilidade de ocorrência de acidentes e os seus respectivos impactos sociais, ambientais e econômicos. Caso o acidente ou evento crítico seja inevitável, deseja-se ao menos reduzir as suas consequências, evitando, principalmente, a perda de vidas humanas.

Segundo Balbi (2008), é conveniente que sejam elaborados dois PAEs distintos, porém integrados. Um interno, chamado Plano de Emergência da Barragem, com elementos de detecção, avaliação e classificação de ocorrências excepcionais, de notificação, de definição de responsabilidades, de planejamento de ações e de mapeamento de áreas de risco a jusante, cuja responsabilidade é do proprietário. Outro externo, chamado Plano de Emergência Externo do município, mais focado em elementos ligados à prontidão, ao alerta à população e ao processo de evacuação, onde as ações são de responsabilidade das autoridades locais. Este sistema é utilizado em alguns países, como Portugal.

O histórico de acidentes demonstra que quando existe um alerta anterior a um rompimento de barragem, o número de vítimas reduz de maneira bastante significativa.

Segundo Viseu *et al.* (2011), no que diz respeito aos vales a jusante de barragens, verifica-se que a noção de risco se refere a uma dupla realidade: por um lado alude ao risco de ruptura de uma barragem (que se relaciona com a segurança da barragem e a análise de risco associado à barragem) e, por outro, ao risco em que incorrem os vales a jusante da mesma, pelo fato desta poder eventualmente colapsar (que se relaciona com as consequências da ruptura e a análise do risco no vale a jusante de barragens).

A identificação dos fatores de risco associados à barragem é a primeira etapa da análise, sendo um processo qualitativo e tão sistemático quanto possível, que consiste na caracterização dos eventos e das condições que podem estar na origem da ruptura de uma barragem. Esta fase é regida pela tentativa de resposta à pergunta: "o que pode originar uma ruptura?".

Já a determinação da probabilidade de ocorrência dos diversos eventos que provoquem a deterioração da barragem é regida pela tentativa de resposta à pergunta: "quão prováveis são os modos de ruptura?".

A análise do risco no vale a jusante pode ser completamente independente da análise do risco associado à barragem. Esta análise do risco visa a determinação das consequências da ruptura de uma barragem, sendo regida pela tentativa de resposta à pergunta: "o que poderia acontecer, caso ocorresse a ruptura (avaliação de danos e consequências)?" . Ressalta-se que, em rigor, as consequências também estão sujeitas a incertezas e a probabilidades de ocorrência.

Uma avaliação exaustiva do risco implica responder de forma clara as três perguntas colocadas acima, permitindo estimar uma medida quantitativa do risco efetivo (VISEU *et al.*, 2011).

O PAE é tratado na Lei 12.334/2010, que apresenta o seguinte texto (BRASIL, 2010):

Art 12. O PAE estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência, devendo contemplar, pelo menos:

I - identificação e análise das possíveis situações de emergência;

II - procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem;

III - procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação;

IV - estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

Parágrafo único. O PAE deve estar disponível no empreendimento e nas prefeituras envolvidas, bem como ser encaminhado às autoridades competentes e aos organismos de defesa civil.

Segundo uma minuta do Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência, publicada pela ANA no dia 18/05/2015 para consulta pública, o PAE é um documento que deve ser adaptado à fase de vida da obra, às circunstâncias de operação e às suas condições de segurança. É, por isso, um documento datado que deve ser periodicamente revisado, nomeadamente sempre que haja lugar a alterações dos dados dos intervenientes e, ainda, na sequência da realização de exercícios de teste ou da ocorrência de situações de

emergência, que justifiquem alterações ao plano. A revisão e atualização do PAE é da responsabilidade do Empreendedor.

Uma das principais ferramentas utilizadas no PAE são os mapas de inundação, que representam o alcance da onda de cheia gerada em decorrência de rupturas hipotéticas de barragens.

Estas simulações de cheias induzidas pela ruptura são realizadas por meio de modelos hidrodinâmicos, que obrigam, na prática, a modelagem não só do processo de propagação da cheia ao longo do vale a jusante como ainda do processo de formação da cheia, compreendendo o desenvolvimento da brecha de ruptura e o hidrograma defluente da mesma (Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência - ANA, 2015).

A partir dos mapas elaborados para cada cenário hipotético, pode-se estabelecer, por exemplo, planos de alerta e evacuação das respectivas áreas de risco, considerando também o treinamento para a população e instituições de Defesa Civil. A Figura 2.25 apresenta um exemplo de mapa elaborado para representar a ruptura hipotética da barragem da usina hidrelétrica de Peti, no município de São Gonçalo do Rio Abaixo - MG e um plano de evacuação.

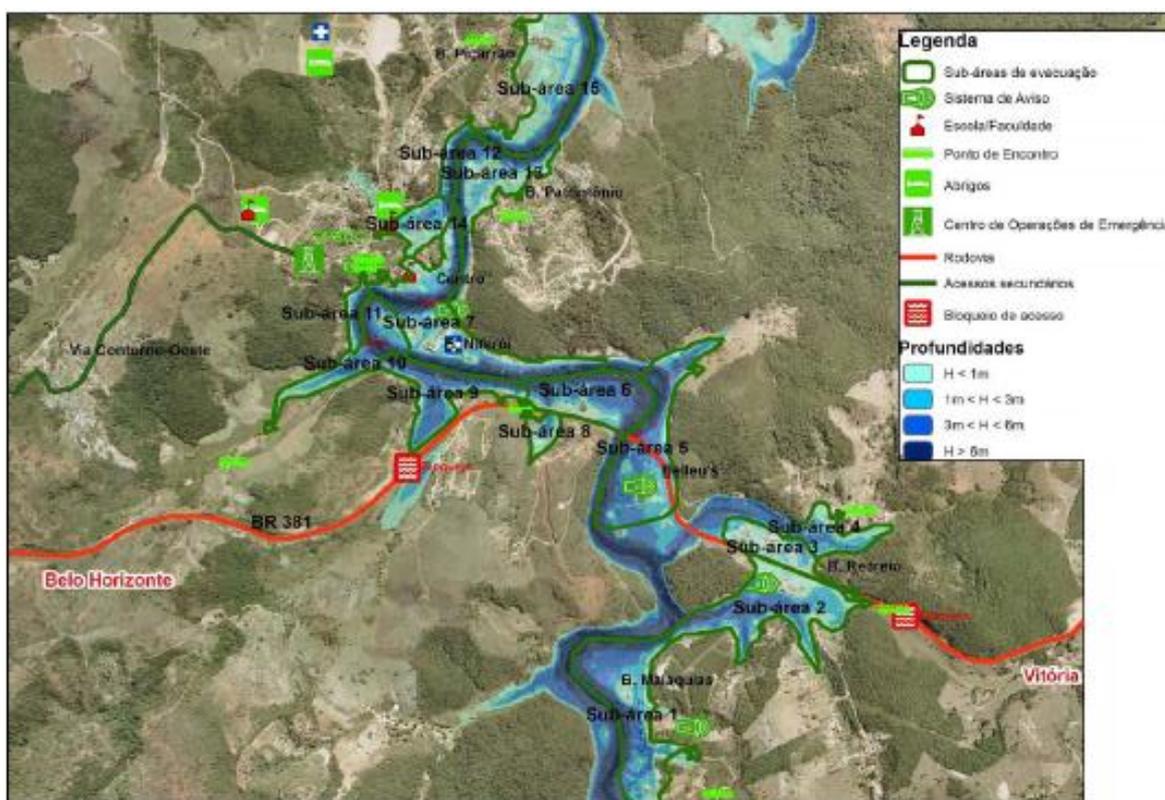


Figura 2.25: Mapa de zoneamento e plano de evacuação (Balbi, 2008).

Ainda segundo a minuta do Guia proposto pela ANA, no PAE deverá, igualmente, estar definida a Zona de Autossalvamento (ZAS), ou seja, a região a jusante da barragem em que se considera não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente. Os critérios para definição da ZAS variam de país para país, sendo proposto para o Brasil, a princípio, adotar a menor das seguintes distâncias: 10 km ou a distância que corresponda ao tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos.

Este assunto da ZAS é polêmico e tem sido discutido entre os diversos envolvidos, assim como a disponibilização dos PAE's nas Prefeituras. Possivelmente serão feitos ajustes entre os órgãos fiscalizadores, empreendedores e a defesa civil para encontrar um equilíbrio com relação à definição da distância da ZAS de cada barragem, assim como programas de comunicação de risco podem ser elaborados para tratar da forma como as informações do PAE serão repassadas à população sem causar eventuais transtornos.

A *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), que é responsável pela coordenação da resposta a desastres em nível Federal nos Estados Unidos, além de fornecer orientação para os Estados e demais agências locais de gestão de emergências, tem sido uma das Instituições mais atuantes na área dos Planos de Ação de Emergência para barragens, desenvolvendo diretrizes formais para auxiliar os proprietários de barragens e demais autoridades a elaborar e implantar estes PAEs. Diversas publicações têm sido feitas neste sentido, sendo uma grande referência para estudos nesta área.

Segundo Blasco *et al.* (1998), o profissional responsável pelo PAE deve entender os aspectos técnicos da engenharia de barragens. Ao mesmo tempo ele deve dar valor para a proteção da população e para a prevenção como valores fundamentais, pelo menos da mesma maneira como ele valoriza rendimento econômico de sua companhia. Ele também deve ter, ou desenvolver, habilidades que tem relação com o comportamento humano: os hábitos, os padrões de pensamentos e reflexões, o conhecimento, valores e crenças das pessoas, não somente do pessoal da companhia, mas também da população que eles devem proteger. Ele ainda deve ter ou desenvolver habilidades de comunicação, de relações públicas, de apresentação em público, de negociação, de persuasão, desde que sua obrigação inclua conscientizar as pessoas sobre emergência e fazer exercícios com grupos de pessoas.

Ressalta-se que quanto maior o investimento em Prevenção, Preparação e Resposta, menor será a probabilidade de ocorrência de um acidente de rompimento de barragem e menores

serão as consequências deste tipo de evento, que pode ter proporção catastrófica tanto para sociedade quanto para o empreendedor responsável pelo gerenciamento da estrutura.

2.6 Projeto GT490/APQ-03314-11 - Sistema Inteligente Integrado com Tecnologia Web e Móvel para Gestão de Emergências (CEMIG/FAPEMIG, 2013)

Conforme o item 1.2 do presente trabalho, uma das justificativas para a elaboração desta dissertação é contribuir, por meio da aplicação de ferramentas de análise de risco, para a implantação do "Sistema Inteligente Integrado com Tecnologia Web e Móvel para Gestão de Emergências" nas barragens gerenciadas pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG. Esta contribuição consiste, basicamente, em estabelecer mecanismos para a identificação dos aspectos mais críticos de uma barragem, para os quais serão realizados estudos de Análises por Árvores de Eventos - ETA. Como pode-se verificar no decorrer deste item, que descreve parcialmente o Projeto GT 490, as árvores de eventos são dados de entrada relevantes para o Sistema Inteligente proposto.

A condição ideal seria que fossem elaboradas árvores de eventos simulando o comportamento de todos os modos de falha identificados em uma barragem. Porém, a elaboração de todas estas árvores pode se tornar inexecutável, principalmente quando se trata da gestão de uma quantidade expressiva de barragens. Desta forma, pretende-se priorizar as árvores de eventos que tratam dos modos de falha mais significativos para determinada estrutura, proporcionando uma abordagem representativa e viável para a implantação do sistema PAEWEB nas barragens gerenciadas pela CEMIG.

O Projeto, que ainda está em andamento, tem previsão de término para o ano de 2016. As informações referentes à sua concepção foram extraídas, basicamente, do Relatório de Etapa 1 (CEMIG/FAPEMIG, 2013).

O PAEWEB, que faz parte do Projeto GT490, visa criar *softwares* capazes de auxiliar o processo de comunicação e tomada de decisão em situações emergenciais envolvendo barragens, por meio de um sistema inteligente e interligado aos bancos de dados da CEMIG, capaz de identificar uma condição de anormalidade a partir de dados de entrada obtidos por equipamentos de instrumentação, inspeções visuais ou estações telemétricas, gerando notificações de estados de alerta conforme definido no PAE da barragem. Um fluxograma geral do atual PAE de Barragens da CEMIG pode ser verificado na Figura 2.26.

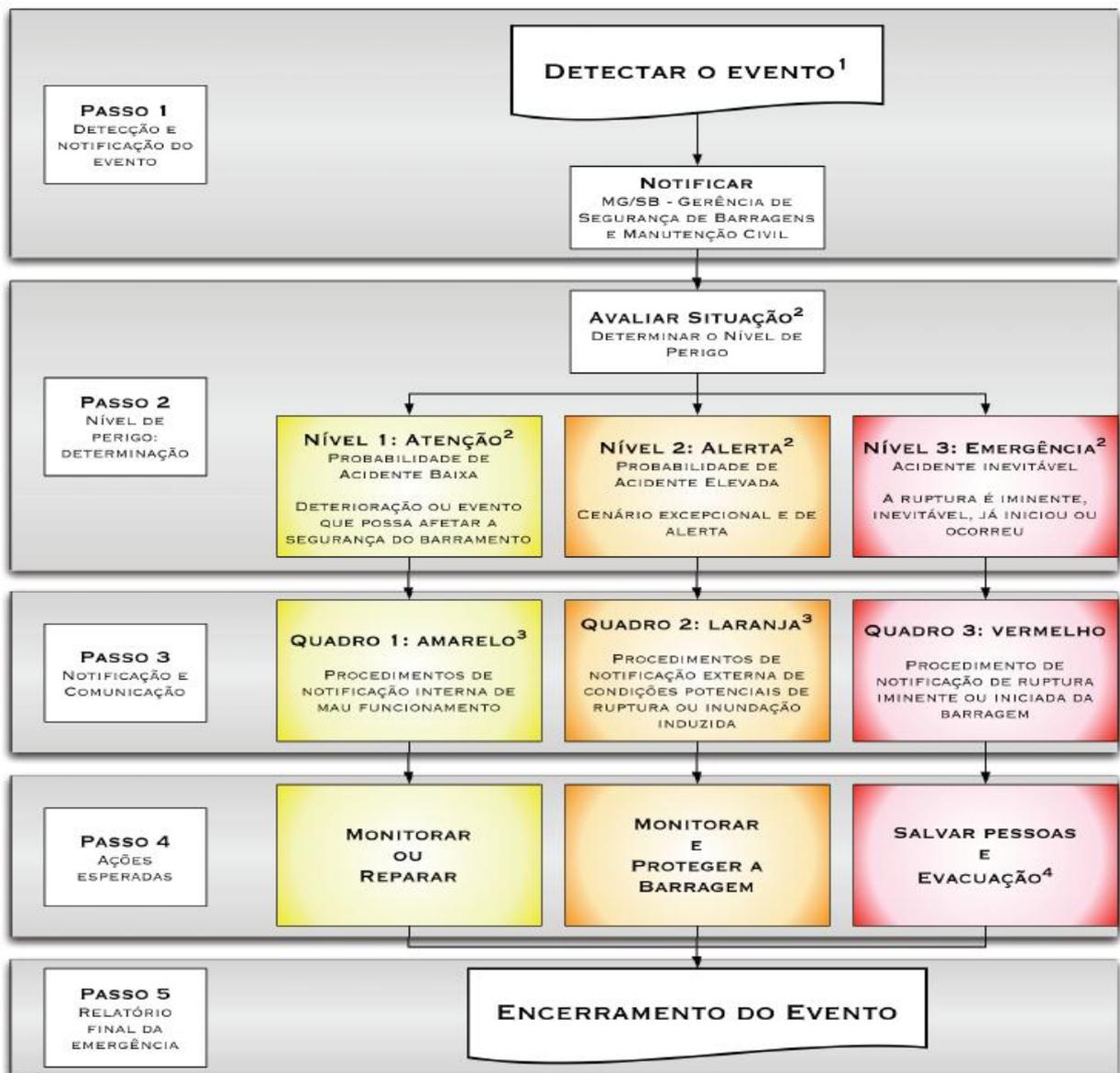


Figura 2.26: Visão geral do PAE de Barragens da CEMIG. Fonte: Relatório da Etapa 1 - Projeto GT490, 2013

Todas as ações de resposta do PAE são decorrentes da determinação do Nível de Perigo da estrutura (Passo 2), sendo esta uma atividade central do processo. Ao mesmo tempo, é uma de suas etapas mais difíceis, já que normalmente exige dos tomadores de decisão uma atuação rápida e de grande responsabilidade mediante um cenário bastante complexo que envolve, além de eventuais incertezas, diversas variáveis técnicas, econômicas e sociais. Neste contexto, o PAEWEB propõe o desenvolvimento de um “Sistema Especialista” que utiliza regras nebulosas ou “fuzzy” para transformar os diversos dados de entrada em uma classificação de Nível de Perigo, conforme a Figura 2.27.

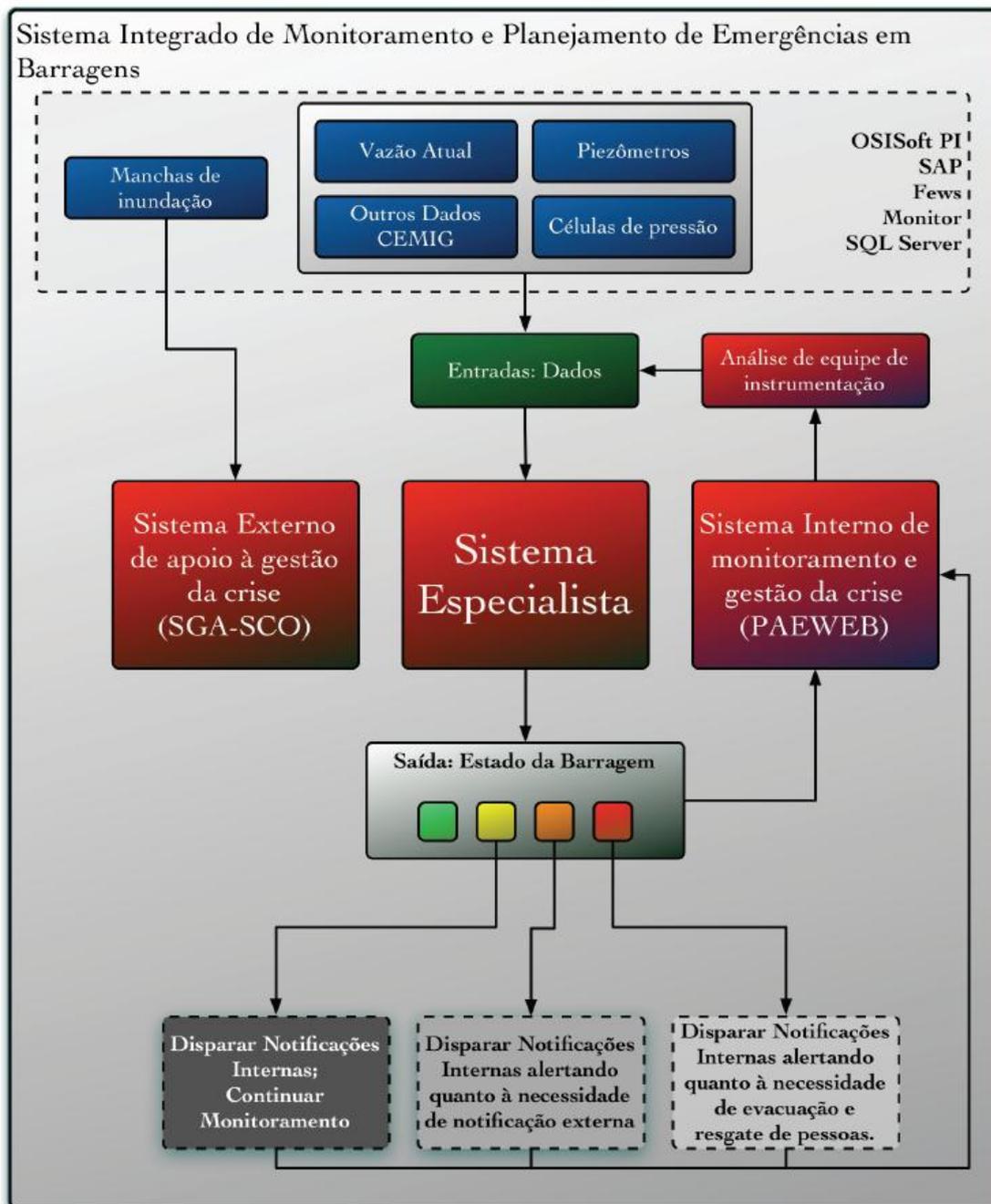


Figura 2.27: Proposta inicial para o Sistema Integrado. Fonte: Relatório da Etapa 1 - Projeto GT490, 2013

Vale salientar que os sinais gerados pelo sistema especialista servirão como apoio ao gestor de emergências da CEMIG, sendo que cabe a ele homologar ou rejeitar um determinado sinal de estado (CEMIG/FAPEMIG, 2014).

A elaboração do Sistema Especialista pode ser considerada a porção mais central e importante do projeto, pois nele os dados de entrada serão processados em termos de sinais de estado das barragens. Em inteligência artificial, um sistema especialista é um sistema de computador que simula a capacidade de um especialista humano de decisão. Os sistemas especialistas são

projetados para resolver problemas complexos de raciocínio sobre o conhecimento, representado principalmente como regras SE-ENTÃO em vez de utilizar a programação convencional na qual um código procedural é desenvolvido (CEMIG/FAPEMIG, 2014).

Um dos principais dados de entrada do Sistema Especialista, além das informações da instrumentação e inspeções visuais, será a probabilidade de ocorrência de um acidente, obtida a partir de árvores de eventos elaboradas para uma barragem específica.

Como exemplo de uma árvore de eventos, a Figura 2.28 mostra um trecho da evolução de um de piping do barramento para a fundação, para a barragem de São Simão, com as respectivas probabilidades de falha para cada nó da árvore (LADEIRA, 2007).

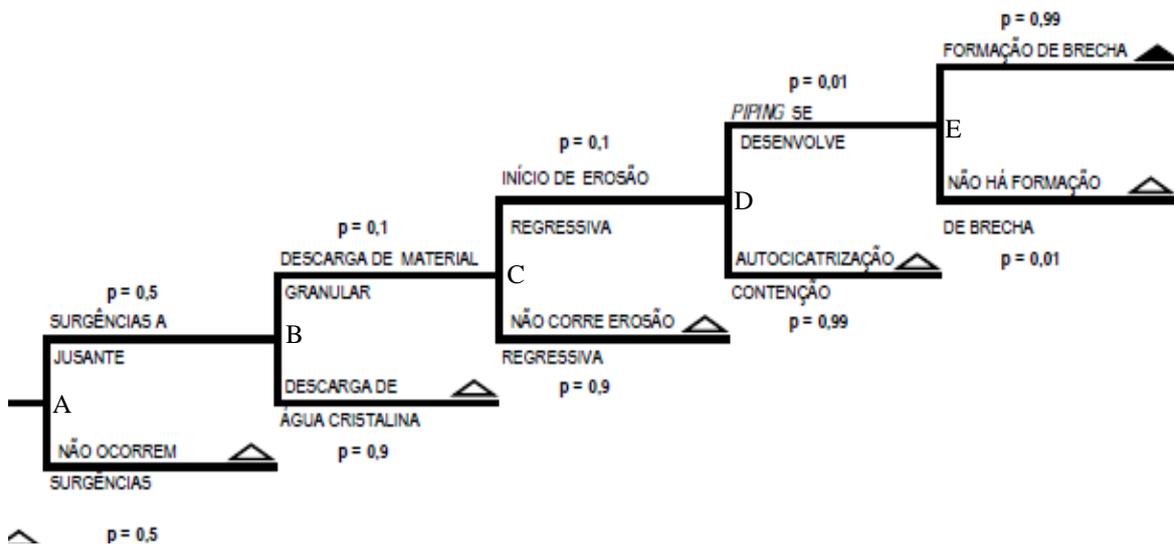


Figura 2.28: Trecho de uma árvore de eventos. Fonte: Ladeira, 2007

Neste exemplo, pode-se verificar as seguintes probabilidades de formação de brecha:

- A partir do nó A: $p = 0,5 \times 0,1 \times 0,1 \times 0,01 \times 0,99 = 4,95 \times 10^{-5}$
- A partir do nó B: $p = 0,1 \times 0,1 \times 0,01 \times 0,99 = 9,9 \times 10^{-5}$
- A partir do nó C: $p = 0,1 \times 0,01 \times 0,99 = 9,9 \times 10^{-4}$
- A partir do nó D: $p = 0,01 \times 0,99 = 9,9 \times 10^{-3}$
- A partir do nó E: $p = 9,9 \times 10^{-1}$

Naturalmente, verifica-se que à medida que o fenômeno evolui aumenta a probabilidade de ocorrência da formação de brecha e ruptura da barragem.

Segundo Leone *et al.* (2014), os resultados dos testes realizados com o Sistema Especialista para a barragem de Emborcação revelaram que a metodologia proposta foi capaz de calcular de forma inteligente o estado da barragem não só por sinalizar o estado adequado quando precisava, mas também por não superestimar o resultado utilizando informações tendenciosas, sendo capaz de analisar múltiplas dimensões ao mesmo tempo.

Esse Sistema também pretende promover um canal de comunicação entre os diversos atores envolvidos na emergência, tanto internos, da empresa, quanto externos (principalmente a Defesa Civil), para divulgar informações importantes sobre a gestão da emergência.

O programa é suportado pelos dispositivos mais comuns, tais como:

- Navegadores web para computadores;
- Smartphones e tablets baseados em iOS (iPhone, iPod e iPad);
- Android e BlackBerry OS.

A Figura 2.29 apresenta um exemplo simulado de comunicação através do PAEWEB.

Em suma, o PAEWEB foca em minimizar a subjetividade da análise, acelerar a geração dos sinais de estado das barragens favorecendo a tomada de decisão em uma situação emergencial, reduzir os ruídos de comunicação, melhorar a confiabilidade da informação e manter os contatos atualizados, favorecendo ainda a elaboração do Relatório Final da emergência.

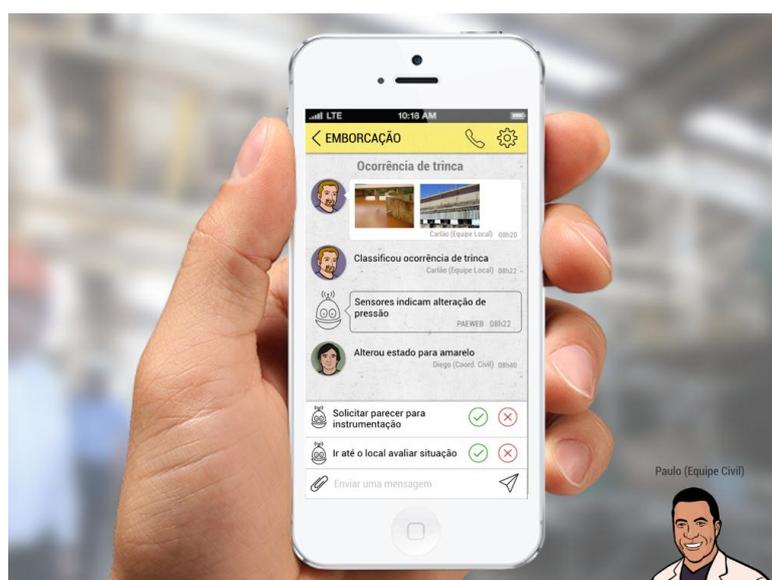


Figura 2.29: Interface de comunicação do PAEWEB. Fonte: Relatório Etapa 4 - Projeto GT490, 2014

O PAEWEB está, atualmente, em fase de testes e ajustes finais. A partir do momento que todo o Sistema estiver operacional, terá início a elaboração das respectivas árvores de eventos para as barragens gerenciadas pela CEMIG GT.

Os resultados esperados no Projeto GT490 são:

Redução de eventuais impactos decorrentes de uma situação de emergência nas barragens e reservatórios, por meio de um sistema moderno e eficiente de auxílio à tomada de decisão e disseminação de informação, além de destacada melhoria no relacionamento e comunicação com entidades públicas, mídia e sociedade. Deste modo, diversos setores serão favorecidos, tais como:

- Instituição de Ensino/Pesquisa ou Empresa: Consolidação e aprimoramento de conhecimentos técnico-científicos através da formação de recursos humanos;
- Indústria: Redução de custos de mitigação de efeitos decorrentes de situações de emergência;
- Setor Elétrico: Sistema especialista de apoio à tomada de decisão que seja um novo modelo para situações similares;
- Sociedade: Aumento significativo da segurança e informação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Esta dissertação tem como objetivo aplicar técnicas de análise de risco como ferramentas de auxílio ao processo de tomada de decisão durante situações emergenciais em barragens.

A metodologia proposta para alcançar este objetivo é descrita nos itens 3.1 ao 3.4. Os itens de 3.5 ao 3.7 apresentam informações referentes ao estudo de caso adotado, que fornecem um embasamento para as análises de risco apresentadas no capítulo 4.

Apesar deste trabalho ser caracterizado como um estudo de caso, estes procedimentos podem ser utilizados para qualquer tipo de barragem, desde que sejam consideradas suas particularidades.

3.1 Levantamento de informações

Para a aplicação das técnicas de análise de risco é necessário conhecer detalhadamente os dados relativos à estrutura, considerando informações de projeto, construção, operação e manutenção da barragem. Apesar deste trabalho estar associado aos PAE's de barragens, cabe ressaltar que esta metodologia aborda exclusivamente dados relativos ao comportamento da barragem, de forma que não contempla, de maneira direta, aspectos relacionados à condição de uso e ocupação do vale a jusante.

As principais fontes de informação foram Relatórios de Inspeção de Segurança da barragem, Relatórios de Instrumentação e dados de projeto disponíveis no acervo da CEMIG, além de informações disponíveis na literatura. Foi realizada também uma visita de campo para elucidar o conhecimento.

Estas informações, que neste trabalho são referentes à barragem da UHE Irapé, são tratadas no decorrer deste capítulo.

3.2 Identificação dos modos de falha mais críticos para a estrutura

A partir do levantamento de informações, foram desenvolvidos estudos de análise de risco pelo método FMEA para a identificação dos modos de falha mais críticos da estrutura. A metodologia FMEA é referenciada no item 2.4.1.

Nesta etapa pretendeu-se basicamente priorizar os modos de falha que serão estudados pelo método ETA, tornando a metodologia mais viável e funcional.

Para o desenvolvimento desta dissertação, foi escolhido como critério de seleção o modo de falha que apresentou o maior valor de Número Preliminar de Risco (NPR) na FMEA. Esta opção foi adotada visando triar um modo de falha único e significativo, de forma a simplificar as etapas posteriores. Os estudos elaborados no item 4.2, porém, podem ser realizados considerando-se outros modos de falhas que sejam avaliados como expressivos no estudo FMEA.

Com relação ao Sistema Especialista proposto no Projeto GT490, recomenda-se utilizar a metodologia descrita até esta etapa, construindo, a partir deste momento, árvores de eventos clássicas para avaliação da probabilidade anual de ruptura da barragem considerando os modos de falha mais importantes do estudo FMEA.

Cabe destacar, mais uma vez, que as análises de consequência da FMEA realizadas neste trabalho são referentes aos danos esperados na estrutura da barragem, de modo que não contemplam diretamente as condições de ocupação do vale a jusante.

3.3 Elaboração da árvore de eventos relativa ao modo de falha mais crítico

Após a identificação do modo de falha mais crítico, foi aplicada a metodologia de análise por árvore de eventos (ETA) para descrever como espera-se que este fenômeno leve à ruptura da barragem. A metodologia ETA é referenciada no item 2.4.2.

Diferentemente dos estudos tradicionais de ETA, que procuram descrever o comportamento atual da barragem, foram adotados valores hipotéticos de probabilidades buscando presumir qual seria o comportamento da estrutura caso a mesma venha a sofrer uma ruptura. Estes valores foram devidamente justificados, conforme as informações descritas no estudo de caso.

Como foram utilizados valores de probabilidade que simulam uma condição crítica, os resultados obtidos são, naturalmente, majorados em relação à condição atual da barragem. Desta modo, estes valores não podem ser comparados aos estudos convencionais de ETA que estimam a probabilidade anual de ruptura, como foi realizado por Ladeira (2007).

Para a avaliação da probabilidade de ocorrência de cada evento, foram utilizadas análises qualitativas tendo como base as informações previamente levantadas, apresentadas nos itens 3.5, 3.6 e 3.7.

Os valores de probabilidade foram baseados nos descritores adotados por Vick (1992) citado por Foster e Fell (1999), conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Descrições de incertezas

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

- (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.

Fonte: Vick, 1992, citado por Foster e Fell, 1999

3.4 Elaboração de árvores de eventos considerando intervenções preventivas no contexto do PAE

Neste etapa, após a elaboração da árvore de eventos que descreve o comportamento hipotético mais provável para a condição mais crítica encontrada no FMEA, foram elaboradas novas árvores de eventos considerando intervenções emergenciais realizadas na barragem.

Deste modo, pode-se variar tanto as técnicas utilizadas para controlar as situações adversas, quanto o momento em que as intervenções são realizadas, favorecendo uma percepção mais apurada da melhor ação de resposta a ser implementada caso este cenário venha a ocorrer em uma situação real.

Sendo assim, estes estudos podem favorecer o processo de tomada de decisão durante situações emergenciais, visando reduzir o risco de um acidente.

Nesta fase também são utilizados os descritores adotados por Vick (1992), conforme a Tabela 3.1. Os critérios para a escolha da probabilidade de ocorrência de cada evento, porém, podem

ser ainda mais subjetivos, sendo passíveis, portanto, de maiores variações conforme o conhecimento e interpretação de cada autor. Por este motivo, é importante que todas as notas sejam devidamente justificadas, favorecendo adequações futuras.

Todas as notas contempladas nos estudos de análise de risco desta dissertação foram aplicadas a partir da avaliação individual do autor deste trabalho. A condição ideal é que este tipo de atividade seja realizada por uma equipe multidisciplinar (painel de especialistas) devidamente capacitada.

Um desenho com o resumo da metodologia é apresentado na figura 3.1.

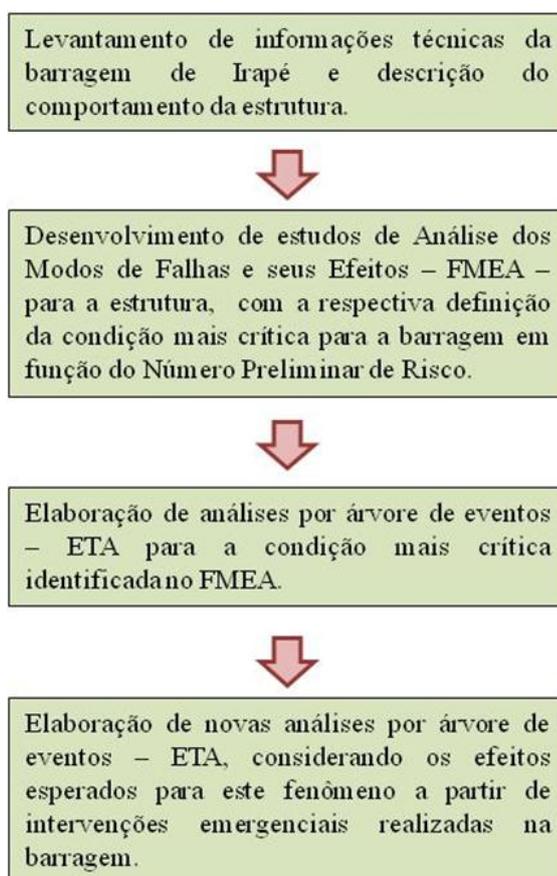


Figura 3.1: Resumo da metodologia

3.5 Definição do caso estudo – UHE Irapé

A barragem da UHE Irapé foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho pelo fato de ser uma estrutura complexa, que apresenta algumas particularidades. Desta forma, os estudos de análise de risco, além de serem justificados, apresentam uma grande diversidade de variáveis, o que favorece a aplicação desta metodologia posteriormente em outras estruturas.

Trata-se de uma das barragens mais altas do mundo, com 210 metros, instalada em um vale encaixado, com taludes íngremes e uma geologia local que apresenta uma rocha com elevado teor de sulfetos. Além disso, o fato de ser uma barragem de enrocamento com núcleo de argila possibilita um trabalho focado em geotecnia, que é a área de concentração do estudo.

A Figura 3.2 apresenta uma visão geral do empreendimento.



Figura 3.2: Vista geral da UHE Irapé. Fonte: Arquivo CEMIG GT

Foi considerado ainda o trabalho de Melo (2014), que apresenta uma análise de portfólio das barragens de terra e terra-enrocamento gerenciadas pela CEMIG GT, onde a barragem de Irapé foi considerada a terceira mais crítica na somatória dos diversos métodos verificados, atrás de Três Marias e Emborcação, conforme a Tabela 3.2. Ressalta-se que no trabalho de Melo (2014) também foram desenvolvidos estudos de FMEA para as barragens de Três Marias e Emborcação, o que poderia favorecer a comparação com os resultados obtidos em Irapé.

Tabela 3.2: Classificação final com base no risco

BARRAGEM	$\sum_{5.1.1}^{5.1.7}$ notas	CLASSIFICAÇÃO FINAL COM BASE NO RISCO
Três Marias	9	1°
Emborcação	12	2°
Irapé	20	3°
Volta Grande	26	4°
São Simão	35	5°
Miranda	39	6°
Nova Ponte	41	7°
Jaguara	53	8°

Fonte: MELO, 2014

3.6 Descrição geral da UHE Irapé

Este item apresenta uma descrição da Usina Hidrelétrica de Irapé - UHE Irapé, abrangendo informações que estão relacionadas à segurança da barragem, considerando dados de projeto, construção e operação da estrutura, visando subsidiar os estudos de análise de risco que foram propostos nos objetivos do trabalho. Tem como principais referências as informações de projeto do arquivo da CEMIG GT, a Revisão Periódica de Segurança, de Viotti *et al.* (2014) e a Avaliação do Comportamento das Estruturas Civas (CEMIG, 2012).

A Usina Hidrelétrica - UHE de Irapé ou Usina Presidente Juscelino Kubitschek está localizada no rio Jequitinhonha, na divisa dos municípios de Berilo (na margem direita), e Grão Mogol (margem esquerda), região nordeste do estado de Minas Gerais. O local do barramento, que dista aproximadamente 540 km de Belo Horizonte, está situado a 566,9 km da foz do Rio Jequitinhonha, que se dá no Oceano Atlântico. A Figura 3.3 apresenta a localização da UHE Irapé.

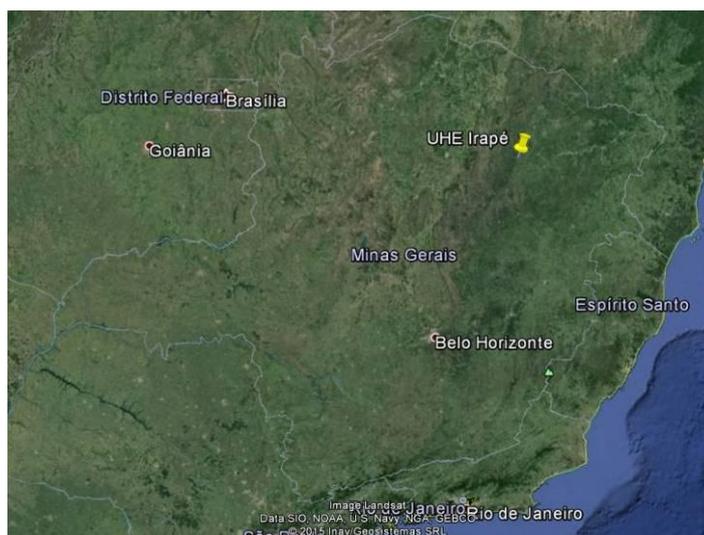


Figura 3.3: Localização da UHE Irapé. Fonte: Google Earth, 2014

A Usina explora uma queda de projeto de 162,00m e uma vazão de $252\text{m}^3/\text{s}$ para gerar uma potência instalada final de 360MW. A energia assegurada do aproveitamento hidrelétrico de Irapé é de 1.807.188 MWh/ano. O projeto é relevante para o desenvolvimento social e econômico do vale do Jequitinhonha, uma das regiões mais carentes do Estado.

A área inundada, considerando o NA Máximo Normal, é de $137,16\text{km}^2$, sendo que o volume operativo máximo do reservatório é de $5.963,92\text{ hm}^3$. O reservatório abrange as áreas dos municípios de Berilo, Grão Mogol, José Gonçalves de Minas, Leme do Prato, Cristália, Botumirim e Turmalina.

As obras civis se iniciaram em 2002, sendo que o enchimento do reservatório teve início em dezembro de 2005. A inauguração ocorreu em julho de 2006. As figuras 3.4 e 3.5, mostram, respectivamente, o período final de construção da barragem e a obra concluída.



Figura 3.4: Foto de um quadro instalado na UHE Irapé, com imagem da fase final de construção da barragem. Vista geral do maciço. Fonte: Autor, 2014



Figura 3.5: Barragem de Irapé concluída. Fonte: CEMIG, 2006

O desvio do rio foi feito por meio de dois túneis escavados em rocha, na ombreira direita. Os túneis possuem seção tipo cogumelo, estão em níveis diferentes e têm 14m de diâmetro e comprimentos de 1.067m e 1.227m.

O arranjo geral compreende uma barragem de enrocamento com núcleo de argila fechando o vale, túneis de desvio na margem direita, tomada de água, vertedouro e extravasor na margem esquerda e casa de força a jusante da barragem. A Figura 3.6 apresenta o arranjo geral da UHE de Irapé.

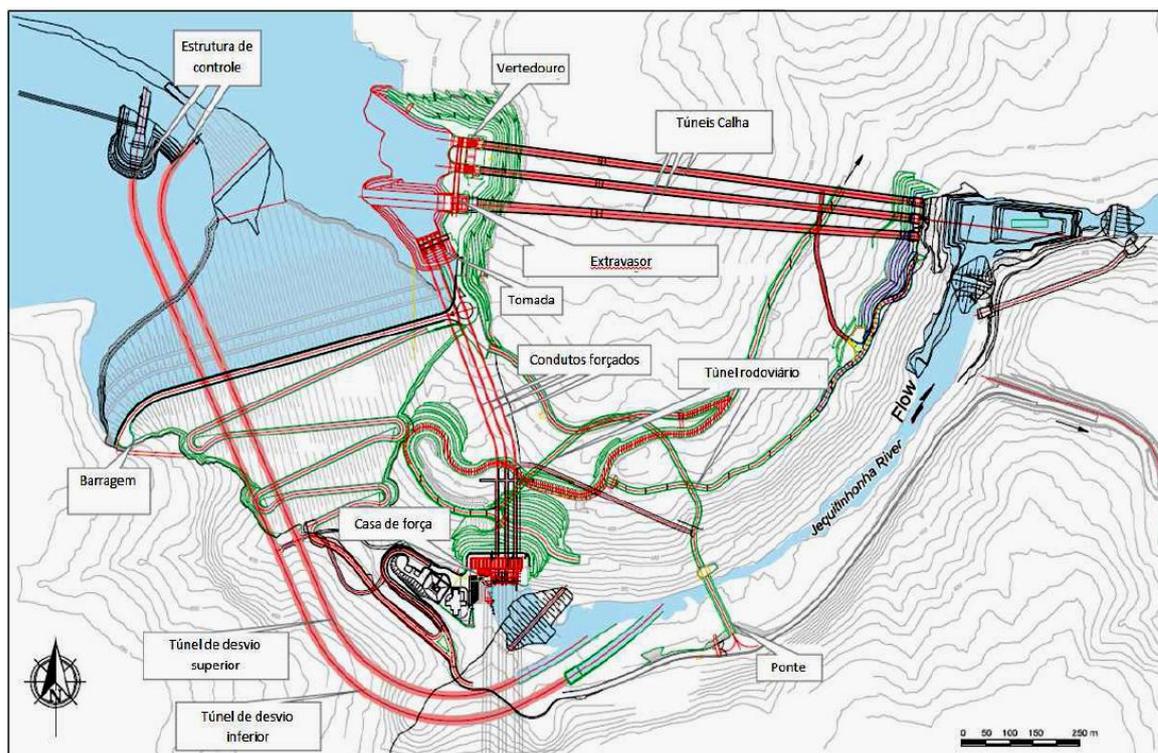


Figura 3.6: Arranjo geral da UHE de Irapé. Fonte: Arquivo CEMIG GT

Segundo Viotti *et al.* (2014), a presença de sulfetos nos maciços rochosos de Irapé foi determinante para a concepção do arranjo das estruturas civis, sendo que muitos estudos foram elaborados, antes e durante a construção, visando evitar ou minimizar o efeito agressivo das substâncias sulfurosas presentes na geologia local. A grande altura e o vale estreito também são características marcantes desta estrutura, que contribuíram na complexidade e dificuldade do projeto.

De acordo com o trabalho de Lima (2009), que apresenta uma descrição geológica detalhada do local de implantação da UHE Irapé, pode-se dizer que o maciço rochoso da área de implantação da UHE Irapé é representado, predominantemente, por um pacote de mica-quartzo xisto grafitoso, de coloração cinza escura, com granulação fina a grosseira, marcado pela presença significativa de sulfetos (pirrotita, pirita e eventualmente, calcopirita e esfalerita) disseminados na matriz rochosa e por baixas concentrações de carbonato. O teor total de sulfetos verificados nas rochas varia entre 3,0 e 39,5% em peso, sendo que 78% das amostras apresentam concentrações entre 3 e 10% em peso. Estes sulfetos têm potencial de geração de efluentes ácidos a partir de reações de oxidação.

Ainda segundo Lima (2009), o processo de oxidação dos sulfetos é extremamente complexo, envolvendo reações de caráter químico-microbiológico, cujo desenvolvimento é influenciado principalmente pelas condições ambientais. Normalmente os processos que envolvem

atividade biológica se desenvolvem com maior velocidade. As oscilações do nível de água no reservatório, que são significativas em Irapé, também podem acelerar o processo de oxidação dos sulfetos.

A reação de oxidação destes sulfetos de ferro, como a pirita e a pirrotita, produz sulfatos de ferro e ácido sulfúrico. O sulfato tem sempre volume maior e causa uma expansão da rocha e sua desagregação. O ácido sulfúrico ataca os elementos no seu entorno, a rocha, os metais e o concreto. Se atacar o concreto, produz também a sua desagregação e perda de resistência. Ressalta-se que a reação de oxidação dos sulfetos é exotérmica, o que proporciona temperaturas elevadas no interior do maciço da barragem.

A Figura 3.7 apresenta um testemunho de sondagem remanescente da obra. Mostra uma oxidação intensa da rocha com a geração de hidróxido de ferro, mas sem desagregação, isto é, com pouca ou nenhuma formação de sulfato. Há grande geração de ácido neste caso.



Figura 3.7: Oxidação de testemunho de sondagem. Fonte: CEMIG, 2014

As Figuras 3.8 mostra a formação do sulfato resultante da reação do ácido sulfúrico com os minerais da rocha. Esta reação neutraliza um pouco a geração de ácido, mas causa a desagregação da rocha pela expansão do sulfato.

A classificação inicial das rochas de Irapé, com base no grau de intemperismo, como é o usual, se mostrou um tanto imprecisa no aspecto geoquímico. Houve necessidade de levar em conta a quantidade de sulfeto remanescente na rocha intemperizada, pois o intemperismo elimina gradualmente o sulfeto e mesmo os produtos oriundos das suas reações de oxidação (VIOTTI *et al.*, 2014).



Figura 3.8: Formação de sulfato em testemunho de sondagem, com expansão da rocha. Fonte: CEMIG, 2014

As rochas foram então separadas em três categorias:

- Xistos muito intemperizados, dos quais o sulfeto e seus produtos já foram eliminados. Este material pode ser usado em aterros sem gerar água ácida. Também não gera problemas nos cortes de escavação.
- Xistos pouco intemperizados, mas que ainda contêm sulfetos e/ou os produtos de sua reação. Devido ao seu intemperismo inicial a água consegue penetrar mais facilmente na rocha e a reação de oxidação dos sulfetos é muito intensa. Estes materiais geram água ácida em aterros e bota-foras. Não foi previsto seu uso no concreto. Seu comportamento nos cortes de escavação foi a preocupação maior devido à necessidade de dimensionar uma proteção adequada.
- Xistos são, com todos os sulfetos preservados. Esta rocha é atacada apenas na superfície onde os sulfetos são expostos. Seu uso como agregado não foi aceito. Foi usada como enrocamento com algumas precauções.

A Figura 3.9 mostra o corte da área da tomada d'água e vertedouro, onde os horizontes de intemperismo estão bem evidentes: a parte mais superficial, sem nenhum sulfeto e, portanto, sem oxidação e a parte pouco intemperizada onde ocorre uma oxidação intensa de sulfetos. A parte de rocha são está em geral recoberta pelo concreto (VIOTTI *et al.*, 2014).



Figura 3.9: Vista do corte da tomada d'água/vertedouro. Fonte: CEMIG, 2014

Não foi possível o uso destes materiais locais como agregados para o concreto. Conforme sugerido pelo Comitê Internacional de Grandes Barragens, os sulfatos e sulfetos determinados pelo método da química analítica, calculados em SO_3 equivalente, não devem passar de 0,5% em peso dos agregados graúdos. Deste modo, conseguiu-se no maciço aflorante da pedraira Olhos D'Água agregados que se enquadravam nestas restrições por meio da caracterização geoquímica e de ensaios para análise de comportamento do concreto. Este material proveniente da pedraira Olhos D'Água, o Diamictito, é tratado como "isento de sulfetos", já que apresenta um teor muito baixo deste componente, da ordem de 0,2%.

No concreto produzido com estes agregados, foram adicionadas grandes quantidades de pozolana, para inibição da reação álcali-agregado, e ainda, para todos os concretos em contato com rocha, o consumo de cimento utilizado foi acima de 350 kg/m^3 (cimento Portland RS IV), com adição de sílica ativa, aditivo redutor de permeabilidade e polímeros e relação água/cimento = 0,45, em consonância com as especificações técnicas. Os cuidados com a produção de concreto foram tomados em todas as instâncias, o que resultou em um material de boas características, sem reações internas que viessem a prejudicar sua durabilidade.

Foram estudadas ainda várias proteções impermeabilizantes no contato entre concreto e rocha, tendo-se optado pela utilização de uma argamassa epoxídica seguida por tinta epoxídica Fosprox SF P235 e/ou revestimento flexível à base de poliuretano Nitoproof 250.

A Figura 3.10 mostra regiões da galeria de drenagem onde foram realizados testes para avaliação do comportamento das proteções impermeabilizantes.



Figura 3.10: Aplicação de proteções impermeabilizantes em galeria de drenagem, para teste.
Fonte: Autor, 2014.

As superfícies rochosas que permaneceriam expostas após a escavação foram, quase sempre, protegidas com concreto projetado resistente a sulfato.

A barragem de enrocamento com núcleo de argila possui comprimento de 551m e altura máxima de 210m, com volume de aterro da ordem de 11.000.000m³, constituindo-se na barragem mais alta do Brasil e a segunda mais alta da América Latina. Os taludes de montante e de jusante têm inclinação média de 1V:1,5H.

Seu núcleo impermeável foi projetado, na porção inferior correspondente ao canal profundo do rio, por uma mistura de argila com cascalho (material 3B denominado “cascalho”) para garantir a presença de um material mais rígido e, conseqüentemente, contribuir para a redução dos recalques. Adicionalmente, uma camada mais plástica foi empregada ao longo dos contatos de solo e rocha nas paredes do vale com o objetivo de auxiliar na redistribuição das tensões (CBDB, 2009).

Preenchendo o canal profundo do rio, foi construída uma base de concreto compactado a rolo (CCR). Essa estrutura tem a função de regularizar a fundação, de modo a prepará-la para receber o núcleo de “cascalho”, possibilitando também a redução da percolação de águas ácidas pela fundação. Este bloco foi construído com cimento ultrafino, resistente a sulfatos, inclusão de micro sílica e com baixo fator água-cimento. Foi usada uma membrana de epóxi para impermeabilizar as superfícies do concreto. A Figura 3.11 mostra a seção transversal de maior altura da barragem, enquanto a Tabela 3.3 apresenta os materiais que compõem o maciço.

Segundo Viotti *et al.* (2014), as análises de estabilidade, de percolação e de tensões deformações da barragem de terra-enrocamento foram executadas de acordo com métodos

compatíveis com o melhor conhecimento atual. Todas as memórias de cálculo das estruturas estão de acordo com as normas vigentes no país. Até o momento não foram detectadas deteriorações no aterro que possam ser atribuídas à rocha com sulfetos. O projeto e a construção foram executados de maneira a minimizar os recalques e deslocamentos horizontais, no que foram bem sucedidos. As trincas existentes na crista são módicas para o porte da barragem e não preocupam. Há pequenas evidências de recalques diferenciais entre zonas do aterro, sem ser motivo de preocupação no momento.

Para a definição da seção típica da barragem foi necessário um equilíbrio entre a utilização dos materiais das escavações exigidas, em sua grande maioria contendo alto teor de sulfetos, e a necessidade de evitar prejuízos ao comportamento da barragem causados pela oxidação dos sulfetos e formação de ácido sulfúrico.

Nos espaldares foi utilizado o enrocamento com sulfetos, selecionado em duas categorias, material 5 – pouco ou medianamente intemperizado, material 5A – medianamente a muito intemperizado e um enrocamento “livre” (com baixo teor) de sulfetos – rocha sã ou pouco intemperizada, material 6. Os materiais com sulfetos foram usados em zonas internas dos espaldares e o material 6 nas partes externas. Proteções adicionais, com rip-rap da pedreira de diamictito, foram usadas na zona de flutuação a montante (material 7) e na parte externa do talude de jusante (material 9).

No filtro de jusante da barragem (material 2) foi usada areia natural.

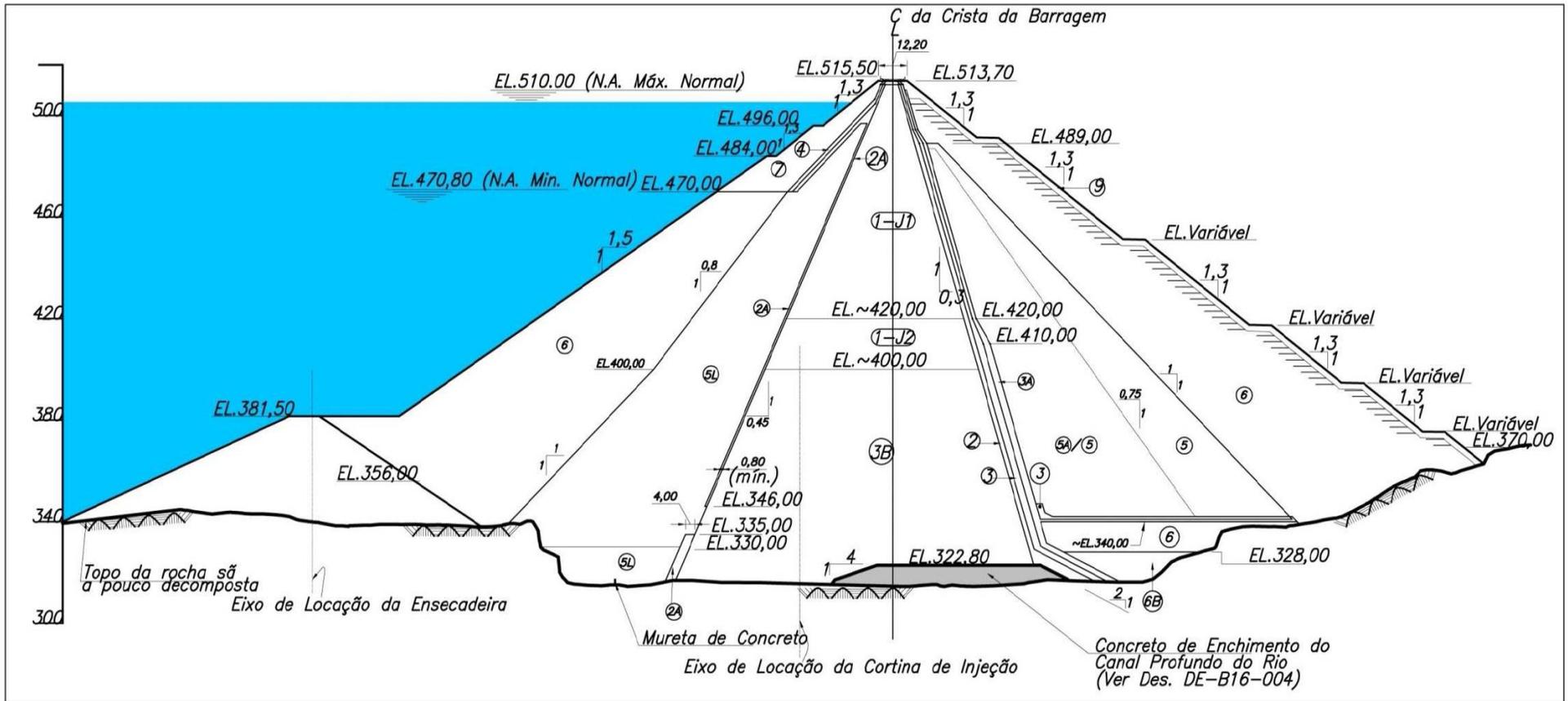


Figura 3.11: Seção transversal de maior altura da UHE de Irapé. Fonte: Lima, 2009

Tabela 3.3: Materiais constituintes da barragem de Irapé

Sigla do Material	Descrição	Espessura das camadas (cm)
1-J1	Solo argilo - arenoso (jazida 1 – Ombreira direita)	20 - 25
1-J2	Solo areno - argiloso (jazida 2 – Ombreira esquerda)	20 - 25
2	Filtro de areia natural	40
2A*	Areia artificial – transição de montante	40
3*	Transição Fina	40
3A*	Transição média	40
3B	"Cascalho"	40
4*	Transição Grossa	40
5	Enrocamento de Rocha pouco a medianamente decomposta	40
5A	Enrocamento de Rocha medianamente a muito decomposta	40
5L	"Random" – Rocha muito decomposta a saprolito (Lixiviada)	40
6	Enrocamento de Rocha pouco decomposta a sã	80
6B*	Enrocamento de Rocha pouco decomposta a sã	80
7*	Enrocamento de Proteção (Rip-Rap)	120
9*	Enrocamento de revestimento	120

*Material proveniente da pedraira Olhos d'água – “isento de sulfetos”. Fonte: Lima, 2009

Além disso, como proteção contra as águas de chuva, foram colocadas mantas de PEAD (polietileno de alta densidade), conforme mostrado na figura 3.12 direcionando essas águas para a zona externa de enrocamento sem sulfetos.

Entre a zona de enrocamento de montante e o núcleo foi criada uma zona de random, material 5L, que sendo um material já altamente intemperizado, tem potencial reduzido de geração de águas ácidas. Foi estabelecido um máximo de 0,1% de sulfetos para esse material.

A fundação da barragem é constituída por uma rocha alterada com tratamento. Foi implantada uma extensa cortina de injeção de cimento sob o núcleo. Foi estudada a resistência dessa cortina ao ataque de águas ácidas e adotada calda resistente a sulfato.

Ainda segundo Viotti *et al.* (2014), em razão de cronograma apertado e redução dos custos de implantação, foram adotados taludes íngremes na parte superior do talude de montante e na parte externa do talude de jusante. Há uma quantidade incomum de quedas de blocos do rip-rap para as bermas de montante. Tem também havido esporadicamente rolamentos de blocos no talude de jusante.

Os parâmetros geotécnicos utilizados no projeto foram obtidos basicamente de ensaios de laboratório executados com uso de amostras deformadas e indeformadas dos materiais provenientes das áreas de empréstimo, estoques e aterros experimentais.

Devido à geomorfologia do vale do rio na região da fundação da barragem, foram realizados estudos com modelagens matemáticas bi e tridimensionais, iniciando-se pelas análises bidimensionais para a determinação das diretrizes macro do projeto, procedendo-se ao refinamento final com base nos resultados de análises tridimensionais (CEMIG, 2004).

Na tabela 3.4 apresenta-se um resumo dos parâmetros de resistência, sendo que em todas as análises foram aplicados parâmetros efetivos.

Tabela 3.4: Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade

Material	Parâmetros de Resistência			Ru (%)
	γ úmido (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	
J1	19	28	32	20
J2	20	0	37	20
3B	21,5	0	38	20
Filtros e transições	20	0	38	-
5/5A	21	0	38	-
5L	21	0	33 ou 35 (***)	5
6/6B/7	22	0	45	-
Solo Compactado - Ensecadeira	18	5	30	20
Transição Compactada – Ensecadeira	19	0	35	-
Enrocamento Compactado - Ensecadeira	20	0	42	-

(***) – O parâmetro de resistência ao cisalhamento do material 5-L com ângulo de atrito igual a 34°, foi determinado a partir da média de duas séries de ensaios de compressão triaxial, tipo CIUsat (adensado isotropicamente, não drenado, saturado, com medição de poropressão). Individualmente uma das séries de ensaios registrou ângulo de atrito de 33° e outra 35°. Fonte: CEMIG, 2004

Os coeficientes de permeabilidade empregados nos estudos basearam-se em valores medidos em ensaios de laboratório ou de campo, realizados nos aterros experimentais ou no do próprio corpo da barragem e são apresentados na Tabela 3.5.

As análises de percolação foram realizadas com a utilização do programa de computador Seep/W da Geo-slope. O método empregado neste aplicativo considera a percolação através de meios porosos e contínuos com uso do método de elementos finitos.

Tabela 3.5: Resumo dos coeficientes de Permeabilidade Adotados.

Material	Coeficiente de Permeabilidade K (cm/s)	Anisotropia de Permeabilidades Adotadas Kh/Kv
Núcleo - J1 - Solo argilo-arenoso	1×10^{-07}	10
Núcleo - J2 - Solo Areno-argiloso	3×10^{-07}	10
Núcleo - Mescla do Cascalho com J2	1×10^{-05}	10
Filtro Septo - Areia Natural	1×10^{-02}	—
Transição Fina - 3	$1,5 \times 10^{-01} (**)$	—
Transição Intermediária - 3A	5×10^{-01}	—
Fundação - Trecho Superficial (*)	1×10^{-04}	—
Fundação - Trecho mais Profundo (*)	1×10^{-06}	—
Cortina de Injeção - Faixa de Influência	1×10^{-05}	—

(*) - Os trechos de fundação rochosa denominados como mais profundos ou superficiais, foram determinados com base nos resultados dos ensaios de perda d'água realizados durante a fase de investigação geológica.

(**) - Permeabilidade baseada em dois valores obtidos de ensaios *in-situ*. Fonte: CEMIG, 2004

Como exemplo dos diversos estudos realizados para a UHE Irapé, a Tabela 3.6 apresenta os resultados das análises de estabilidade do talude de montante para os carregamentos de rebaixamento rápido e para o final de construção, após estudos elaborados para refinamento do zoneamento dos materiais que compõem o corpo da barragem. Tais refinamentos envolveram o talude de montante e o sistema interno de drenagem. Foi considerada como mais representativa a seção de altura máxima da barragem (CEMIG, 2004). Pode-se observar que as superfícies críticas de ruptura, tanto para o carregamento de final de construção quanto para o deplecionamento instantâneo do reservatório, atendem aos valores limites especificados pelo projeto.

O caso de rebaixamento rápido considera a estabilidade do talude de montante submetido a um deplecionamento instantâneo do nível d'água do reservatório entre o nível de água máximo normal, na elevação 510,00m, e o mínimo operacional, na elevação. 470,80m, com o

Fator de Segurança mínimo admitido de 1,2. Para uma avaliação com cunho mais conservador, as poropressões de rebaixamento foram consideradas empregando-se a linha freática no contato com o material drenante, sem qualquer dissipação de poropressões.

O final de construção simula a condição do término da construção, com coroamento na elevação 513,70m, antes do início do enchimento do reservatório, sem admitir dissipações de poropressões construtivas. A avaliação de final de construção em questão tem caráter conservador já que não considera o início do enchimento do reservatório com o aterro parcialmente construído, conforme contemplado no planejamento de construção (início de enchimento do reservatório a partir do coroamento do aterro na cota 475,00m). Adotou-se como constante o valor de poropressões construtivas, com coeficiente R_u de 0,2 ($R_u = u/\gamma \cdot h$), para os solos que compõem o núcleo vedante. O Fator de Segurança mínimo admitido para este caso é de 1,3.

As análises de estabilidade foram efetuadas utilizando o programa de computador Slope/W, com emprego do processo analítico proposto por “Spencer”, que considera o método de equilíbrio limite de forças e momentos. Foi considerado ainda que a rede de fluxo já estava estabelecida. A Figura 3.13 apresenta o resultado da avaliação do rebaixamento instantâneo do reservatório, com $\Phi = 33^\circ$, com superfície circular, e representa o coeficiente de segurança mais baixo encontrado nesta análise específica.

Tabela 3.6: Resumo dos Coeficientes Mínimos de Ruptura Encontrados para o talude de montante para o carregamento final de construção e rebaixamento rápido

SEÇÃO	Caso de Carregamento	Material 5-L Φ' (°)	Tipo de Superfície	F.S. _{Mín} Exigido	F.S. _{Mín} Obtido
Seção de Máxima Altura (E-E)	Final de Construção	34	Circular	1,30	1,51
			Cunha		1,42
		33	Circular		1,50
			Cunha		1,41
	Rebaixamento Rápido	34	Circular	1,20	1,27
			Cunha		1,33
		33	Circular		1,25
			Cunha		1,28

Fonte: CEMIG, 2004

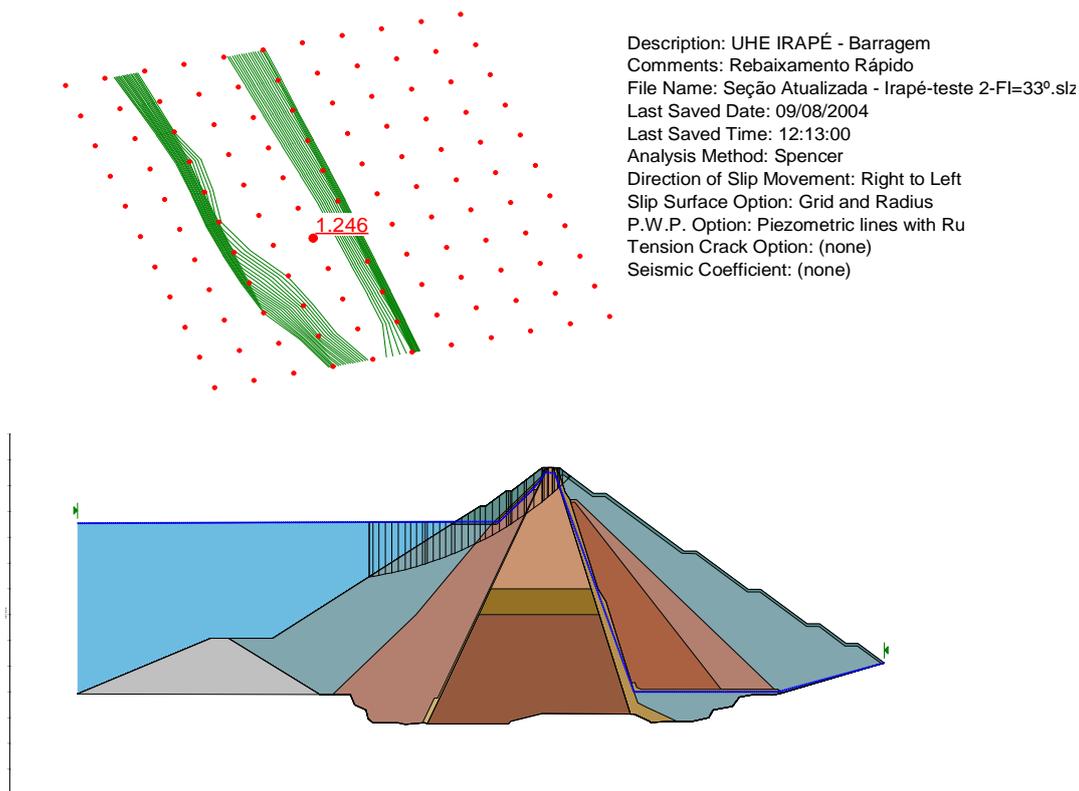


Figura 3.13: Rebaixamento instantâneo do reservatório – $\Phi=33^\circ$, com superfície circular.
 Fonte: CEMIG, 2004.

O circuito hidráulico de geração se localiza na margem esquerda, com três unidades de tomada de água ligadas a três condutos forçados subterrâneos que se conectam às três unidades geradoras. A soleira da tomada d'água está na elevação 457,00m com o canal de adução na elevação 456,00m, podendo operar com uma depleção máxima no reservatório de 39,20m. Os condutos têm seção circular de 4,6m de diâmetro e aproximadamente 76m de comprimento em *shaft* vertical mais 450m em trecho sub-horizontal. A casa de força é a céu aberto, do tipo abrigada. As torres da tomada possuem altura de 59m e são ligadas por uma ponte de acesso, na cota 514,00m.

Ainda na margem esquerda foram implantadas as estruturas de vertimento, compostas por duas estruturas de controle do tipo perfil Creager com comportas do tipo segmento, denominados Vertedouro 1 e Vertedouro 2, e uma estrutura em torre com descarregador de fundo, denominada Extravasor. As três estruturas estão ligadas a túneis escavados em rocha e revestidos em concreto, denominados túneis calha, que encaminham a vazão vertida para o defletor, que promove o salto hidráulico e encaminhamento do jato para a bacia de dissipação, escavada no leito do rio.

A altura da barragem e as estruturas extravasoras foram definidas considerando a afluência ao reservatório da Cheia Máxima Provável (CMP), com uma vazão máxima instantânea de $Q=11.446\text{m}^3/\text{s}$ propiciando uma defluência máxima de $5.862\text{m}^3/\text{s}$ com o nível máximo atingindo a elevação - EL 512,20 (NA Máximo Maximorum). Como o maciço da barragem está na EL 515,36 a sua borda livre mínima corresponde a 3,16m e a sua borda livre normal a 5,36m, visto que o NA máximo normal do reservatório está na EL 510,00. Um muro de concreto na EL 516,50, foi adicionado à barragem aumentando a sua borda livre mínima para 4,30m. Portanto, a barragem atende com grande folga aos critérios de segurança estabelecidos pela ANEEL e Eletrobrás (CEMIG, 2014).

O NA Mínimo Minimorum está na El. 470,80, de modo que o deplecionamento chega a 40m. No canal de Fuga, o NA Mínimo Normal está na El. 330,20 e o NA Máximo Maximorum na El. 340,60.

A Figura 3.14 apresenta a vista de jusante e montante das três torres da tomada d'água, enquanto a Figura 3.15 apresenta uma vista geral das estruturas extravasoras da UHE Irapé.



Figura 3.14: Vista de jusante e montante das 3 torres da tomada d'água. Fonte: CEMIG, 2012



Figura 3.15: Emboque das estruturas vertentes e tomada d'água. Fonte: Lima, 2009

3.7 Instrumentação da UHE Irapé

Este item, que trata da instrumentação da barragem da UHE Irapé, tem como principal referência o Relatório Anual de Análise de Instrumentação de Irapé (CEMIG, 2011). Este Relatório é descrito de maneira sucinta a seguir, com enfoque nas informações mais importantes, e, assim como o item 3.6, será utilizado como referência para as análises de risco apresentadas no capítulo 4.

A barragem de Irapé foi amplamente instrumentada ao longo de 5 seções principais, de acordo com a Figura 3.16. A instrumentação das estruturas foi feita dentro de um padrão aceito internacionalmente e de acordo com a experiência brasileira. O monitoramento vem sendo feito com a periodicidade necessária (VIOTTI *et al.*, 2014).

Os instrumentos utilizados estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Instrumentos instalados na UHE Irapé.

Instrumentos	Quantidade	Descrição
Piezômetros elétricos	50	É um instrumento utilizado para acompanhar a evolução das pressões piezométricas em maciços de barragens de terra, fundações, taludes, etc. É constituído por um transdutor de pressão que converte a pressão d'água no diafragma em um sinal de frequência de vibração da corda do instrumento. O fabricante fornece o fator de calibração de cada aparelho, que correlaciona a pressão d'água no diafragma com a frequência de vibração da corda.
Piezômetros Casagrande (Ombreiras)	4	Piezômetros tipo Casagrande, ou de tubo aberto, ou "Stand Pipe" são utilizados para determinação de poropressões no maciço.
Células de pressão total	33	São instrumentos projetados para medir a pressão total de terra em maciços de barragem, aterros, fundações, entre outros.
Caixa sueca	33	São instrumentos de funcionamento hidráulico, fundamentado no princípio dos vasos comunicantes, utilizados para medida de recalques.
Célula elétrica	38	É um aparelho destinado a medir recalques diferenciais entre dois pontos. O princípio de funcionamento baseia-se na pressão do líquido sobre a membrana do transdutor, provocada pela diferença de altura entre a célula e o reservatório na cabine.

Tabela 3.7: Instrumentos instalados na UHE Irapé (continuação).

Instrumentos	Quantidade	Descrição
Medidor de recalque magnético	19	Utilizado para monitorar os recalques de maciços, construídos ou naturais, fundações, e outros. A medida desses recalques elucida a evolução do adensamento dos materiais que constituem os locais sob controle.
Marco superficial	54	É um pino utilizado para medir, como diz o próprio nome, o deslocamento superficial de um ponto ou local a ser controlado.
Inclinômetro	2	São aparelhos utilizados para medição de deslocamentos horizontais em duas direções ortogonais ao longo da profundidade, nas camadas subsuperficiais.
Medidor de vazão	7	Medidor de Vazão, ou Vertedouro de Vazão (VV), Vertedor ou Descarregador é um dispositivo utilizado para medir e/ou controlar a vazão por um canal. Trata-se de uma barreira colocada perpendicularmente ao fluxo d'água, com uma abertura possuindo determinada forma geométrica. A montante da barreira irá formar-se uma lâmina d'água proporcional à vazão descarregada.
Medidor de pH	22	Também foram instalados medidores de pH, em função da característica geológica regional, onde a rocha apresenta elevado teor de sulfetos. O pH é medido tanto nos medidores de pH quanto nos Inclinômetros.

Fonte: CEMIG, 2005

De acordo com Yassuda (2007), foi verificado o bom desempenho dos instrumentos, posterior ao enchimento do reservatório, além de procedimentos adequados de instalação e condução dos cabos e tubos. Houve a perda de somente 3 caixas suecas (9%), devido a problema no tubo de retorno, e de 11 células de recalque (29%), em função da temperatura alta e gel. O projeto teve como premissa a necessidade de realizar medidas confiáveis de células de pressão e não só a análise de tendência/comparativa. Os equipamentos permitiram uma confrontação com o modelo teórico, sendo que quase todos os parâmetros estão dentro do valor estimado. A tipologia e quantidade de instrumentos foi satisfatória. Foi considerado como elemento “imponderável” a temperatura da água no enrocamento, de até 80°, em função da presença dos compostos sulfurosos.

Segundo Viotti *et al.* (2014), o comportamento estrutural da barragem é satisfatório. Os recalques e deslocamentos horizontais são moderados para uma estrutura do porte de Irapé.

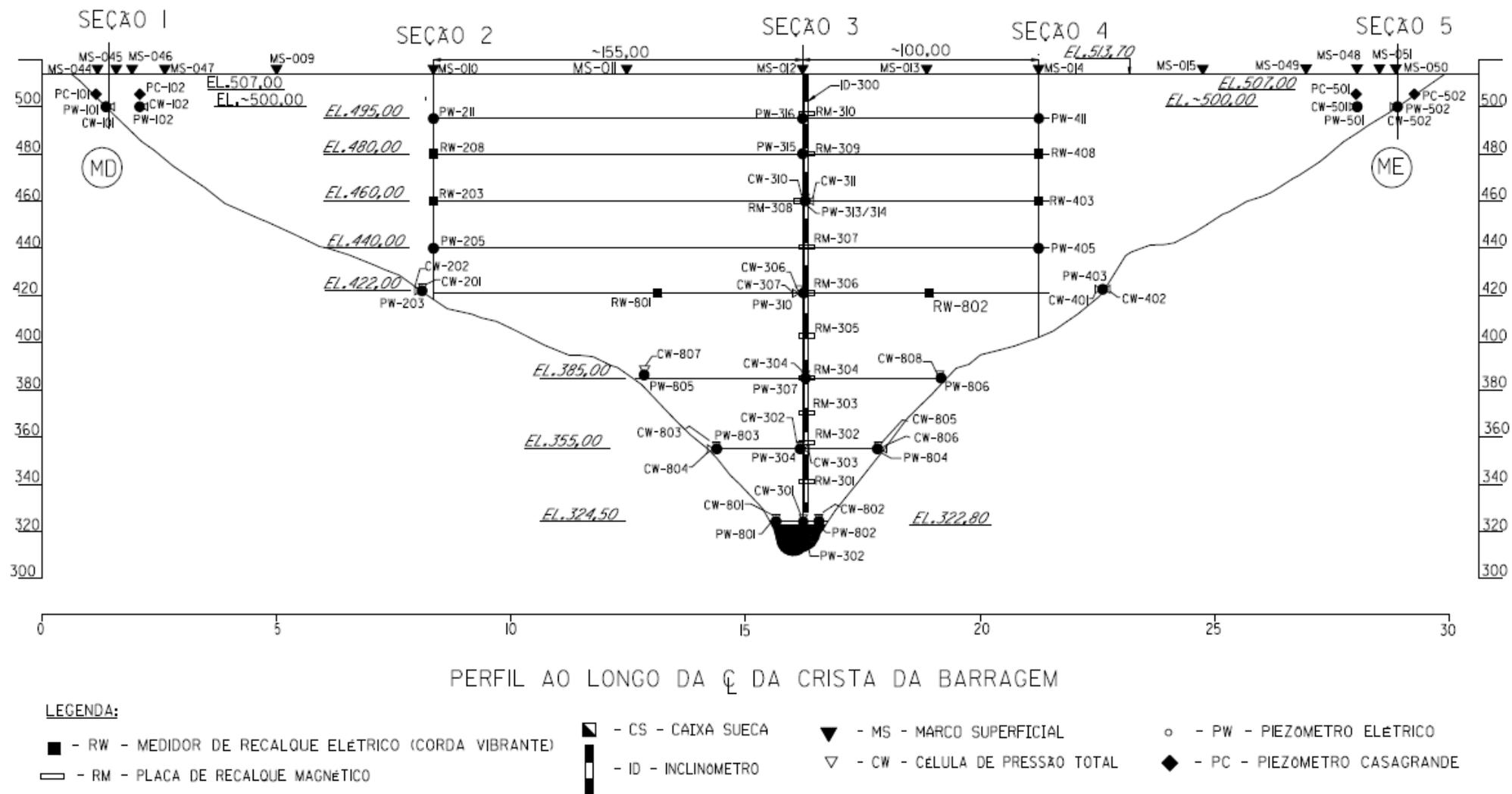
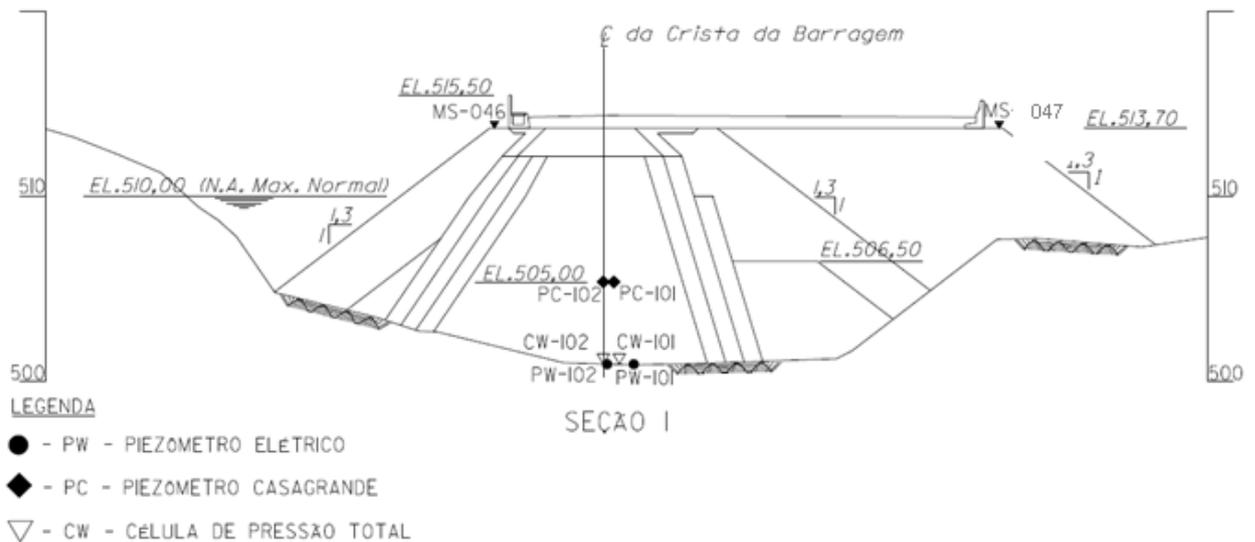


Figura 3.16: Perfil da UHE Irapé com a localização e legenda dos instrumentos. Fonte: CEMIG, 2011

3.7.1 Análise de percolações e pressões totais



3.17: Piezômetros e células de carga da Seção 1. Fonte: CEMIG, 2011

As Figuras 3.17 e 3.18 apresentam os instrumentos instalados nas seções transversais 1 e 5, respectivamente. Os valores verificados nas Seções 1 e 5 estão adequados ao níveis de controle de projeto, sendo que os projetistas adotaram como valor de alerta tensões efetivas inferiores a 20 kPa, válidas para todas as células de pressão total. Apesar dos valores estarem dentro do esperado, as trincas transversais na região da ombreira direita merecem atenção.

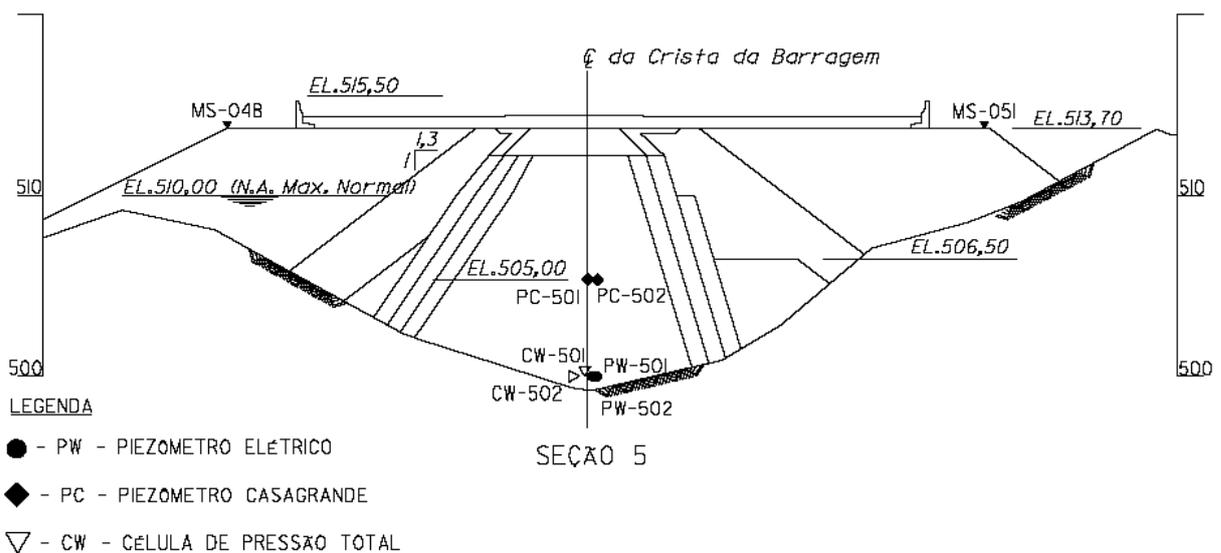


Figura 3.18: Piezômetros e células de carga da Seção 5. Fonte: CEMIG, 2011

É importante observar se aparecem novas trincas ou se há aumento no comprimento e espessura das existentes ou ainda se os piezômetros registram aumento de poropressão.

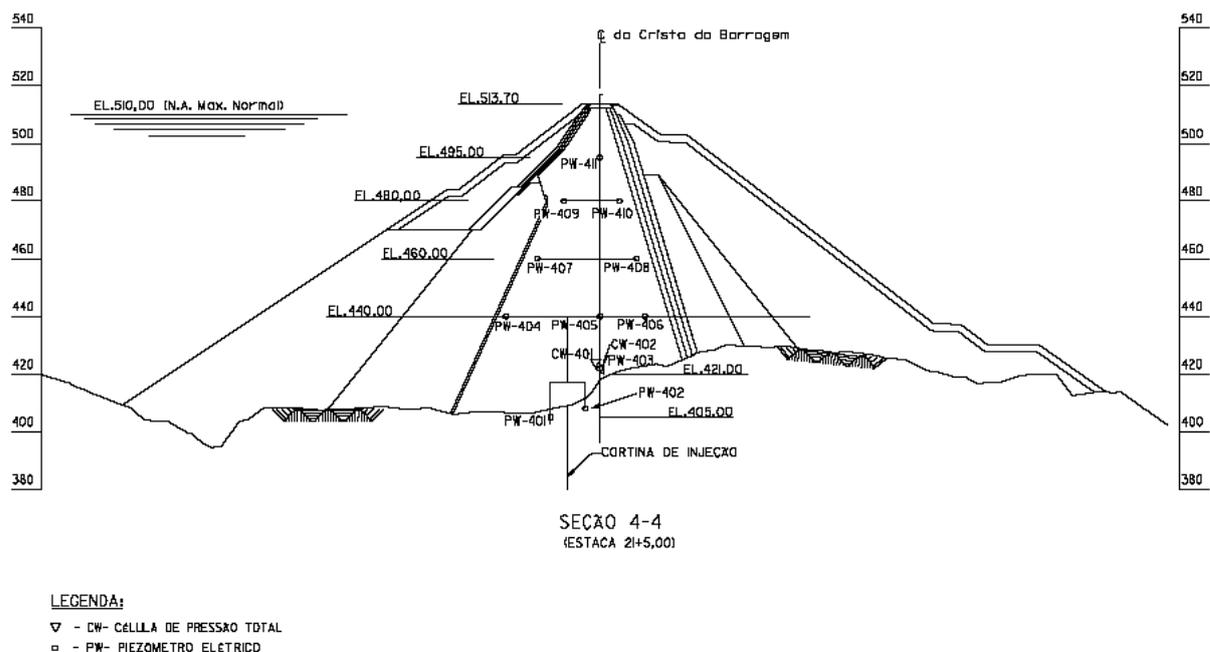


Figura 3.20: Piezômetros e células de carga da Seção 4. Fonte: CEMIG, 2011

A geometria da seção 4, Figura 3.20, é muito semelhante à seção 2 e a disposição dos instrumentos é a mesma. Nesta seção da ombreira esquerda, há um número maior de instrumentos (PWs) apresentando valores mais elevados.

De modo geral, os PWs instalados a montante do núcleo são fortemente influenciados pelo reservatório. Os instrumentos localizados na porção inferior do maciço, mais a jusante, também são influenciados pelo NA do reservatório. Esta situação talvez tenha sua justificativa em uma percolação preferencial longitudinal, através da ombreira esquerda que apresenta uma permeabilidade maior em virtude da pior qualidade do maciço. Os PWs 405 e 406 mais a jusante revelam que a saturação ainda ocorre neste ponto do núcleo, ao passo que os PWs 408 e 410 instalados em elevações mais elevadas, encontram-se estabilizados.

A perda de carga entre os PW401 e 402, localizados antes e depois da cortina de injeção, é de cerca 11,6 m.c.a., maior que a do par PW201/202 indicando que na seção 4 a cortina de injeção foi mais eficiente.

As células CW401 e 402, que medem tensões verticais e horizontais, respectivamente, apresentam contínuas quedas de tensões efetivas sem que haja aumento compatível de poropressão no PW403 correspondente. Isto faz supor que ocorre um alívio de tensões na fundação da ombreira esquerda no sentido longitudinal da barragem. Ressalta-se que ambas as

CWs fornecem valores adequados, acima dos limites de controle mínimos definidos pela projetista.

Comparando as seções 2 e 4, pode-se concluir que a seção 2 comporta melhor que a 4.

Os instrumentos instalados na Seção 3 são apresentados nas Figuras 3.21 e 3.22. No núcleo da barragem de Irapé, na seção de máxima altura, foram empregados três tipos de materiais. Abaixo da elevação 408m o material compactado (3B) é uma mescla de cascalho com solo areno-argiloso. Entre as elevações 408m e 415m o material consta de um solo areno-argiloso (J2) e acima da elevação 415 foi empregado um solo argilo-arenoso (J1).

Na Seção 3 percebe-se claramente a influência do material random “5L” no reforço impermeabilizante do barramento. Ao analisar os piezômetros posicionados mais a montante, percebem-se perdas de carga consideráveis, apesar da frente de saturação na base do maciço ter ocorrido imediatamente à subida do reservatório. Desta forma, os instrumentos instalados a montante da barragem, apesar de bastante associados ao reservatório, apenas os PW309 e PW312, registram níveis piezométricos pouco elevados. Estes PWs, apesar de estarem situados na parte superior do maciço compactado com material J1, estão posicionados numa elevação onde o material "random", a montante do núcleo, tem uma espessura menor, fato que justifica níveis mais altos que os esperados nestes piezômetros.

Observa-se que a saturação da fundação da barragem nas seções 2 e 4 das ombreiras já está estabelecida, enquanto que o PW317 instalado na fundação da seção do leito do rio e o PW301, instalado a montante no núcleo, mostram evolução de subpressão com mesma intensidade.

Estes PWs registram perdas de carga em relação ao reservatório relativamente baixas. Este fato pode ser atribuído a uma percolação pelas ombreiras, que nesta elevação tem um caminho mais longo que nas demais seções, ou pela menor permeabilidade do maciço rochoso no leito do rio, ou ainda por uma maior facilidade de percolação no sentido montante/jusante por alguma feição mais permeável que tenha surgido ao longo do tempo.

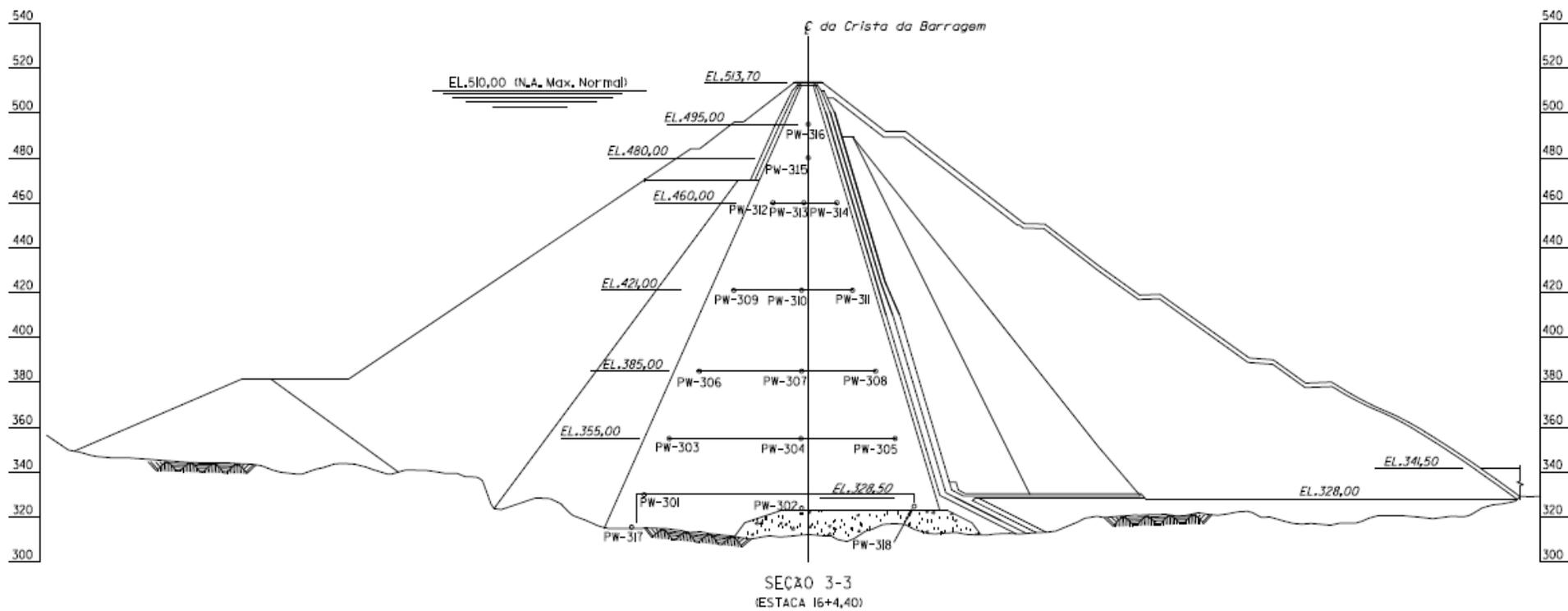


Figura 3.21: Piezômetros da Seção 3. Fonte: CEMIG, 2011

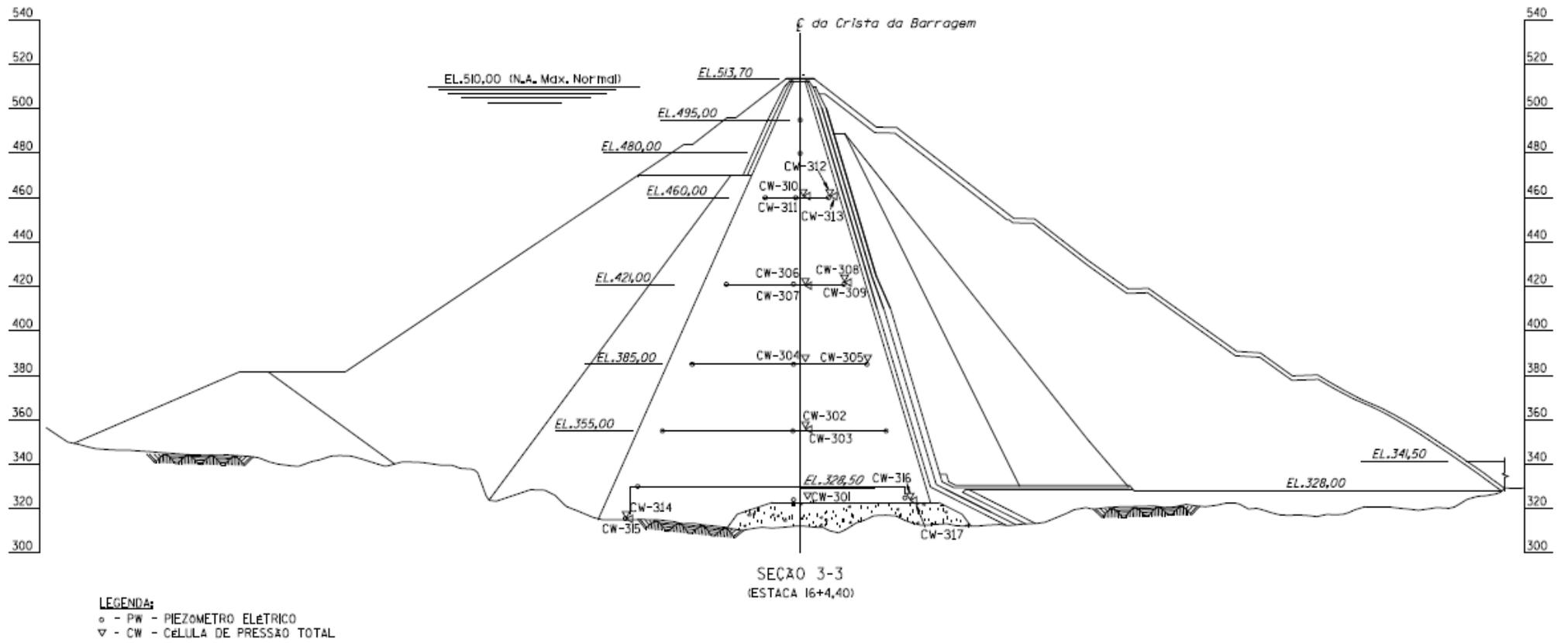


Figura 3.22: Células de pressão total da Seção 3. Fonte: CEMIG, 2011

Os instrumentos localizados no centro e a jusante do núcleo, abaixo da elevação 460m, PWs 304, 305, 307, 308, 310, 311 revelam que a saturação ainda ocorre nesta região, com uma possível estabilização da maioria em curto prazo. Os instrumentos instalados a jusante na parte superior do núcleo já se estabilizaram. Estas observações são normais uma vez que se trata da seção de máxima altura da barragem onde o núcleo é bastante espesso na parte inferior.

Praticamente todos os piezômetros instalados no centro e a jusante do núcleo apresentam valores relativamente altos de poropressão.

A célula CW302, instalada acima da CW301, registra tensões verticais maiores que as registradas na CW301. Esta constatação faz supor que existe um alívio de tensões na base da barragem devido a um arqueamento longitudinal do maciço devido ao formato muito fechado do vale.

Algumas células instaladas a jusante do núcleo registram valores melhores que aqueles determinados teoricamente, como é o caso da CW305. Esta célula deve sofrer influência das transições que uma vez mais rígida que o núcleo concentra mais tensões. O mesmo ocorre na CW308.

Tanto as células verticais e horizontais instaladas na parte superior da barragem registram acréscimo de tensões totais e efetivas o que pode ser justificado pelo movimento longitudinal do maciço no sentido ombreiras/vale do antigo leito do rio ou também pela influência do reservatório quando este está cheio. Esta última hipótese fica mais clara nas células que medem tensão horizontal (PWs 311 e 313).

3.7.2 Análise das vazões

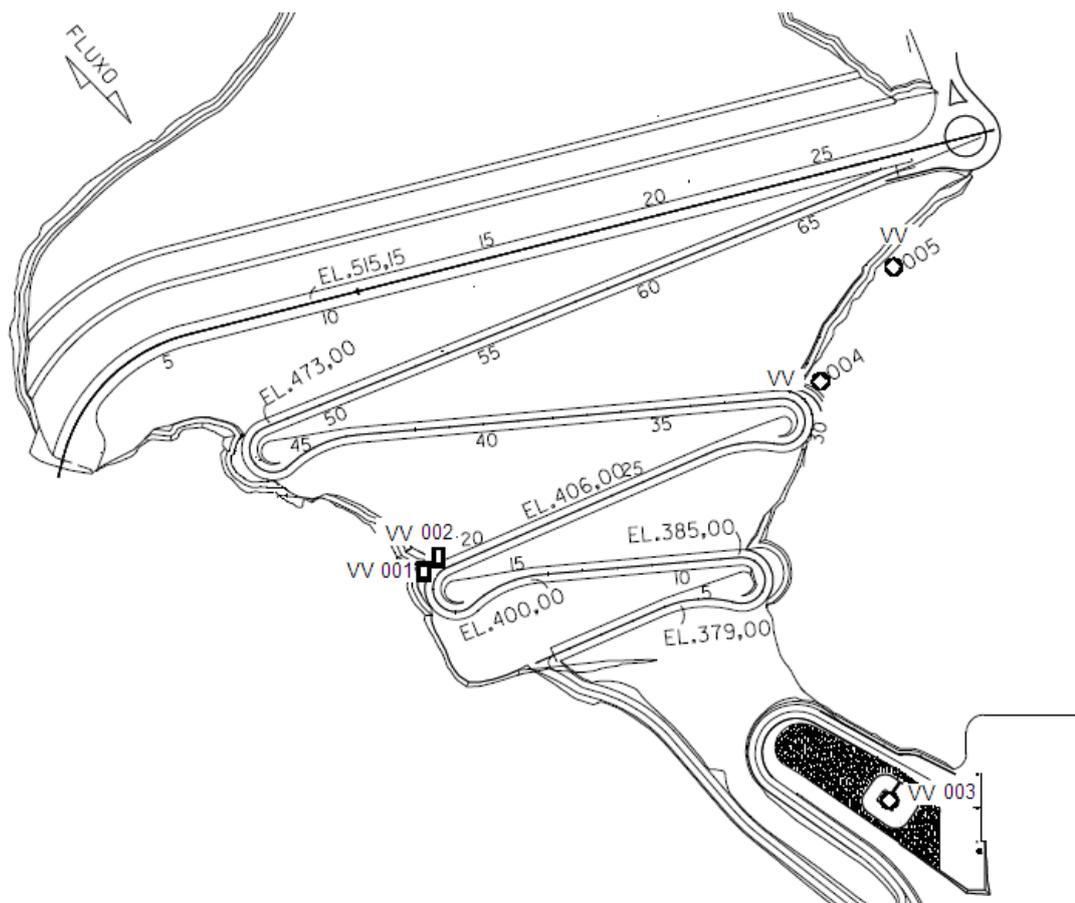


Figura 3.23: Localização dos medidores de vazão. Fonte: CEMIG, 2011

A Figura 3.23 apresenta a localização dos vertedouros de vazão (VV's).

Com relação aos VV002 e VV004, que medem as vazões percoladas de regiões que contém as seções 2 e 4 respectivamente, são observados comportamentos diferentes. Este fato pode ser justificado pelas características geológicas e morfológicas da fundação das duas seções.

O medidor VV004 respondeu rapidamente a evolução do reservatório devido à permeabilidade da margem esquerda ser maior que a da ombreira direita. O VV002 só veio a receber água percolada um ano após o VV004 registrar as primeiras leituras. Ainda assim o VV002 praticamente não registra vazões, apesar dos piezômetros desta seção apresentarem cargas consideradas. Há uma tendência maior de crescimento das vazões medidas pelo VV002, pelo fato dos piezômetros localizados na base a jusante da seção 2, estarem ainda em acréscimos.

Em relação aos VV's instalados no alto das ombreiras, VV001 e VV005, pode-se dizer que o da ombreira direita apresentou vazões em períodos de reservatório cheio, mas em 2010 não houve vazões. Este fato tem coerência quando foi observado que o piezômetro PW502, instalado após a cortina de injeções, vem registrando quedas, traduzindo em uma melhora na permeabilidade da fundação. O VV005 instalado na ombreira esquerda nunca tinha registrado vazões até o último enchimento.

O VV003 é o medidor de vazão mais importante para evidenciar eventuais problemas de fluxo da barragem.

Conforme o Relatório de Interpretação do Comportamento da Barragem de Terra e Enrocamento, CEMIG (2007), os registros indicam vazão da ordem de 18,33 l/s, pouco acima da vazão estimada em projeto.

3.7.3 Análise de deslocamentos horizontais superficiais

De acordo com o trabalho de Aires (2006), que aborda estudos de tensão-deformação da barragem de Irapé e apresenta resultados para o período construtivo da barragem, conforme a Figura 3.24, os deslocamentos registrados especialmente no talude de jusante (em torno de 0,05 a 0,10m) encontram-se compatíveis com os valores aferidos pelos marcos superficiais para o mesmo período. Segundo Aires, o modelo linear-elástico com incrementos, foi empregado em todos os materiais e tenta simular grosseiramente a não linearidade do comportamento tensão deformação dos materiais. Uma das grandes diferenças em relação a um modelo verdadeiramente não linear reside no fato de que este último calcula automaticamente as variações do módulo de rigidez para cada incremento de elementos de acordo com o nível de tensões; ao passo que no modelo adotado, a reavaliação do módulo de elasticidade é feita “a priori” e é independente dos incrementos (ocorrendo, portanto, menos vezes).

De modo geral os deslocamentos horizontais verificados em campo, no sentido longitudinal, indicam tendência de deslocamentos convergindo para o centro do vale. Longitudinalmente os maiores deslocamentos da crista concentram-se nas ombreiras. Os Marcos Superficiais - MSs 014 e 015 já deslocaram 13,5cm enquanto que os MS 010 e 017, movimentaram 12cm. No talude de jusante os deslocamentos máximos foram nos MS023 e 029 com valores em torno de 20cm.

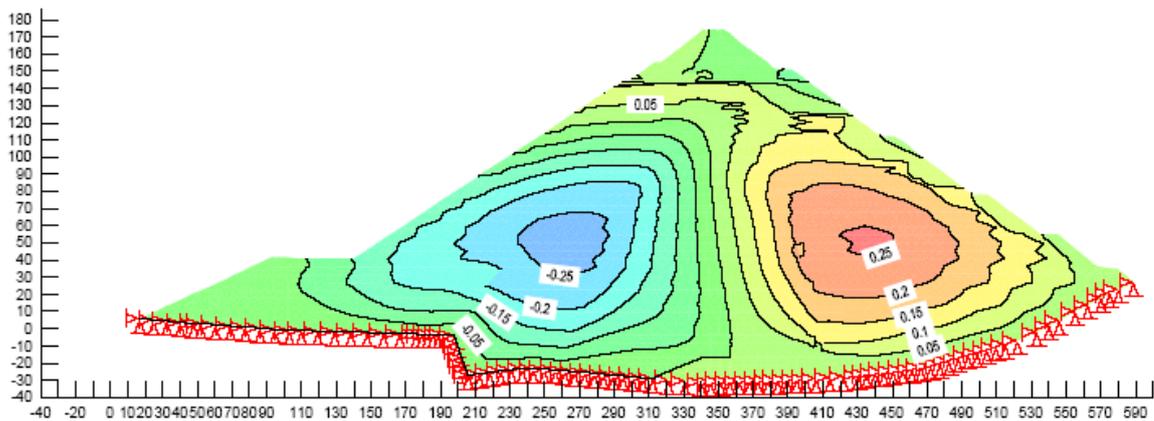


Figura 3.24: Deslocamentos horizontais no final de construção pelo modelo linear-elástico com incrementos. Fonte: Aires, 2006

Os maiores deslocamentos horizontais transversais observados na crista, concentram-se na região central, de máxima altura, registrando, na estaca 16 (MS019) 22,6cm para jusante, enquanto o MS012 apresenta 18,5cm no mesmo sentido. Nas bermas mais baixas, os deslocamentos para jusante tendem à estabilização. Nos MSs instalados na altura média e mais alta da barragem, os deslocamentos suavizam após o enchimento do reservatório, mas sem indício de estabilização.

Os maiores deslocamentos para jusante ocorrem na região de maior altura. O MS 030 registra 70 cm para jusante, mas não se pode afirmar que este seja o maior deslocamento, pois alguns marcos tiveram suas leituras interrompidas durante a construção.

A Figura 3.25 apresenta uma visão geral dos deslocamentos horizontais, enquanto a Figura 3.26 apresenta um deslocamento em escada de acesso à cabine de instrumentação.

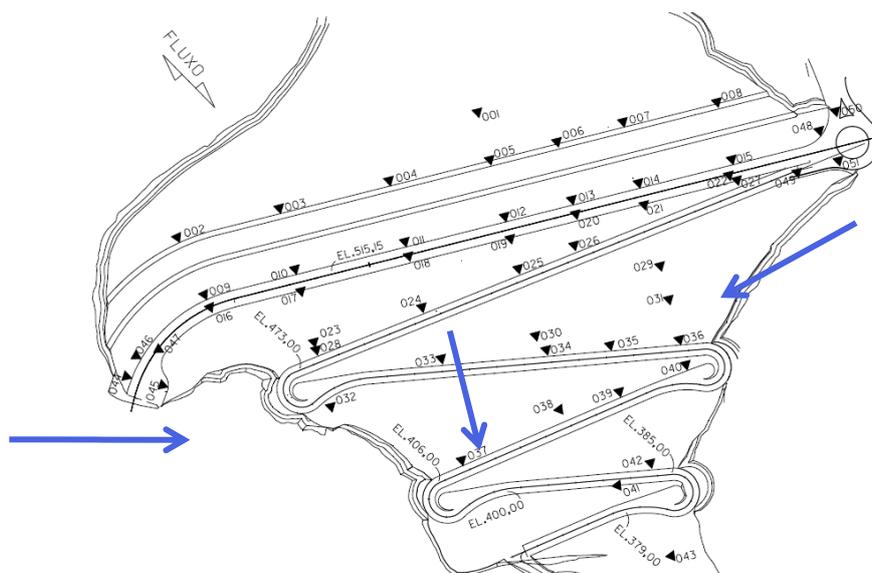


Figura 3.25: Localização dos marcos superficiais e direção dos deslocamentos horizontais superficiais. Fonte: CEMIG, 2012



Figura 3.26: Vista de deslocamento em escada de acesso à instrumentação. CEMIG, 2014

3.7.4 Análise recalques

De acordo com o trabalho de Aires (2006), Figura 3.27, que aborda o período construtivo da barragem, os recalques registrados encontram-se compatíveis com os valores aferidos pelos marcos superficiais para o mesmo período. Os recalques máximos ocorrem a aproximadamente dois terços da altura da barragem, um resultado aceitável. O fato de o maior recalque ocorrer à meia altura da barragem não se aplica neste caso, tendo-se em vista que o zoneamento do núcleo é composto por 3 materiais com diferentes módulos de elasticidade, considerando ainda que, o módulo mais elevado encontra-se no material da base do núcleo.

Ressalta-se a aplicabilidade desta análise mesmo considerando que os dados desta são relativos somente ao período de construção, lembrando que os maiores recalques ocorrem no período construtivo.

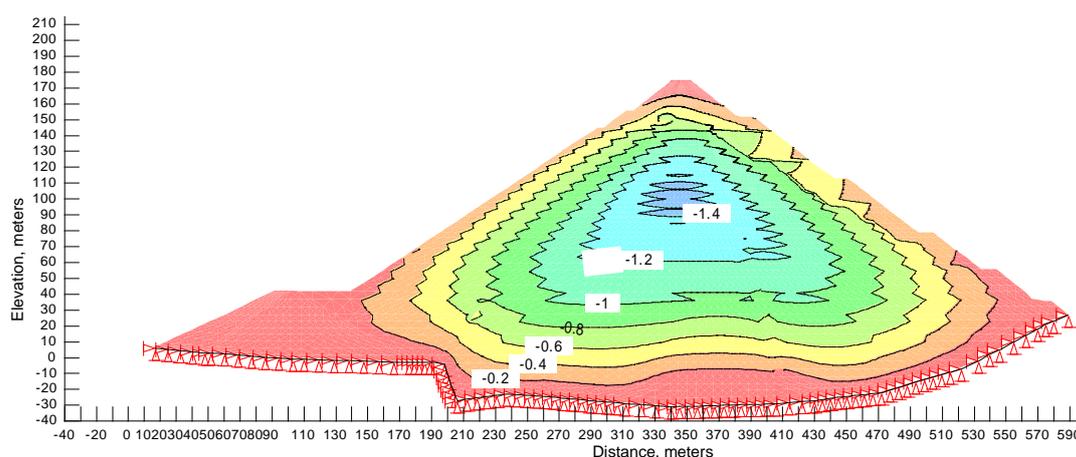


Figura 3.27: Recalques no final de construção pelo modelo linear-elástico com incrementos.

Fonte: Aires, 2006

Os maiores recalques da crista concentram-se em torno da maior altura da barragem. No talude de jusante os maiores recalques são registrados seção de maior altura, (MS 030, 034 e 038) e nos MS 029 e 031 instalados na ombreira esquerda.

Comparando as seções 2 e 4, observam-se valores de recalques superiores na seção 4. Uma possível justificativa pode residir na diferença de geometria da fundação, sendo a seção 2 mais “encaixada” que a seção 4, a qual teria mais facilidade em se “espraçar”, gerando conseqüentemente mais recalques. Outra hipótese a ser considerada seria a de interferências predominantes da tridimensionalidade nestas duas seções, não somente do barramento, mas envolvendo igualmente a configuração do vale. A ocorrência de recalques diferenciais pode favorecer o surgimento de trincas, em decorrência da diferença de rigidez entre o material do núcleo (argiloso) e os espaldares, que são mais rígidos. Deste modo, parte do peso do núcleo é transferido para os espaldares, produzindo um efeito de arco.

Na seção de altura máxima, em relação ao acompanhamento da evolução dos recalques no talude de montante, verificou-se um incremento nos instrumentos em operação, apesar da barragem já ter sofrido vários enchimentos.

No centro do núcleo foram instalados medidores de recalque magnéticos no tubo do inclinômetro. Estes medidores indicam recalques construtivos máximos no topo do terço médio do maciço. O primeiro enchimento contribuiu com, no máximo, cerca de 13% do recalque verificado no terço superior do maciço.

A Figura 3.28 apresenta a localização dos medidores de recalque na seção 3.

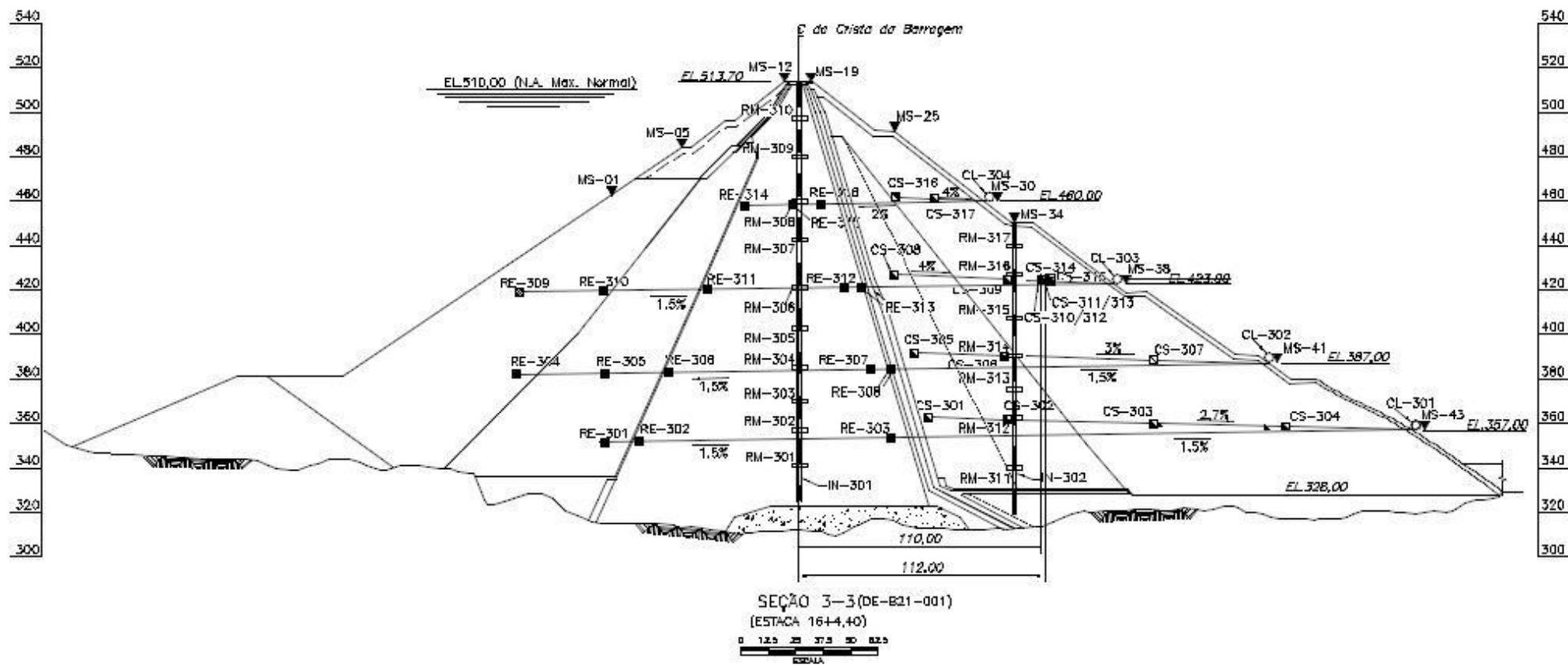


Figura 3.28: Medidores de recalque na seção 3. Fonte: CEMIG, 2011

Os maiores recalques ocorridos a jusante da barragem, foram registrados na CS308 instalada na proximidade da transição. Na El. Superior 460m, também são medidos recalques específicos importantes.

Na seção 3 também observam-se diferenças de valores de recalque oriundos dos diversos tipos de materiais componentes do barramento. Os instrumentos instalados nos enrocamentos, em geral, indicam recalques menores que os do núcleo. No caso da seção 3, o efeito da tridimensionalidade não foi tão importante, de tal forma que em uma modelagem 2D, os resultados foram compatíveis com os obtidos de campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados as análises e resultados referentes à aplicação dos métodos FMEA e ETA para a barragem de Irapé, conforme o estudo de caso apresentado.

4.1 Aplicação do método FMEA

A primeira etapa para a aplicação da FMEA é a estruturação dos sistemas da barragem. A escolha dos sistemas considerados é realizada em função da importância de cada elemento para a definição dos modos de falhas e seus efeitos.

Os sistemas da barragem de Irapé foram escolhidos a partir de dados de projeto, considerando, principalmente, a análise das seções da barragem. A Figura 4.1 apresenta estes sistemas. Já a Figura 4.2, que é uma reprodução da Figura 3.11, apresenta a seção principal da barragem da UHE Irapé, favorecendo, deste modo, a compreensão dos sistemas propostos.

Sistemas - UHE Irapé	
1 - Barragem de Terra-enrocamento	
1.1 - Crista	
1.2 - Enrocamento de jusante	
1.2.1 - Zona 9	
1.2.2 - Zona 6	
1.2.3 - Zona 5/5A	
1.3 - Transições de jusante e montante (zonas 2A*, 3*, 3A*, 4*)	
1.4 - Filtro (zona 2)	
1.5 - Núcleo Impermeável	
1.6 - Rip-Rap (zona 7)	
1.7 - Enrocamento de montante	
1.7.1 - Zona 6	
1.7.2 - Zona 5L	
2 - Concreto de Enchimento	
3 - Fundação	
4 - Ombreira Direita	
5 - Ombreira Esquerda	

Figura 4.1: Sistemas utilizados na FMEA de Irapé.

Para a elaboração dos sistemas, deve-se avaliar o nível de profundidade necessária para as informações, tornando o estudo mais objetivo e eficiente. Sistemas muito detalhados podem demandar muito tempo de análise e nem sempre chega-se a um resultado satisfatório. Já os sistemas muito simplificados podem prejudicar a análise por falta de informações pertinentes.

Tabela 4.1: Materiais constituintes da barragem de Irapé

Sigla do Material	Descrição	Espessura das camadas (cm)
1-J1	Solo argilo - arenoso (jazida 1 – Ombreira direita)	20 - 25
1-J2	Solo areno - argiloso (jazida 2 – Ombreira esquerda)	20 - 25
2	Filtro de areia natural	40
2A*	Areia artificial – transição de montante	40
3*	Transição Fina	40
3A*	Transição média	40
3B	"Cascalho"	40
4*	Transição Grossa	40
5	Enrocamento de Rocha pouco a medianamente decomposta	40
5A	Enrocamento de Rocha medianamente a muito decomposta	40
5L	"Random" – Rocha muito decomposta a saprolito (Lixiviada)	40
6	Enrocamento de Rocha pouco decomposta a sã	80
6B*	Enrocamento de Rocha pouco decomposta a sã	80
7*	Enrocamento de Proteção (Rip-Rap)	120
9*	Enrocamento de revestimento	120

*Material proveniente da pedra Olhos d'água – “isento de sulfetos”. Fonte: Lima, 2009

Diversos tipos de informações podem ser consideradas na FMEA, tais como o acesso ao local, sistema extravasor, tomada de água, existência de barragens a montante, entre outros, favorecendo uma abordagem mais completa da segurança da barragem. A FMEA também pode ser utilizada para análises relacionadas à operação e manutenção eletromecânica, onde é reconhecidamente eficiente. Como este trabalho tem foco em geotecnia, foram consideradas apenas os aspectos relacionados à barragem de terra e enrocamento de Irapé. A aplicação da FMEA considerou o estágio atual da estrutura, tendo como principais referências as inspeções de segurança realizadas na barragem e os relatórios de análise da instrumentação, cujas informações centrais estão apresentadas no estudo de caso do Capítulo 3.

As classificações dos índices de severidade, ocorrência e detecção foram referenciadas na Tabela 2.2 apresentada no capítulo 2, repetida a seguir na Tabela 4.2, seguindo o que foi apresentado por Melo (2014). Nessa tabela foi incluída a numeração de classes (algarismos romanos) para a severidade e ocorrência.

Tabela 4.2: Descrições de incertezas

ÍNDICE DE SEVERIDADE (S)			ÍNDICE DE OCORRÊNCIA (O)			ÍNDICE DE DETECÇÃO (D)	
S _i	Classe S	Efeito	O _i	Classe O	Probabilidade	D _i	Probabilidade
1	I	Muito baixo	1	I	Improvável (< 0,1%)	1	Quase certo
2, 3	II	Baixo	2, 3	II	Remoto (0,1 a 1%)	2	Muito alto
4, 5	III	Médio	4, 5, 6	III	Ocasional (1 a 10%)	3	Alto
6, 7, 8	IV	Grave	7, 8, 9	IV	Provável (10 a 20%)	4	Moderadamente alto
9	V	Muito grave	10	V	Frequente (> 20%)	5	Moderado
10	VI	Catastrófico	..	..	..	6	Baixo
..	..	..	..	..	..	7	Muito baixo
..	..	..	..	..	..	8	Remoto
..	..	..	..	..	..	9	Muito remoto
..	..	..	..	..	..	10	Quase impossível

Fonte: MELO, 2014, adaptado de ESPÓSITO e PALMIER, 2013.

À exemplo de Melo (2014), foi adotado o layout baseado nos trabalhos recentes de Espósito e Palmier (2013) e Portes (2013), que engloba os itens usualmente adotados na metodologia. A Figura 4.3 apresenta um trecho referente ao subsistema principal “barragem”, para o modo de falha "galgamento da barragem". Devido à sua extensão, a tabela completa está disposta no Apêndice A.1.

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1 Barragem de terra-enrocamento												
Conter o reservatório	1 (1) Galgamento da barragem	Formação de processos erosivos externos e abertura de brecha	9	V	Vazão afluente superior à capacidade extravasora	1	I	9	Monitoramento do nível dos afluentes e do reservatório por sistema de telemetria	Detecção	1	9
									Deplecionamento do reservatório e formação de volume de espera	Prevenção		
					Escorregamento de taludes na região do reservatório e formação	1	I	9	Monitoramento da estabilidade dos taludes na região do reservatório	Detecção	3	27
Falha de projeto	1	I	9	Estabilizar os taludes, caso necessário	Prevenção							
							Utilização dos melhores critérios de projeto conhecidos	Prevenção	1	9		

Figura 4.3: Layout utilizado para a análise FMEA

As discussões referentes aos resultados mais importantes de Número Preliminar de Risco (NPR) e criticalidade serão descritos a seguir.

Com relação ao NPR, os valores encontrados variaram entre 4 e 180, sendo que a situação que mais se destaca (correspondente ao valor mais elevado) é o seguinte modo de falha:

- Erosão interna na região da ombreira esquerda (5 (2)).

Desta forma, seguindo a metodologia adotada nesta dissertação, este fenômeno foi selecionado para o desenvolvimento das análises por árvore de eventos, descritas no item 4.2.

Como trata-se de uma barragem instalada em um vale muito encaixado, e com altura significativa, são esperados efeitos de desconfinamento do maciço nos contatos com as ombreiras em decorrência da tendência do maciço de se acomodar na direção e sentido do fundo do vale.

Em Irapé ocorrem também efeitos de arqueamento, tanto na seção transversal quanto longitudinal. O arqueamento da seção transversal tem origem na diferença de rigidez entre o material do núcleo (argiloso) e os espaldares, que são mais rígidos. Deste modo, parte do peso do núcleo é transferido para os espaldares, produzindo um efeito de arco. Já o arqueamento longitudinal tem como principal razão o formato encaixado do vale, como verifica-se na Figura 3.16. Esses efeitos de arqueamento têm potencial para agravar o desconfinamento nas proximidades das ombreiras.

Esta condição já era esperada durante a fase de projeto, de modo que foi utilizado um material mais plástico na região dos contatos do maciço com as ombreiras, a fim de conformar o maciço da barragem ao formato do vale durante a ocorrência dos recalques, proporcionando assim melhor controle do fluxo de água neste local. A mistura de cascalho e argila, que foi empregada na região mais profunda do vale, também tem como finalidade mitigar a ocorrência de recalques diferenciais.

O valor de 180 encontrado para este NPR pode ser justificado da seguinte forma:

- Severidade (9) - Muito grave

Como verificado nos estudos de Foster, Fell e Spannagle (2000), uma parcela significativa das rupturas de barragem têm como causa a ocorrência de piping. Este fato, por si só, já justificaria um valor elevado para a avaliação da severidade. A altura da barragem de Irapé, de 210m, também reforça a adoção deste critério.

- Ocorrência (4) - Ocasional

Os resultados da análise de instrumentação na região da ombreira esquerda, principalmente na seção 4, indicam uma tendência de queda dos valores de tensão efetiva sem que haja aumento compatível de poro-pressão. Este fato confirma a ocorrência de desconfinamento do maciço.

Ratifica-se que as células de pressão total instaladas neste local fornecem valores adequados, acima dos limites de controle definidos pela projetista. Deste modo, mesmo com a redução dos valores horizontais de tensão efetiva, as condições de segurança estão adequadas no momento, sem risco de ruptura hidráulica neste ponto.

- Detecção (5) - Moderado

O medidor de vazão VV004, correspondente à seção 4, apresenta valores estabilizados, dentro dos limites estabelecidos no projeto. A operação adequada deste instrumento é de grande importância para a identificação de processos de piping nesta região, uma vez que indica tanto a vazão quanto o carreamento de materiais particulados. Os piezômetros e células de carga nesta região também operam normalmente, favorecendo a identificação de anomalias.

Este medidor de vazão (VV004), porém, apresenta alguma correlação com o nível do reservatório, o que pode ser justificado pela permeabilidade do maciço rochoso da ombreira esquerda. Deste modo, o valor medido neste instrumento pode apresentar uma interferência externa à seção 4, o que pode influir nas análises.

Como o medidor de vazão VV005, localizado na parte superior da ombreira esquerda, possui poucos registros (normalmente está seco) e aparentemente também apresenta interferência do maciço rochoso nas leituras, considerou-se que o índice de detecção de um processo de piping na ombreira esquerda é moderado.

A matriz de risco elaborada para a barragem de Irapé, conforme a Figura 4.4, apresenta a criticalidade dos modos de falhas mais importantes encontrados na FMEA. Nesta Figura foram considerados os valores de criticalidade superiores a 30, que representam cerca de 13% do total de valores de criticalidade encontrados. O valor mais alto encontrado foi 60, enquanto o mais baixo foi 4.

Ocorrência	V						
	IV						
	III					1(3), 5(1), 5(2)	1(2), 1.2(1)
	II					1(3), 1.7(3), 1.7.2(2), 4(1)	1(2), 1.2(2), 1.2.2(2), 1.2.3(1), 1.2.3(2), 1.7(2), 1.7.1(2), 1.7.2(2)
	I						
		I	II	III	IV	V	VI
		Severidade					

Figura 4.4: Matriz de risco para os elementos mais significativos da barragem de Irapé.

Com relação à criticalidade, verificou-se que a causa que mais afetou o desempenho está relacionada à falhas no sistema de instrumentação. Em Irapé tanto a temperatura elevada, que alcança 80° em alguns locais, quanto o pH ácido afetam o funcionamento de alguns instrumentos, o que pode prejudicar a avaliação do comportamento da barragem. De modo geral, os instrumentos mais afetados são os medidores de recalque elétrico.

Também teve destaque a ocorrência de pressões elevadas em algumas regiões do núcleo, que pode estar associada à instabilidade do maciço. Ressalta-se que os valores de referência para determinação dos limites de poropressão são os dados obtidos em simulações numéricas durante a fase de projeto, sendo frequente que os valores observados em campo sejam divergentes da previsão numérica. Deste modo, ultrapassar estes valores não indica, necessariamente, um indício de mal comportamento. Segundo Viotti *et al.* (2014), o comportamento estrutural da barragem é satisfatório.

O formato encaixado do vale foi outro fator que contribuiu com valores significativos de criticalidade, uma vez que sua Ocorrência é expressiva na barragem da UHE Irapé.

Comparando a criticalidade dos modos de falha com o NPR, verifica-se que a matriz de risco favorece uma visualização da FMEA como um todo, propiciando uma análise rápida das informações. O NPR, porém, ao considerar fatores relacionados à identificação dos modos de falha, proporciona um resultado mais adequado para este trabalho, considerando-se,

principalmente, que a aplicação em Planos de Ação de Emergência demandam respostas rápidas onde a identificação de eventuais problemas é uma etapa primordial. Deste modo, a escolha da metodologia mais adequada varia de acordo com os objetivos propostos para a análise.

Em relação ao Projeto GT490, descrito no item 2.6, o uso do NPR também é o mais indicado, considerando-se que deve ser definido um valor de corte dos modos de falhas mais importantes. Este valor de corte, que pode ser específico para cada barragem, precisa levar em consideração tanto os modos de falhas mais importantes quanto a equipe que irá desenvolver os trabalhos, de forma a viabilizar os estudos. A FMEA, neste caso, deve considerar não só aspectos diretamente relacionados à barragem, mas todos os fatores relacionados à segurança da estrutura, tais como o acesso à instalação, confiabilidade de operação dos equipamentos eletromecânicos, circuito de adução, capacidade de resposta da equipe local, variações das características da bacia hidrográfica e demais fatores que possam interferir na segurança da instalação.

Os valores encontrados para a barragem de Irapé estão condizentes com o trabalho de Melo (2014), que utilizou a mesma metodologia para o desenvolvimento de estudos de FMEA para as barragem de Três Marias e Emborcação. Tanto os resultados de NPR quanto a matriz de risco apresentaram resultados pertinentes ao comportamento verificado em campo.

Algumas medidas podem ser adotadas para reduzir o NPR, atuando principalmente na Ocorrência e Detecção. Quanto à Detecção, as melhorias estão normalmente relacionadas à implantação e adequação de equipamentos de instrumentação, realização de estudos de investigação do comportamento dos materiais, avaliação dos critérios de projeto, aumento da frequência de inspeções visuais e análise de dados. A redução dos valores associados à Ocorrência está normalmente relacionada à realização de obras civis de manutenção e adequação, além da adoção de critérios adequados de projeto.

4.2 Aplicação do método ETA

A análise por árvores de eventos - ETA é normalmente aplicada no contexto da segurança de barragens considerando o comportamento esperado para os diversos modos de falha na condição atual da estrutura, tendo como resultado uma estimativa da probabilidade anual de ruptura.

Para a elaboração das árvores de eventos desta dissertação, porém, foi considerada não a condição atual da estrutura, mas o comportamento mais provável esperado para o fenômeno (modo de falha) caso este venha a se concretizar, de acordo com as particularidades da estrutura. Sendo assim, logicamente os resultados obtidos representam valores hipotéticos elevados e não podem ser diretamente comparados com outros estudos que buscaram estabelecer a probabilidade anual de ruptura por piping, como por exemplo o trabalho de Ladeira (2007).

A abordagem empregada neste trabalho, entretanto, favorece a realização de análises comparativas entre este comportamento previsto para o fenômeno e os resultados esperados após a aplicação de ações preventivas e corretivas no contexto do PAE. A partir do momento que se conhece o comportamento esperado para determinado modo de falha, pode-se simular quais ações de resposta apresentam uma perspectiva de maior eficiência para controlar a evolução do evento indesejado, favorecendo assim o processo de tomada de decisão durante situações críticas.

Conforme descrito na Tabela 3.1., também reproduzida na Tabela 4.3, os valores de probabilidade foram baseados nos descritores adotados por Vick (1992).

Tabela 4.3: Descrições de incertezas

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

(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.

Fonte: Vick, 1992, citado por Foster e Fell, 1999

Como as árvores de eventos desenvolvidas ficaram extensas, elas foram inseridas no apêndice A.2. Normalmente não é recomendado que as árvores sejam muito longas, mas neste trabalho optou-se por este procedimento visando favorecer a localização mais precisa da evolução do fenômeno pelo Coordenador do PAE e a respectiva classificação do nível de perigo da barragem.

Foram considerados os seguintes cenários:

- Árvore de eventos descrevendo o comportamento mais provável esperado para a ocorrência de piping na ombreira esquerda da barragem de Irapé, conforme o Apêndice A.2.1. Esta pode ser considerada a árvore de eventos central do trabalho, que será utilizada como referência para as respectivas comparações;
- Árvore de eventos considerando a aplicação de um filtro invertido no talude de jusante, devidamente dimensionado, capaz de envolver toda a região que apresenta carreamento de partículas, conforme o Apêndice A.2.2;
- Árvore de eventos considerando a aplicação de material vedante a montante da região que apresenta carreamento de partículas, visando reduzir o gradiente hidráulico, conforme o Apêndice A.2.3;
- Árvore de eventos considerando o rebaixamento do reservatório, reduzindo ou eliminando o gradiente hidráulico na região afetada, conforme o Apêndice A.2.4;
- Árvore de eventos considerando o rebaixamento do reservatório, reduzindo ou eliminando o gradiente hidráulico na região afetada, associada à aplicação de filtro invertido a jusante, conforme o Apêndice A.2.5.

A Tabela 4.4 apresenta as justificativas alusivas à escolha de cada probabilidade empregada na árvore de eventos referente ao comportamento esperado para o piping na região da ombreira esquerda, tendo como referência as informações descritas no estudo de caso da barragem da UHE Irapé (Capítulo 3).

Tabela 4.4: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, com base no estudo de caso

Árvore de eventos do comportamento esperado para o piping		
	Valor	Justificativa
p1 (1)	0.9	Como se trata de um vale muito encaixado, é provável que ocorra uma tendência de deslocamento do maciço, na região das ombreiras, em direção ao fundo do vale. Esta tendência pode ser confirmada nas análises de deslocamentos horizontais e de recalques, nos itens 3.7.3 e 3.7.4.
p1 (2)	0.1	Complemento do ramo p1(1). É improvável que não exista tendência de deslocamento do maciço na direção do fundo do vale.
p1 (3)	0.9	Este valor foi utilizado pois existe uma tendência de redução dos valores de tensão total e efetiva na ombreira esquerda, como verificado nos itens 3.7.1. Cabe ressaltar que os valores medidos estão dentro dos limites estabelecidos em projeto. Porém, caso o evento de piping venha a se desenvolver, é provável que ocorra queda nos valores de tensão total e efetiva.
p1 (4)	0.1	Complemento do ramo p1(3).
p1 (5)	0.9	Caso ocorra deslocamento do maciço da barragem na região da ombreira em direção ao fundo do vale, seguido de quedas significativas dos valores de tensão efetiva (acima dos limites estabelecidos), é provável que ocorra fraturamento hidráulico, com a formação de caminhos preferenciais e elevação das poropressões até a proximidade do filtro. Este efeito é esperado tanto em função do formato do vale, como pelos processos de arqueamento.
p1 (6)	0.1	Complemento do ramo p1(5).
p1 (7)	0.9	A partir do momento que existe formação de caminhos preferenciais e aumento de poropressões, é provável que ocorra aumento de percolação na região da ombreira. O fato do VV004 operar normalmente, apesar de eventual interferência como nível do reservatório, também reforça esta informação.
p1 (8)	0.1	Complemento do ramo p1(7). É improvável que ocorra colmatagem do filtro e redução de percolação, visto que foram utilizados critérios adequados de projeto.
p1 (9)	0.5	Considerando que foram utilizados critérios adequados de projeto para o dimensionamento do filtro, e que a areia pode se moldar ao formato do vale em caso de deslocamentos, considera-se incerta a possibilidade de falha no filtro e início de formação de processo de piping. Ressalta-se que, caso os deslocamentos sejam acentuados, associados também os efeitos de arqueamento, estas falhas podem ocorrer.
p1 (10)	0.5	Complemento do ramo p1(9).
p1 (11)	0.9	Caso exista uma elevação de poropressão, associada a um mal comportamento do filtro e início de piping, é provável que ocorra aumento de vazão e carreamento de materiais particulados (progressão do piping). Este fato pode ser reforçado pela altura significativa do barramento e volume do reservatório.
p1 (12)	0.1	Complemento do ramo p1(11). É improvável que movimentações de massa decorrentes do processo de formação de piping interrompam o fenômeno.
p1 (13)	0.9	Considerou-se provável a possibilidade de colapso da crista e formação de brecha, pois o tamanho do reservatório, durante uma ocorrência de piping, tende a produzir grandes aberturas que levam ao colapso da crista. A distribuição de tensões na região da ombreira e os efeitos de arqueamento longitudinal podem amenizar este processo, mas ainda assim adotou-se a probabilidade de 0,9 para este efeito.
p1 (14)	0.1	Complemento do ramo p1(13).
p1 (15)	0.99	Caso ocorra o colapso da crista e formação de brecha, é quase certo que ocorrerá a ruptura da barragem.

Tabela 4.4: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, com base no estudo de caso (continuação)

Árvore de eventos do comportamento esperado para o piping		
	Valor	Justificativa
p1 (16)	0,01	Complemento do ramo p1(15). É quase impossível que o colapso da crista interrompa o processo de piping.
p1 (17)	0,9	Mesmo que não ocorra o colapso da crista, é provável que o piping leve ao rompimento da barragem. Este fato somente não aconteceria caso o piping ocorra em uma altura muito elevada, e o rebaixamento do reservatório paralisasse o processo.
p1 (18)	0,1	Complemento do ramo p1(17).
p1 (19)	0,5	Os fatores de segurança estabelecidos em projeto são superiores aos mínimos exigidos pela legislação. Deste modo, mesmo que o filtro esteja colmado e ocorra elevação dos valores de poropressão, considerou-se incerta a ocorrência de perda de estabilidade local.
p1 (20)	0,5	Complemento do ramo p1(19).
p1 (21)	0,9	Caso ocorra perda da estabilidade local associada à colmatação do filtro, é provável que os deslocamentos causem fissuras no filtro, levando ao carregamento de partículas do solo.
p1 (22)	0,1	Complemento do ramo p1(21).
p1 (23)	0,9	Caso ocorram fissuras no filtro e início de processo de piping, é provável que ocorra aumento de vazão e carregamento de materiais particulados (progressão do piping). Este fato pode ser reforçado pela altura significativa do barramento e volume do reservatório.
p1 (24)	0,1	Complemento do ramo p1(23). É improvável que movimentações de massa decorrentes do processo de formação de piping interrompam o fenômeno.
p1 (25)	0,9	Considerou-se provável a possibilidade de colapso da crista e formação de brecha, pois o tamanho do reservatório, durante uma ocorrência de piping, tende a produzir grandes aberturas que levam ao colapso da crista. A distribuição de tensões na região da ombreira e os efeitos de arqueamento longitudinal podem amenizar este processo, mas ainda assim adotou-se a probabilidade de 0,9 para este efeito.
p1 (26)	0,1	Complemento do ramo p1(25).
p1 (27)	0,99	Caso ocorra o colapso da crista e formação de brecha, é quase certo que ocorrerá a ruptura da barragem.
p1 (28)	0,01	Complemento do ramo p1(27). É quase impossível que o colapso da crista interrompa o processo de piping.
p1 (29)	0,9	Mesmo que não ocorra o colapso da crista, é provável que o piping leve ao rompimento da barragem. Este fato somente não aconteceria caso o piping ocorra em uma altura muito elevada, e o rebaixamento do reservatório paralisasse o processo.
p1 (30)	0,1	Complemento do ramo p1(29).

As Tabelas de 4.5 a 4.8 apresentam as justificativas das probabilidades de evolução do fenômeno de piping considerando as respectivas intervenções realizadas na estrutura. Para favorecer a leitura, são apresentadas apenas as justificativas das notas que sofreram algum tipo de alteração em relação à Tabela 4.4.

Estas avaliações são ainda mais subjetivas que aquelas empregadas na Tabela 4.4, quando foram utilizadas informações referentes às características e ao comportamento da barragem para avaliar a maneira mais provável de evolução do modo de falha.

Deste modo, os valores adotados para as tabelas a seguir dependem ainda mais da interpretação adotada pelos autores. Este fato, porém, não reduz a funcionalidade da metodologia, desde que sejam adotados critérios semelhantes para o desenvolvimento das ETA's. Se esta condição for respeitada, as análises comparativas apresentarão resultados pertinentes.

Tabela 4.5: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, considerando o comportamento esperado para o piping após a aplicação de filtro a jusante

Árvore de eventos do comportamento esperado para o piping após a aplicação de filtro a jusante		
	Valor	Justificativa
p2 (11)	0,01	Após a aplicação de um filtro invertido no talude de jusante, devidamente dimensionado, capaz de envolver toda a região que apresenta carreamento de partículas, espera-se que seja quase impossível a progressão do piping. A literatura aponta que, mesmo com gradientes elevados, não ocorre carreamento de partículas quando o filtro é devidamente dimensionado. Cabe ressaltar, porém, que a aplicação deste tipo de intervenção em uma barragem de enrocamento de grande dimensão pode ser complexa e demandar um tempo significativo. Deste modo, deve-se avaliar a velocidade de evolução do piping em relação ao tempo previsto para implementar esta intervenção.
p2 (12)	0,99	Complemento do ramo p2(11). Caso a intervenção proposta seja devidamente implementada, é quase certo que o piping não irá progredir.
p2 (23)	0,01	Após a aplicação de um filtro invertido no talude de jusante, devidamente dimensionado, capaz de envolver toda a região que apresenta carreamento de partículas, espera-se que seja quase impossível a progressão do piping. A literatura aponta que, mesmo com gradientes elevados, não ocorre carreamento de partículas quando o filtro é devidamente dimensionado. Cabe ressaltar, porém, que a aplicação deste tipo de intervenção em uma barragem de enrocamento de grande dimensão pode ser complexa e demandar um tempo significativo. Deste modo, deve-se avaliar a velocidade de evolução do piping em relação ao tempo previsto para implementar esta intervenção.
p2 (24)	0,99	Complemento do ramo p2(23). Caso a intervenção proposta seja devidamente implementada, é quase certo que o piping não irá progredir.

Tabela 4.6: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, considerando o comportamento esperado após a aplicação de material vedante no talude de montante

Árvore de eventos do comportamento esperado para o piping após a aplicação de material vedante no talude de montante		
	Valor	Justificativa
p3 (11)	0,5	Após a aplicação de material vedante no talude de montante, ocorre um aumento da distância percorrida através do maciço da barragem pela água, reduzindo o gradiente hidráulico. O material lançado pode ainda colmatar os caminhos preferenciais no maciço. Caso o filtro não esteja operando de maneira correta, porém, é incerto que estas ações tenham um resultado adequado, já que existe a tendência de carreamento de partículas de solo ao longo do tempo. Apesar de ser menos eficiente a longo prazo, este tipo de medida tem uma aplicação mais simples e rápida que a implantação de um filtro invertido no talude de jusante. Pode-se avaliar também o uso de materiais geossintéticos para esta finalidade.
p3 (12)	0,5	Complemento do ramo p3(11).
p3 (23)	0,5	Após a aplicação de material vedante no talude de montante, ocorre um aumento da distância percorrida através do maciço da barragem pela água, reduzindo o gradiente hidráulico. O material lançado pode ainda colmatar os caminhos preferenciais no maciço. Caso o filtro não esteja operando de maneira correta, porém, é incerto que estas ações tenham um resultado adequado, já que existe a tendência de carreamento de partículas de solo ao longo do tempo. Apesar de ser menos eficiente a longo prazo, este tipo de medida tem uma aplicação mais simples e rápida que a implantação de um filtro invertido no talude de jusante. Pode-se avaliar também o uso de materiais geossintéticos para esta finalidade.
p3 (24)	0,5	Complemento do ramo p3(23).

Tabela 4.7: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, considerando o comportamento esperado após o rebaixamento do reservatório

Árvore de eventos do comportamento esperado para o piping após o rebaixamento do reservatório		
	Valor	Justificativa
p4 (7)	0,1	A partir do rebaixamento do reservatório anterior ao início do processo de piping, o gradiente hidráulico na região afetada é reduzido ou eliminado, sendo improvável o aumento da percolação na região da ombreira. Cabe ressaltar que o rebaixamento do reservatório para profundidades maiores pode ser lento, sendo que esta operação é restrita ao NA mínimo minimorum (cota 470,80m) quando são utilizados os mecanismos previstos originalmente no projeto. Durante o procedimento, deve-se avaliar o comportamento do talude de montante, pois nem sempre as condições são as mesmas daquelas verificadas em projeto.
p4 (8)	0,9	Complemento do ramo p4(7). Com o rebaixamento do reservatório é provável que não ocorra aumento de percolação de água.
p4 (11)	0,1	O rebaixamento do reservatório em 40m é bastante significativo para a ombreira esquerda, reduzindo o gradiente e a força de percolação. Deste modo, considerou-se improvável que o piping tenha progressão nestas condições.
p4 (12)	0,9	Complemento do ramo p4(11). Com o rebaixamento do reservatório é provável que não ocorra a progressão do piping.

Tabela 4.8: Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA, considerando o comportamento esperado após o rebaixamento do reservatório associado à implantação de um filtro invertido no talude de jusante

Árvore de eventos do comportamento esperado para o piping após o rebaixamento do reservatório associado à implantação de um filtro invertido a jusante		
	Valor	Justificativa
p5 (7)	0,1	A partir do rebaixamento do reservatório anterior ao início do processo de piping, o gradiente hidráulico na região afetada é reduzido ou eliminado, sendo improvável o aumento da percolação na região da ombreira. Cabe ressaltar que o rebaixamento do reservatório para profundidades maiores pode ser lento, sendo que esta operação é restrita ao NA mínimo minimorum (cota 470,80m) quando são utilizados os mecanismos previstos originalmente no projeto. Durante o procedimento, deve-se avaliar o comportamento do talude de montante, pois nem sempre as condições são as mesmas daquelas verificadas em projeto.
p5 (8)	0,9	Complemento do ramo p5(7). Com o rebaixamento do reservatório é provável que não ocorra aumento de percolação de água.
p5 (11)	0,01	O rebaixamento do reservatório, que reduz o gradiente e a força de percolação, associado à implantação de um filtro invertido devidamente dimensionado no talude de jusante tornam quase impossível que o piping tenha progressão nestas condições.
p5 (12)	0,99	Complemento do ramo p5(11). Com o rebaixamento do reservatório é quase certo que não ocorra a progressão do piping.

Verificou-se que a aplicação do método pode ser rápida, dinâmica e eficiente, desde que exista um conhecimento prévio sobre a estrutura e os modos de falha. Os resultados obtidos neste estudo, que tem como principal foco a manutenção das condições de segurança da barragem durante situações emergenciais, podem ainda ser cruzados com outras informações pertinentes, a saber: a viabilidade de implantação das respectivas medidas no sítio da barragem, de acordo com as condições locais, ou o tempo necessário para cada ação de resposta. Estas medidas, porém, não foram consideradas nesta dissertação, ficando a cargo do responsável pelo processo de tomada de decisão.

A Tabela 4.9 apresenta, a grosso modo, uma visualização rápida das probabilidades encontradas para cada ramo das ETA's que leva à ruptura da barragem. Apresenta também a soma destas probabilidades para cada cenário, assim como uma análise comparativa entre o valor do comportamento esperado para o fenômeno e os valores obtidos após a adoção das respectivas ações emergenciais propostas.

Tabela 4.9: Tabela com os resultados obtidos

Cenário	P_{E1}	P_{E2}	P_{E3}	P_{E4}	Somatória	Relação entre valor inicial e final
Comportamento mais esperado para a ocorrência de piping na ombreira esquerda da barragem de Irapé.	$2,6 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$3,15 \times 10^{-1}$	
Aplicação de um filtro invertido no talude de jusante, devidamente dimensionado, capaz de envolver toda a região que apresenta carreamento de partículas.	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-5}$	$3,51 \times 10^{-3}$	89,7
Aplicação de material vedante a montante da região que apresenta carreamento de partículas, visando reduzir o gradiente hidráulico.	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,69 \times 10^{-1}$	1,9
Rebaixamento do reservatório, reduzindo ou eliminando o gradiente hidráulico na região afetada.	$3,2 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-4}$			$3,53 \times 10^{-3}$	89,1
Rebaixamento do reservatório, reduzindo ou eliminando o gradiente hidráulico na região afetada, associada à aplicação de filtro invertido a jusante.	$3,2 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-5}$			$3,52 \times 10^{-4}$	893,8

Como esperado, percebe-se que o valor mais elevado de probabilidade ocorre em relação à descrição do fenômeno hipotético de ocorrência de piping pela ombreira esquerda da barragem de Irapé. À medida que foram simulados cenários considerando a aplicação de medidas corretivas e preventivas previstas no PAE, percebe-se a redução da probabilidade de ocorrência de uma ruptura, conforme a ação adotada e o momento em que é aplicada. As árvores demonstram que, assim como nas situações reais, quanto mais rápida for implantada a ação de resposta, e quanto maior sua eficiência, menor será a possibilidade de ocorrência de uma ruptura de barragem.

O fato dos valores numéricos da Tabela 4.9 apresentarem a mesma base é apenas uma coincidência deste estudo de caso.

Nestas simulações, que desconsideram aspectos como custo e tempo de implantação, verificou-se que a aplicação de material vedante na região de montante mostrou-se a opção menos favorável em termos de eficiência. Ainda assim, é uma técnica que proporcionou uma redução estimada do risco aproximadamente pela metade.

A implantação de um filtro invertido a jusante apresentou resultado semelhante ao rebaixamento do reservatório, com redução estimada do risco da ordem de 90 vezes. Ressalta-se que o rebaixamento do reservatório simulado ocorreu em uma etapa anterior à implantação

do filtro invertido. A instalação de um filtro invertido devidamente dimensionado é uma das medidas mais efetivas para controle de piping, uma vez que permite a percolação de água sem o respectivo arraste de finos. É, normalmente, mais eficiente que o rebaixamento do reservatório, dependendo da profundidade da ocorrência do piping. O fato desta medida ter sido simulada em etapa posterior ao rebaixamento pode justificar a obtenção de resultados semelhantes.

A atuação conjugada de rebaixamento do reservatório com a implantação de um filtro invertido na área a jusante da surgência tornou o risco cerca de novecentas vezes menor que a condição inicial, sendo, portanto, a melhor opção entre os cenários avaliados. Desse modo, verifica-se que o efeito de ações conjuntas não é, necessariamente, equivalente à soma dos efeitos individuais, podendo ser bastante benéfico em relação ao resultado final.

Como observado no decorrer deste capítulo, as árvores de eventos podem favorecer não só a avaliação do comportamento atual das barragens, como é geralmente utilizada, mas também a visualização e análise da evolução mais provável para determinados modos de falha, como apresentado no Apêndice A.2.1.

Este tipo de estudo favorece ainda a realização de avaliações comparativas entre diversas ações de resposta passíveis de serem utilizadas caso o modo de falha venha a se desenvolver, conforme o Apêndice de A.2.2 a A.2.5. As possibilidades de combinações são ilimitadas, e devem ser definidas de acordo com a visão dos responsáveis e com os recursos disponíveis. Deste modo, estas análises têm potencial significativo para serem utilizadas em apoio ao processo de tomada de decisão durante situações emergenciais envolvendo barragens, favorecendo a escolha das ações de resposta mais eficientes para controlar ou eliminar o risco. A condição ideal é que estes estudos sejam desenvolvidos com antecedência, como ação preventiva, ainda que possa ser utilizado também durante a ocorrência de situações emergenciais, desde que exista um conhecimento prévio adequado.

Este trabalho teve como foco a realização de estudos referentes a uma eventual ocorrência de piping na região da ombreira esquerda da barragem da UHE Irapé, porém a metodologia aplicada pode ser utilizada em outras estruturas considerando também diferentes cenários, desde que as peculiaridades de cada barragem sejam ser avaliadas caso a caso.

Cabe reforçar a importância destas avaliações serem realizadas por profissionais devidamente qualificados, com vasta experiência no assunto, considerando ainda a participação de equipes

multidisciplinares, e que o trabalho tenha como foco não impor riscos inaceitáveis para a população de jusante.

Este tipo de informação também tem grande utilidade para a realização de treinamentos, uma vez que leva os responsáveis a refletir sobre os diversos aspectos relacionados à segurança da barragem.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A metodologia proposta neste trabalho demonstra que técnicas de análise de risco podem ser utilizadas como auxílio ao processo de tomada de decisão relacionado ao PAE de barragens. Estas técnicas podem tornar este processo mais rápido e confiável, quando utilizados critérios adequados de avaliação. Deste modo, entende-se que o resultado final está de acordo com a justificativa apresentada.

A aplicação da técnica FMEA para identificação dos aspectos mais críticos da barragem e priorização dos estudos complementares realizados por ETA mostraram-se adequadas, sendo que os resultados obtidos são representativos do comportamento verificado em campo na barragem de Irapé. Esta metodologia de priorização também poderá ser utilizada no contexto do Projeto GT490, a fim de identificar quais árvores de eventos serão elaboradas para cada barragem, proporcionando uma abordagem representativa e viável para a implantação do sistema PAEWEB nas barragens gerenciadas pela CEMIG GT. A divisão dos sistemas e subsistemas da FMEA devem ser bem avaliadas, pois refletem diretamente no resultado final. A simplificação destes sistemas podem esconder eventuais falhas, enquanto um grande detalhamento pode inviabilizar a análise.

Com relação à barragem da UHE Irapé, cabe ressaltar que a estrutura está, no momento, em condições adequadas de segurança e não apresenta indícios de mau comportamento. A barragem atende a todos os critérios legais e normativos, além de ser devidamente mantida pela CEMIG GT, que possui uma equipe especializada em engenharia de segurança de barragens cuja atuação engloba os três pilares da gestão de segurança, que são:

- Monitoramento, realizado por meio de inspeções periódicas e instrumentação;
- Manutenção civil, visando manter a segurança estrutural e funcional;
- Plano de Ação de Emergência, para atuação em eventuais situações críticas.

Quanto à metodologia desenvolvida neste trabalho para a construção de árvores de eventos, que avalia o comportamento mais provável esperado para um determinado modo de falha, com a respectiva análise comparativa entre os efeitos proporcionados por diversas ações emergenciais, verificou-se que o resultado foi bastante satisfatório.

Estas árvores de eventos podem ser utilizadas para situar as pessoas intervenientes no PAE em relação à evolução do fenómeno, apresentando os efeitos mais prováveis esperados no futuro e favorecendo as classificações de níveis de perigo da estrutura. Deste modo, pode auxiliar também na identificação do momento mais adequado para a emissão de sinais de alerta em caso de risco elevado de ruptura.

Além disso, as análises comparativas mostraram-se eficientes para avaliar quais ações de resposta são mais pertinentes de serem adotadas na barragem para reduzir o risco de acidente. Sendo assim, as informações disponibilizadas neste estudo representam um instrumento para auxílio ao processo de tomada de decisão no contexto do PAE de barragens.

A análise empregada nesta dissertação pode representar um diferencial importante em relação aos modelos que têm sido tradicionalmente utilizados nos PAE's de barragens. Apesar destes documentos tradicionais serem de grande valia durante as situações emergenciais, muitas vezes não apresentam de forma clara a evolução dos cenários emergenciais nem as melhores ações de resposta para mitigar uma condição de risco.

Os estudos de FMEA, que antecedem a elaboração das ETA's, também contribuem efetivamente para a identificação de pontos críticos nas estruturas, favorecendo o gerenciamento de riscos. O uso de técnicas de gerenciamento de riscos também é diretamente favorável aos proprietários de barragens sob o aspecto econômico, reduzindo o custo de seguros obrigatórios. Este assunto está sendo discutido no Projeto de Lei 6259/2013, que propõe seguro obrigatório para barragens (BRASIL, 2013).

Cabe ressaltar que a avaliação individual das probabilidades encontradas em cada árvore de evento elaborada nesta dissertação pode ser pouco representativa. Os resultados obtidos também não podem ser diretamente comparados com as ETA's usualmente elaboradas para avaliar a probabilidade anual de ruptura, uma vez que utilizam metodologias diferentes.

As análises de natureza qualitativa devem ser devidamente justificadas e registradas, favorecendo o processo de reavaliação e melhoria contínua. Segundo Melo (2014), o julgamento de engenharia (qualitativo), apesar da sua aparente fragilidade por refletir o conhecimento de que se dispõe sobre os aspectos avaliados, é um método formalmente reconhecido para estimativa das probabilidades de falha nas análises de risco realizadas em barragens. Para esta dissertação, considerando a metodologia adotada, verificou-se que as análises qualitativas apresentaram uma boa resposta. Deve-se considerar ainda que o uso de

avaliações quantitativas criteriosas pode inviabilizar o processo, devido, principalmente, às incertezas inerentes a este tipo de estrutura e a complexidade das análises.

Com relação aos descritores adotados por Vick (1992), utilizado para os estudos de ETA, verificou-se que seu uso é bastante prático, mas em determinados momentos a aplicação de valores intermediários seria mais adequada. Durante este trabalho considerou-se que o termo "impossível", utilizado para a probabilidade de 1%, não é o mais adequado, sendo substituído pela expressão “quase impossível”.

Quanto mais estudos forem realizados na área de análise de risco, maiores serão as informações disponíveis para a realização de análises comparativas, e mais experientes serão as pessoas envolvidas neste tipo de atividade, favorecendo a percepção do risco e todo o seu processo de gerenciamento.

Apesar dos avanços recentes verificados na aplicação de ferramentas de análise de risco em barragens, ainda existe muito espaço para evolução neste campo. Por mais que a frequência de acidentes neste setor seja baixa quando comparada a outras atividades, as consequências proporcionadas por estes eventos podem ser muito graves, e as ações devem ser tomadas considerando, principalmente, a perspectiva das pessoas localizadas no vale a jusante.

Seguem algumas sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao tema desta dissertação:

- Testar as árvores de eventos elaboradas em exercícios práticos, simulando o enfrentamento de uma situação emergencial real, para avaliar sua eficiência, com a respectiva proposição de melhorias;
- A partir da experiência da aplicação do método em outras estruturas, estabelecer limites para os valores encontrados nas FMEA's a partir dos quais serão construídas as árvores de eventos;
- Realizar testes para outras estruturas e modos de falhas;
- Contemplar análises de consequência em estudos futuros;
- Desenvolver metodologia para contemplar análises de viabilidade técnica e econômica da implantação das ações de resposta propostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AIRES, A.D.B. *Estudo tensão deformação de barragem de Irapé*. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
2. ALMEIDA, M. M. *Estudo tensão deformação de barragem de terra e enrocamento*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO, 2010. 139 p.
3. ANA – Agência Nacional de Águas. *Minuta do Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência*. Disponível em: <http://audienciapublica.ana.gov.br/arquivos/Aud_006_2015_Manual_do_Empreendedor_Volume%20IV_Guia_de_Orientacao_e_Formularios_dos_Planos_de_Acao_de_Emergencia_PAE.pdf>. Acesso em 30/05/2015.
4. ANA – Agência Nacional de Águas. *Volume IV - Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência – PAE*. Disponível em: <http://audienciapublica.ana.gov.br/te_audiencia.php?id_audiencia=48>. Acesso em 30/05/2015.
5. AUSTRALIA STANDARDS/NEW ZEALAND STANDARD. Norma AS/NZS 4360:2004. *Risk Management*. Aug., 2004.
6. BALBI, D. A. F. *Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens: estudo de caso: Barragem de Peti - MG*. Dissertação. Mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
7. BARBOSA, N. P.; MENDONÇA, A. V.; SANTOS, C. A. G.; LIRA, B. B. *Barragem de Camará*. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba - Centro de Tecnologia. 2004. (Relatório).
8. BIER, V.M. *Monte Carlo Risk Analysis Modeling. Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management*. USA: Vlasta Molak (Ed.), 1997. cap. I.4.

9. BLASCO, E.; ORTEGA, E. *Emergency action plans in Northern Patagonia*. In: BERGA, L. (Ed.) *Dam Safety*. Rotterdam: Balkema, 1998. p. 243-249.
10. BRASIL, L. S. S. *Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem de Rio de Pedras. Belo Horizonte*. 201 p. (Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
11. BRASIL. *Congresso Nacional. Lei n. 12.334 de 20 de setembro de 2010*. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do Art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do Art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 21 set. 2010. Seção 1. p. 1. Disponível em: <<http://www.in.gov.br>>. Acesso em 25/10/2014.
12. BRASIL. *Projeto de lei n. 1181 jul. 2003*. 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. Disponível em: <<http://www.in.gov.br>>. Acesso em 25/10/2014.
13. BRASIL. *Projeto de lei n. 6259 jul. 2013*. Torna obrigatória a contratação de seguro contra o rompimento ou vazamento de barragens, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br>>. Acesso em 25/07/2015.
14. BUREAU OF RECLAMATION (USBR). *Design of small dams*. 3. ed. Washington: United States Department of Interior, 1987. 860 p.
15. CALDEIRA, L. M. M. S. *Análises de riscos em geotecnia: aplicação a barragens de aterro*. Lisboa: LNEC, 2008. 248 p.
16. CARDIA, R. J. R. *Emergência e gestão de risco em barragens*. In. 2º Simpósio Nacional de Desastres Naturais e Tecnológicos. Santos. ABGE, Anais..., dezembro de 2007. (Publicado em CD-ROM).

17. CEMIG/FAPEMIG. Sistema Inteligente Integrado com Tecnologia Web e Móvel para Gestão de Emergências. *Relatório Etapa 1 (Projeto GT490/APQ-03314-11)*. Belo Horizonte, 2013. 50 p.
18. CEMIG/FAPEMIG. Sistema Inteligente Integrado com Tecnologia Web e Móvel para Gestão de Emergências. *Relatório Etapa 3 (Projeto GT490/APQ-03314-11)*. Belo Horizonte, 2014. 41 p.
19. CEMIG/FAPEMIG. Sistema Inteligente Integrado com Tecnologia Web e Móvel para Gestão de Emergências. *Relatório Etapa 4 (Projeto GT490/APQ-03314-11)*. Belo Horizonte: CEMIG/FAPEMIG, 2014. 36 p.
20. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). *Apresentação das barragens*. Disponível em: <[http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresentacao das Barragens](http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresentacao%20das%20Barragens)>. Acesso em 15/04/2014.
21. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). *Main brazilian dams: design, construction and performance*. Volume III. Santa Catarina: Impressul, 2009. 436 p.
22. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). *XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens, 50 anos do acidente de Vajont – Itália (1963-2013)*. 2013. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/site_antigo_2013/img/45geral2.pdf>. Acesso em 10/11/2014.
23. COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). *Relatório Anual de Análise da Instrumentação de Irapé*. 2011. 122 p.
24. COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). *UHE Irapé - Revisão Periódica de Segurança 2013*. Belo Horizonte: CEMIG, 2014.
25. COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). *UHE Irapé: Avaliação do Comportamento das Estruturas Civas*. 2012. 126 p. (Relatório)
26. CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. *Deliberação Normativa N° 62. Dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais*. Lex: Diário do Executivo - Minas Gerais, 17 de dezembro de 2002. 9 p.

27. CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. *Deliberação Normativa N° 87. Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM n° 62, de 17/12/2002.*
Lex: Diário do Executivo - Minas Gerais, 18 de junho de 2005. 9 p.
28. CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. *Deliberação Normativa N° 113. Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM n° 62, de 17/12/2002. Estabelece prazo para apresentação de declaração sobre a situação das barragens.*
Lex: Diário do Executivo - Minas Gerais, 1 de dezembro de 2007. 1 p.
29. CONSÓRCIO CONSTRUTOR DE IRAPÉ. *Barragem de terra – enrocamento Estudos tridimensionais de tensão e deformação - 1ª fase de análise.* 2004. 26 p. Projeto Executivo.
30. CONSÓRCIO CONSTRUTOR DE IRAPÉ. *Barragem de terra – enrocamento Instrumentação - 4º relatório de interpretação.* 2006. 59 p. Projeto Executivo.
31. CONSÓRCIO CONSTRUTOR DE IRAPÉ. *Barragem: Manual de Instrumentação de Auscultação.* 2005. 86 p. Projeto Executivo.
32. COVELLO, V.T.; MUNPOWER, J. *Risk Analysis and Risk Management: An Historical Perspective.* Risk Analysis. Vol. 5, 103-120. 1985.
33. CRUZ, P. T. *100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção projeto.* 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.
34. ESPÓSITO, T.; DUARTE, A. P. *Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco.* REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 63(2): 393-398, abr-jun. 2010.
35. ESPÓSITO, T.; PALMIER L. R. *Application of risk analysis methods on tailings dams.* Soils and Rocks, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 97-117, jan-abr. 2013.
36. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY – FEMA. Disponível em: <<https://www.fema.gov/>>. Acesso em 15/01/2015.
37. FLORESTAL CATAGUASES. *Acidente em Cataguases.* Disponível em: <<http://florestalcataguazes.com.br/page4.html>>. Acesso em 19/11/2014.

38. 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.
39. FOSTER, M; FELL, R. *Use of event trees to estimate the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping*. 20th Congress, ICOLD, Beijing, China, 2000. 23: 237-259.
40. FOSTER, M; FELL, R; SPANNAGLE, M. *The statistics of embankment dam failures and accidents*. Canadian Geotechnical Journal, 2000. 25: 1000-1024.
41. FUSARO, T. C. *Segurança de barragens*, VIII Simpósio sobre pequenas e médias centrais hidrelétricas, 2012. Tema 31.
42. 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.
43. HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (HSE). *Risk criteria for land-use planning in the vicinity of major industrial hazards*, HMSO, 1989. ISBN 0 11 885491 7.
44. HUAMANY, W. *Autoridades não se entendem*. Jornal O Globo, Rio de Janeiro, 04 de abril de 2003. Primeiro Caderno, p. 10.
45. INERIS – Institut National de L’Environnement Industriel et des Risques. *Outils d’analyse des risques générés par une installation industrielle*, 2003, Direction des Risques Accidentels.
46. INSTRUMENTAÇÃO DA UHE IRAPÉ. *Procedimentos e Orientações para Leituras*. CEMIG, 2006.
47. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *80 years: dams for human sustainable development*. Paris: CIGB/ICOLD, 2008. 23 p.
48. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Concrete face rockfilldams: concepts for design and construction*. Bulletin 141. Paris: ICOLD, 2010a, 401 p.

49. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Risk assessment in dam safety management: a reconnaissance of benefits, methods and current applications*. bulletin 130. Paris: ICOLD, 2005, 276 p.
50. JANSEN, R.B. *Dam and Public Safety*. USA: Water Resources Technical Publication. Denver: U.S. Department of the Interior, 1980. 332p.
51. JORNAL O TEMPO. *Galeria de fotos do dia 09/10/2014*. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/galeria-de-fotos/acidente-em-barragem-de-mineradora-em-itabirito-1.913533>>. Acesso em 19/12/2014.
52. KANJI, M. A. *Parecer técnico sobre as causas da ruptura da barragem Camará*. 16 de novembro de 2004. Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br/docente/andrea/TC029/MKANJICamara.pdf>>. Acesso em 04/11/2014.
53. LADEIRA, J. E. R. *Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE - São Simão*. 2007. 210 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
54. LAFITTE, R. *Probabilistic risk analysis of large dams*. International Water Power and Dam Construction, 45, p. 13-16. 1993 citado por HARTFORD, D. N. D.; BAECHER G. B. Risk and uncertainty in dam safety. London: Thomas Telford Publishing, 2004. 391 p.
55. LEONE, M. F.; BALBI, D. A. F.; TOSCANO, A. E.; BARBOSA, P. S. F.; SALGADO, R. M.; VIANNA, L. F. V.; BARRETO, M. N. *Expert system for dam assessment and emergency detection*. 6th International Conference on Flood Management, 2014. 10 p.
56. LIMA, A. L. C. *Influência da presença de sulfetos na implantação da UHE Irapé - Vale do Jequitinhonha - Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO. Ouro Preto, 2009. 206 p.

57. MAESTRI, R. *Esconder desastres não é novidade? (Continuação I)*. Disponível em: <<http://www.engenheiromaestri.com>>. Acesso em 21/09/2014.
58. MELO, A. V. *Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT*. Dissertação. Mestrado em Geotecnia. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2014. 244 p.
59. MENESCAL, R. A.; VIEIRA, V. P. P. B.; OLIVEIRA, S. K. F. *Terminologia para análise de risco e segurança de barragens*. In: MENESCAL, R. A. (coord.) *A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos*. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005a. p. 31-49.
60. PERINI, D. S. *Estudos dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra*. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
61. PETRONILHO, M. R. *Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análises de risco*. 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
62. PIMENTA, M. L. B. *Abordagens de riscos em barragens de aterro*. 2009. Lisboa: LNEC, 2009. 570 p.
63. PORTAL DE NOTÍCIA 180 graus. *Barragem Algodões: leia, salve e entenda tudo aqui*. 15 de junho de 2009. Disponível em: <<http://180graus.com/especiais/barragem-algodoes-leia-salve-e-entenda-tudo-aqui-212750.html>>. Acesso em 09/12/2014.
64. POWLEDGE, G.R.; RALSTON, D.C.; MILLER, P.; CHEN, Y. H.; CLOPPER, P. E.; TEMPLE, D.M. *Mechanics of overflow erosion on embankments*. II: Hydraulic and Desing Considerations. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1988, vol. 115, n° 8, 1056-1075.
65. PRECISÃO ENGENHARIA. *Rompimento da barragem de rejeitos*. Disponível em: <<http://www.precisao.eng.br/>>. Acesso em 20/11/2014.
66. RETTEMEIER, K.; NILKENS, B.; FALKENHAGEN, B.; KÖNGETER, J. *New Developments in Dam Safety: feasibility evaluation on risk assessment*. 6 p., 2001. Disponível em:

- <http://talsperrenkomitee.de/pdf/german_dam_research/rettemeier_2001.pdf>. Acesso em 09/05/2014.
67. RIBEIRO, M. Q. C., *O Licenciamento ambiental de aproveitamentos hidroelétricos: o espaço da adequação*. Dissertação. Mestrado em Geografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. 268 p.
68. ROSA, A. C. *Risco tecnológico em contextos de vulnerabilidade social e ambiental elevados: experiências na região da refinaria Gabriel Passos/ Petrobras, região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais (1998-2007)*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008.
69. SAYÃO, A. *A segurança das barragens brasileiras*. Jornal Folha de São Paulo. 10 de junho de 2009.
70. SILVEIRA, J. F. A. *Teria sido possível evitar a ruptura da barragem de Teton através de um bom plano de instrumentação?* Revista Brasileira de Barragens, 2014, Ano I, Nº 01, p. 23-29.
71. SYLVESTER, A.G. *Teton Dam Failure*. University of California Santa Barbara, 2007. Disponível em: <http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton_Dam/Teton%20Dam.html>. Acesso em 23/08/2014.
72. UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy*. Paris: UNESCO, 2014. 204 p.
73. UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION - USBR. United States Department of Interior. *A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure*. Dam Safety Office. Denver, Colorado, EUA. 1999. 43p. Disponível em: <http://www.usbr.gov/ssle/dam_safety/risk/Estimating%20life%20loss.pdf> Acesso em 15/10/2014.

74. VALENCIO, N. F. L. S. *O controle das águas como fator de progresso e de risco: as representações institucionais dos Grandes Projetos Hídricos no Nordeste*. In: III ENCONTRO DA ANPPAS, 2006, Brasília-DF.
75. VARGAS, M. *Introdução à Mecânica dos Solos: Segunda parte, Hidráulica dos solos*. McGraw Hill. 1977.
76. VIANNA, L. F. V., *Atendimentos realizados pelo Núcleo de Emergência Ambiental (NEA) envolvendo barragens*. Apresentação realizada no III Seminário Transporte de Derivados de Petróleo e Outros Produtos Perigosos – Prevenção de Acidentes Ambientais, junho de 2012. Disponível em: <http://www.semاد.mg.gov.br/images/stories/seminarios/seminario_petrobras/painel5/atendimentos-realizados-pelo-nea-envolvendo-barragens-luiz-felipe-semاد-deamb-nea.pdf>. Acesso em 25/11/2014.
77. VIOTTI, C. B., CARVALHO, E., BRITO, S. N. A., ALVES, A. J. *UHE IRAPÉ: Revisão Periódica de Segurança*. 2014. 169 p.
78. VISEU, T.; ALMEIDA, A. B. *Gestão do risco nos vales a jusante de barragens*. Territorium 18, 2011, 33-42.
79. WORLD COMMISSION ON DAMS (WCD). *The Report of The World Commission on Dams*. London: Earthscan Publications Ltd, 2000. 404 p.
80. YASSUDA, A. J. *Instrumentação da barragem UHE Irapé – Características e Resultados de Desempenho*. Extraído em: www.cbdb.org.br/simposio/item%20g_caso%20pratico_ahe%20irape.ppt. Acesso em 10/11/2014.

APÊNDICE A

A.1 Tabela análise FMEA

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1 Barragem de terra-enrocamento												
Conter o reservatório	1 (1) Galgamento da barragem	Formação de processos erosivos externos e abertura de brecha	9	V	Vazão afluente superior à capacidade extravasora	1	I	9	Monitoramento do nível dos afluentes e do reservatório por sistema de telemetria	Detecção	1	9
									Deplecionamento do reservatório e formação de volume de espera	Prevenção		
					Escorregamento de taludes na região do reservatório e formação de onda	1	I	9	Monitoramento da estabilidade dos taludes na região do reservatório	Detecção	3	27
									Estabilizar os taludes, caso necessário	Prevenção		
	Falha de projeto	1	I	9	Utilização dos melhores critérios de projeto conhecidos	Prevenção	1	9				
	1 (2) Movimento de massa	Instabilidade global do maciço da barragem, com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção	2	60
									Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Propriedades inadequadas dos materiais	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção	5	150
									Substituição de material	Prevenção		
									Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Abalos sísmicos	1	I	10	Monitoramento através de instrumentação	Detecção	4	40
									Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção		
									Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
Falha de projeto ou construção					2	II	20	Utilização dos melhores critérios de projeto conhecidos	Prevenção	4	80	
Sabotagem	1	I	10	Restrição de acesso à área de segurança da barragem	Prevenção	2	20					
Falha no sistema de instrumentação	6	III	60	Instalação de instrumentos adequados à condição da barragem	Detecção	2	120					

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S		CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR	
1 Barragem de terra-enrocamento												
Conter o reservatório	1 (3) Erosão interna	Piping com formação de brecha	9	V	Falha de projeto ou construção	2	II	18	Deplecionamento do reservatório	Prevenção	7	126
									Lançamento de materiais de filtro e dreno	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
									Elaboração de projeto adequado, com a respectiva adoção de técnicas construtivas adequadas	Prevenção		
					Falha no sistema de instrumentação	6	III	54	Instalação de instrumentos adequados à condição da barragem	Detecção	2	108
O vale da barragem é muito encaixado	4	III	36	Fechamento de trincas	Prevenção	5	180					
				Recompactação	Prevenção							
				Aplicação de material mais plástico nesta região	Prevenção							
				Uso de filtros, para retenção de partículas do solo	Prevenção							
				Inspeção visual e instrumentação	Detecção							
1.1 Crista												
Permitir acesso à barragem	1.1 (1) Obstrução de acesso	Impossibilidade de execução de inspeções	3	III	Excesso de deformações	3	II	9	Reconstrução e recompactação	Prevenção	1	9
									Inspeção visual	Detecção		
Garantir a borda livre da barragem	1.1 (2) Deformação excessiva	Galgamento com erosão externa	10	VI	Recalques (inadequação de projeto ou construção)	1	I	10	Alteamento da crista	Prevenção	1	10
									Inspeção visual e monitoramento por campanhas topográficas	Detecção		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1.2 Enrocamento de jusante (avaliação geral)												
Conferir estabilidade mecânica	1.2 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Manter a qualidade da compactação durante o processo construtivo. Promover a recompactação quando necessário.	Prevenção	4	80
									Inspeção visual e instrumentação	Deteccção		
					Percolações ou poropressões elevadas	4	III	40	Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção	3	120
									Injeção de calda de cimento	Prevenção		
									Instalação de poços de drenagem	Prevenção		
		Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	20	Ampliação da berma.	Prevenção	5	100			
						Inspeção visual e instrumentação	Deteccção					
		Instabilidade local da barragem	6	IV	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	12	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	4	48
									Inspeção visual e instrumentação	Deteccção		
	Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)				3	II	18	Ampliação da berma.	Prevenção	5	90	
	Inspeção visual e instrumentação	Deteccção										
	1.2 (2) Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade global	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Deteccção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	5	100
									Recompactação	Prevenção		
					Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	30	inspeção visual e instrumentação	Deteccção	4	120
									Selagem de trincas	Prevenção		
Colapso dos materiais					2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80	
								Inspeção visual	Deteccção			
Fluência dos materiais					2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80	
								Inspeção visual	Deteccção			

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1.2 Enrocamento de jusante (avaliação geral)												
Conferir estabilidade mecânica	1.2 (2) Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade local	6	IV	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção	4	48
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	3	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	5	90
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
		Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	4	72			
						Recompactação	Prevenção					
						Inspeção visual e instrumentação	Detecção					
		Colapso dos materiais	2	II	12	Recomposição do talude	Prevenção	4	48			
						Inspeção visual	Detecção					
		Fluência dos materiais	2	II	12	Recomposição do talude	Prevenção	4	48			
						Inspeção visual	Detecção					
		Galgamento	9	V		Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	1	18
Recompactação	Prevenção											
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											
Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	1					I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9	
		Recompactação	Prevenção									
1.2.1 Enrocamento de jusante - Zona 9*												
Proteger o talude de jusante contra erosão externa	1.2.1 (1) Falha de proteção	Formação de processos erosivos, com instabilidade local	4	III	Degradação dos blocos de rocha	2	II	8	Substituição dos blocos danificados	Prevenção	1	8
									Inspeção visual	Detecção		
					Crescimento de vegetação	1	I	4	Remoção da vegetação	Prevenção	1	4
									Inspeção visual	Detecção		
					Lançamento e acabamento inadequados	1	I	4	Fiscalização adequada da obra	Prevenção	1	4
									Inspeção visual	Detecção		
					Movimentação por colapso	2	II	8	Molhar o enrocamento durante a construção	Prevenção	4	32
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
Movimentação por fluência	2	II	8	Utilizar a compactação adequada	Prevenção	4	32					
				Inspeção visual e instrumentação	Detecção							
Acesso à crista e taludes da barragem	1.2.1 (2) Perda do acesso à crista da barragem	Afeta a realização de inspeções e adoção de medidas preventivas e corretivas	2	III	Recalques diferenciais	2	II	4	Reconstrução do acesso	Prevenção	4	16
									Inspeção visual	Detecção		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1.2.2 Enrocamento de jusante - Zona 6												
Conferir estabilidade mecânica	1.2.2 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Manter a qualidade da compactação durante o processo construtivo. Promover a recompactação quando necessário.	Prevenção	4	80
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais,	2	II	20	Ampliação da berma.	Prevenção	5	100
		Inspeção visual e instrumentação	Detecção									
		Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II					12	Ajustes de construção (recompactação)			Prevenção	4	48
					Inspeção visual e instrumentação	Detecção						
	Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	12	Ampliação da berma.	Prevenção	5	60				
					Inspeção visual e instrumentação	Detecção						
	1.2.2 (2) Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade global	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	5	100
									Recompactação	Prevenção		
									inspeção visual e instrumentação	Detecção		
		Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	30	Selagem de trincas	Prevenção	4	120			
						Recompactação	Prevenção					
						Inspeção visual e instrumentação	Detecção					
		Colapso dos materiais	2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80			
						Inspeção visual	Detecção					
		Fluência dos materiais	2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80			
	Inspeção visual					Detecção						
	Fissuração com instabilidade local	6	IV	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção	4	48	
								Recomposição e recompactação	Prevenção			
								Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)				2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção	5	60		
							Recompactação	Prevenção				
							Inspeção visual e instrumentação	Detecção				
Forma do vale (recalques diferenciais)		3	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	4	72				
					Recompactação	Prevenção						
					Inspeção visual e instrumentação	Detecção						
Colapso dos materiais		2	II	12	Recomposição do talude	Prevenção	4	48				
					Inspeção visual	Detecção						
Fluência dos materiais		2	II	12	Recomposição do talude	Prevenção	4	48				
	Inspeção visual				Detecção							

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR					
1.2.2 Enrocamento de jusante - Zona 6															
Conferir estabilidade mecânica	1.2.2 (2) Deformação excessiva	Galgamento	9	V	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	1	18			
									Recompactação	Prevenção					
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção					
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	1	I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9			
									Recompactação	Prevenção					
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção					
Direcionar a água pluvial para fora do talude de jusante, pela implantação das mantas de PEAD	1.2.2 (3) Falha do sistema de drenagem pluvial, que utiliza uma manta PEAD para direcionar o fluxo	Aumento da taxa de reações químicas no maciço, favorecendo a geração de efluentes ácidos, recalques diferenciais e aumento da temperatura	4	III	Recalque diferencial	3	II	12	Reconstrução da proteção de PEAD	Prevenção	4	48			
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção					
					Falha construtiva	2	II	8	Reconstrução da proteção de PEAD	Prevenção	4	32			
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção					
					dimensionamento inadequado da manta, causando furos ou rasgos	2	II	8	Reconstrução com uso de uma manta adequada às condições locais	Prevenção	4	32			
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção					
					1.2.3 Enrocamento de jusante - Zona 5 / 5A										
					Conferir estabilidade mecânica	1.2.3 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Manter a qualidade da compactação durante o processo construtivo. Promover a recompactação quando necessário.	Prevenção	4	80
Inspeção visual e instrumentação	Deteção														
Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	3	II	30	Ampliação da berma.						Prevenção	5	150			
				Inspeção visual e instrumentação						Deteção					
Instabilidade local da barragem	6	IV	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2			II	12	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	4	48			
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção					
			Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	3			II	18	Ampliação da berma.	Prevenção	5	90			
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção					

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1.2.3 Enrocamento de jusante - Zona 5 / 5A												
Conferir estabilidade mecânica	1.2.3 (2) Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade global	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	3	II	30	Selagem de trincas	Prevenção	5	150
									Recompactação	Prevenção		
									inspeção visual e instrumentação	Detecção		
		Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	30	Selagem de trincas	Prevenção	4	120			
						Recompactação	Prevenção					
						Inspeção visual e instrumentação	Detecção					
		Colapso dos materiais	2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80			
						Inspeção visual	Detecção					
		Fluência dos materiais	3	II	30	Recomposição do talude	Prevenção	4	120			
						Inspeção visual	Detecção					
		Fissuração com instabilidade local	6	IV	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção	4	48
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	3	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	5	90
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
		Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	4	72			
						Recompactação	Prevenção					
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											
Colapso dos materiais	2	II	12	Recomposição do talude	Prevenção	4	48					
				Inspeção visual	Detecção							
Fluência dos materiais	3	II	18	Recomposição do talude	Prevenção	4	72					
				Inspeção visual	Detecção							
Galgamento	9	V	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	1	18		
							Recompactação	Prevenção				
							Inspeção visual e instrumentação	Detecção				
			Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	1	I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9		
Recompactação	Prevenção											

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR				
1.3 Transições de jusante e montante - Zonas 2A*, 3*, 3A*, 4*														
Evitar a migração de partículas de solo em decorrência de diferenças acentuadas de granulometria	1.3 (1) Não operar como transição	Piping	9	V	Granulometria inadequada	1	I	9	Rebaixamento do reservatório e reconstrução com material adequado	Prevenção	5	45		
									Instrumentação	Deteccção				
					Recalque diferencial	1	I	9	Realizar estudos adequados tensão-deformação	Prevenção	4	36		
									Instrumentação	Deteccção				
					Problemas de projeto e construção	1	I	9	Adotar critérios adequados de projeto, com a devida fiscalização da obra	Prevenção	4	36		
									Instrumentação	Deteccção				
1.4 Filtro - Zona 2														
Controlar a percolação na barragem	1.4 (1) Não exercer a função de dreno e filtro para controle da percolação	Piping	9	V	O filtro permite o carreamento de partículas de solo, favorecendo as erosões regressivas, devido à granulometria inadequada	1	I	9	Dimensionamento adequado da granulometria do filtro, conforme o solo	Prevenção	7	63		
									Rebaixamento do reservatório	Prevenção				
									Instrumentação	Deteccção				
		Instabilidade global do barramento			10	VI	Aumento da poropressão e redução da tensão efetiva	2	II	20	Recalques diferenciais podem favorecer a abertura de caminhos preferenciais através do filtro	Prevenção	7	63
											Utilizar critérios adequados de projeto e construção.	Prevenção		
											Instrumentação	Deteccção		
	Implantar sistemas adicionais de drenagem	5	100	Aumento da poropressão e redução da tensão efetiva	2	II	20	Rebaixamento do reservatório	Prevenção	5	100			
								Bermas de equilíbrio	Prevenção					
								Instrumentação	Deteccção					
1.5 Núcleo impermeável (Zona 3B, 1-J1, 1-J2)														
Impermeabilizar a barragem. Vedação.	1.5 (1) Percolação excessiva	Piping	9	V	Fraturamento hidráulico	1	I	9	Compactação adequada	Prevenção	8	72		
									Rebaixamento do reservatório	Prevenção				
									Instrumentação	Deteccção				
		Aumento de poropressão, gerando instabilidade local ou global			9	V	Fraturamento hidráulico	1	I	9	Compactação adequada	Prevenção	5	45
											Implantar sistemas adicionais de drenagem	Prevenção		
											Rebaixamento do reservatório	Prevenção		
Instrumentação	Deteccção													

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1.6 Rip-Rap - Zona 7*												
Proteger o talude de montante contra erosão, principalmente em relação ao efeito das ondas do reservatório	Não exercer proteção do talude de montante	Erosão externa com instabilidade local	3	II	Degradação dos blocos de rocha	2	II	6	Substituição dos blocos danificados	Prevenção	1	6
									Inspeção Visual	Detecção		
					Deslocamento pela força das ondas	3	II	9	Recomposição do rip-rap, com avaliação da necessidade de adequar a dimensão dos blocos	Prevenção	1	9
									Inspeção Visual	Detecção		
					Movimentação por colapso	3	II	9	Alterar regras operativas	Prevenção	2	18
									Recomposição do rip-rap	Prevenção		
									Inspeção visual	Detecção		
					Movimentação por fluência	2	II	6	Recomposição do rip-rap	Prevenção	2	12
Inspeção visual	Detecção											
Problemas de projeto e construção	2	II	6	Recomposição do rip-rap, utilizando critérios adequados	Prevenção	2	12					
				Inspeção visual	Detecção							
1.7 Enrocamento de montante												
Conferir estabilidade mecânica	1.7 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Manter a qualidade da compactação durante o processo construtivo. Promover a recompactação quando necessário.	Prevenção	4	80
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	20	Ampliação da berma.	Prevenção	4	80
		Inspeção visual e instrumentação	Detecção									
		Instabilidade local da barragem	6	IV	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	12	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	4	48
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2				II	12	Ampliação da berma.	Prevenção	4	48		
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1.7 Enrocamento de montante												
Conferir estabilidade mecânica	1.7 (2) Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade global	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80
									Recompactação	Prevenção		
									inspeção visual e instrumentação	Detecção		
		Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	30	Selagem de trincas	Prevenção	4	120			
						Recompactação	Prevenção					
						Inspeção visual e instrumentação	Detecção					
		Colapso dos materiais	2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80			
						Inspeção visual	Detecção					
		Fluência dos materiais	3	II	30	Recomposição do talude	Prevenção	4	120			
						Inspeção visual	Detecção					
		Fissuração com instabilidade local	6	IV	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção	4	48
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
	Inspeção visual e instrumentação								Detecção			
	Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)				2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção	4	48	
								Recompactação	Prevenção			
								Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
	Forma do vale (recalques diferenciais)				3	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	4	72	
								Recompactação	Prevenção			
Inspeção visual e instrumentação								Detecção				
Colapso dos materiais	2	II	12	Recomposição do talude	Prevenção	4	48					
				Inspeção visual	Detecção							
Fluência dos materiais	3	II	18	Recomposição do talude	Prevenção	4	72					
				Inspeção visual	Detecção							
Galgamento	9	V	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	1	18		
							Recompactação	Prevenção				
							Inspeção visual e instrumentação	Detecção				
			Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	1	I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9		
Recompactação	Prevenção											
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR								
1.7 Enrocamento de montante																		
Aumentar o caminho de percolação, reduzindo o gradiente hidráulico	1.7 (3) Percolação excessiva	Piping	9	V	Fraturamento hidráulico	3	II	27	Compactação adequada	Prevenção	4	108						
									Rebaixamento do reservatório	Prevenção								
									Instrumentação	Deteção								
1.7.1 Enrocamento de montante - Zona 6																		
Conferir estabilidade mecânica	1.7.1 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Manter a qualidade da compactação durante o processo construtivo. Promover a recompactação quando necessário.	Prevenção	4	80						
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção								
									Ampliação da berma.	Prevenção								
		Instabilidade local da barragem			6	IV	Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	20	Inspeção visual e instrumentação	Deteção	4	80				
											Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	12	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	4	48
															Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
	1.7.1 (2) Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade global	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80						
									Recomposição e recompactação	Prevenção								
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção								
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80						
									Recompactação	Prevenção								
									inspeção visual e instrumentação	Deteção								
					Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	30	Selagem de trincas	Prevenção	4	120						
									Recompactação	Prevenção								
Colapso dos materiais	2	II	20	Inspeção visual e instrumentação	Deteção	4	80											
				Recomposição do talude	Prevenção													
				Inspeção visual	Deteção													
Fluência dos materiais	2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80											
				Inspeção visual	Deteção													

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1.7.1 Enrocamento de montante - Zona 6												
Conferir estabilidade mecânica	1.7.1 (2) Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade local	6	IV	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção	4	48
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção	4	48
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
		Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	4	72			
						Recompactação	Prevenção					
						Inspeção visual e instrumentação	Detecção					
		Colapso dos materiais	2	II	12	Recomposição do talude	Prevenção	4	48			
						Inspeção visual	Detecção					
		Fluência dos materiais	2	II	12	Recomposição do talude	Prevenção	4	48			
Inspeção visual	Detecção											
Galgamento	9	V	2	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	1	18			
						Recompactação	Prevenção					
						Inspeção visual e instrumentação	Detecção					
			Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	1	I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9		
							Recompactação	Prevenção				
							Inspeção visual e instrumentação	Detecção				
1.7.2 Enrocamento de montante - Zona 5L												
Conferir estabilidade mecânica	1.7.2 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Manter a qualidade da compactação durante o processo construtivo. Promover a recompactação quando necessário.	Prevenção	4	80
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	20	Ampliação da berma.	Prevenção	4	80
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
		Instabilidade local da barragem	6	IV	2	II	12	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	4	48	
								Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	12	Ampliação da berma.	Prevenção	4	48
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		

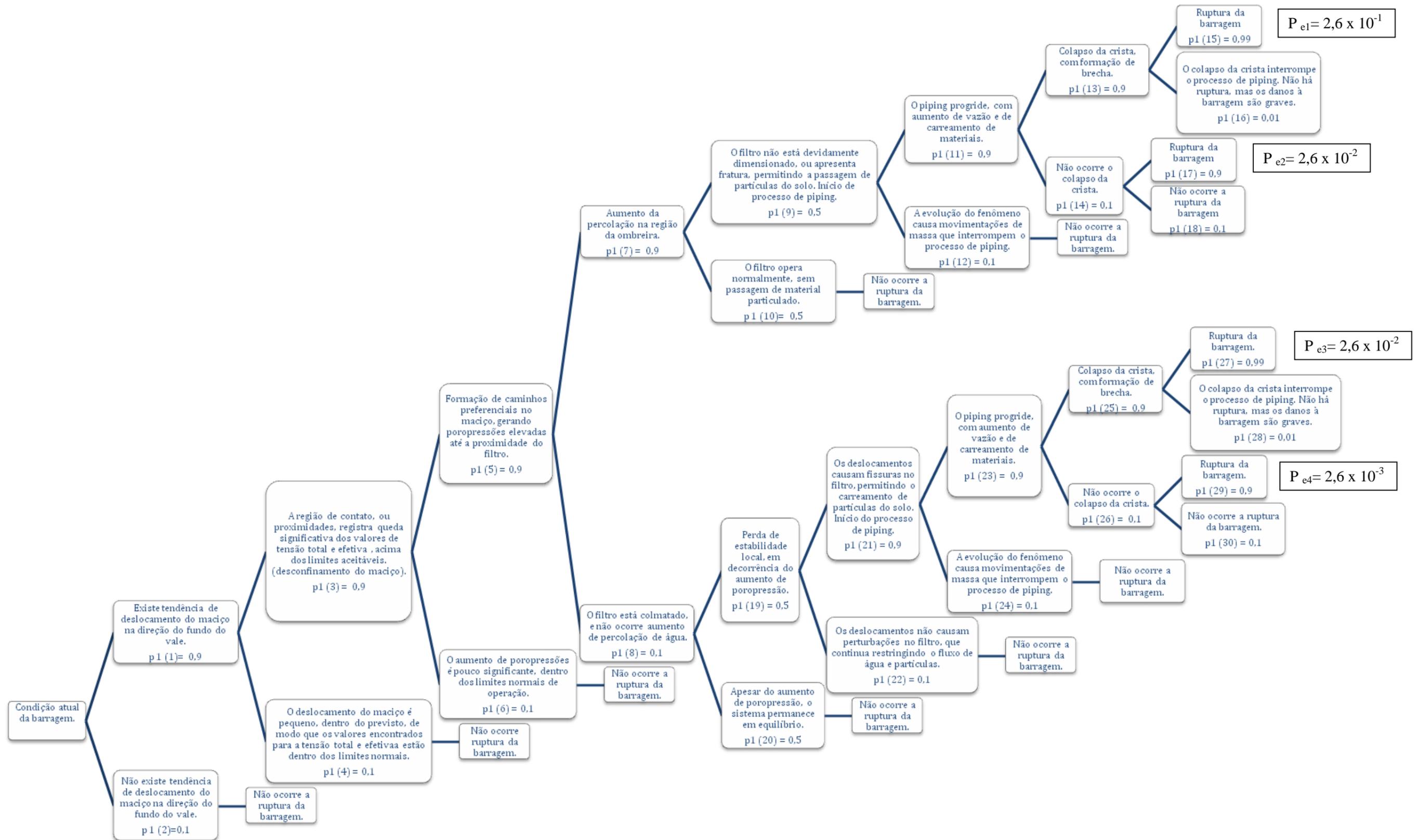
FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
1.7.2 Enrocamento de montante - Zona 5L												
Conferir estabilidade mecânica	1.7.2 (2) Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade global	10	VI	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção			4	80
					Recompactação				Prevenção			
					inspeção visual e instrumentação				Detecção			
			Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	30	Selagem de trincas	Prevenção	4	120		
			Recompactação				Prevenção					
			Inspeção visual e instrumentação				Detecção					
			Colapso dos materiais	2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção			4	80
			Inspeção visual				Detecção					
			Fluência dos materiais	3	II	30	Recomposição do talude	Prevenção	4	120		
		Inspeção visual	Detecção									
		Fissuração com instabilidade local	6	IV	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção	4	48
									Recomposição e recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	2	II	12	Selagem de trincas	Prevenção			4	48
					Recompactação				Prevenção			
					Inspeção visual e instrumentação				Detecção			
			Forma do vale (recalques diferenciais)	3	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	4	72		
			Recompactação				Prevenção					
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											
Colapso dos materiais	2		II	12	Recomposição do talude	Prevenção	4	48				
Inspeção visual					Detecção							
Fluência dos materiais	3		II	18	Recomposição do talude	Prevenção	4	72				
Inspeção visual		Detecção										
Galgamento	9	V	Inadequação construtiva (compactação inadequada)	2	II	18	Selagem de trincas	Prevenção	1	18		
							Recompactação	Prevenção				
							Inspeção visual e instrumentação	Detecção				
	Inadequação de projeto (propriedades dos materiais, configuração dos taludes)	1	I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9				
					Recompactação	Prevenção						
					Inspeção visual e instrumentação	Detecção						

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S		CAUSA	O		CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR
1.7.2 Enrocamento de montante - Zona 5L												
Aumentar o caminho de percolação, reduzindo o gradiente hidráulico	1.7.2 (3) Percolação excessiva	Piping	9	V	Fraturamento hidráulico	3	II	27	Compactação adequada	Prevenção	4	108
									Rebaixamento do reservatório	Prevenção		
									Instrumentação	Deteção		
2 Concreto de enchimento												
Regularizar a fundação	2 (1) Regularização inadequada da fundação	Desenvolvimento de caminhos preferenciais e piping	7	IV	A configuração geológica pode favorecer a formação de caminhos preferenciais	2	II	14	Fiscalização adequada da obra	Prevenção	7	98
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
Reduzir a percolação de águas ácidas pela fundação	2 (2) Excesso de percolação de águas ácidas pela fundação	Alteração das propriedades dos materiais	3	III	Presença de sulfetos na geologia local	4	III	12	Uso de concreto resistente a ataque ácido, com proteção de membrana epóxi.	Prevenção	5	60
									Instrumentação	Deteção		
3 Fundação												
Promover suporte para a barragem	(1) Movimento de mas	Instabilidade global	10	VI	Tratamento inadequado da fundação	1	I	10	Controle rígidos dos critérios de projeto e construção	Prevenção	7	70
									Reforçar a fundação, com injeção ou melhoria dos sistemas de drenagem	Prevenção		
									Suavizar os taludes da barragem	Prevenção		
									Inspeção visual e Instrumentação	Deteção		
	Aspectos geológicos não identificados	2	II	20	Realizar as investigações geológicas com o critério necessário.	Deteção	7	140				
					Reforçar a fundação, com injeção ou melhoria dos sistemas de drenagem	Prevenção						
					Inspeção visual e Instrumentação	Deteção						
	3 (2) Erosão Interna	Piping	9	V	Percolação excessiva de água, com o respectivo carreamento de material particulado.	1	I	9	Reforçar a fundação, com injeção ou melhoria dos sistemas de drenagem	Prevenção	7	63
									Aplicação de filtro invertido	Prevenção		
									Aplicação de drenos a jusante da barragem	Prevenção		
Inspeção visual e Instrumentação									Deteção			
Lançamento de material "vedante" a montante da barragem									Prevenção			
Rebaixamento do reservatório	Prevenção											

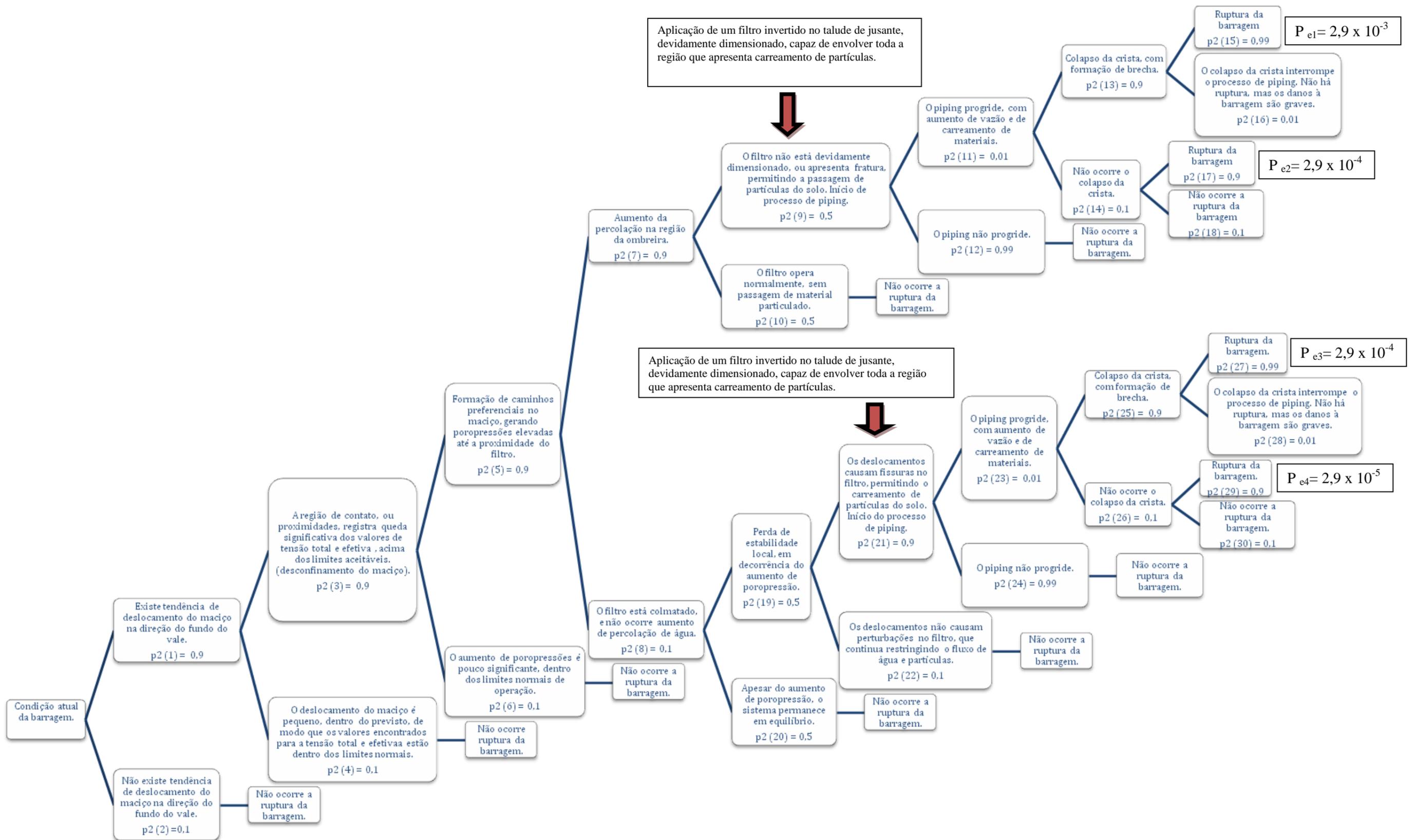
FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
3 Fundação												
Controle da percolação sob a barragem	3 (3) Excesso de percolação	Perda de água do reservatório	4	III	Tratamento inadequado da fundação	1	I	4	Controle rígidos dos critérios de projeto e construção	Prevenção	7	28
									Reforçar a fundação, com injeção ou melhoria dos sistemas de drenagem	Prevenção		
									Inspeção visual e Instrumentação	Detecção		
					Aspectos geológicos não identificados	2	II	8	Realizar as investigações geológicas com o critério necessário.	Detecção	7	56
	Reforçar a fundação, com injeção ou melhoria dos sistemas de drenagem	Prevenção										
	Inspeção visual e Instrumentação	Detecção										
	3 (4) Erosão Interna	Piping	9	V	Percolação excessiva de água, com o respectivo carreamento de material particulado.	1	I	9	Reforçar a fundação, com injeção ou melhoria dos sistemas de drenagem	Prevenção	7	63
									Aplicação de filtro invertido	Prevenção		
									Aplicação de drenos a jusante da barragem	Prevenção		
									Inspeção visual e Instrumentação	Detecção		
Lançamento de material "vedante" a montante da barragem									Prevenção			
Rebaixamento do reservatório	Prevenção											
4 Ombreira Direita												
Apoiar a barragem de aterro na interface com o terreno natural, mantendo sua estabilidade	4 (1) Movimento de massa na direção do fundo do vale	Instabilidade local	9	V	Falha de projeto e construção	2	II	18	Fechamento de trincas	Prevenção	4	72
									Recompactação	Prevenção		
									Aplicação de material mais plástico nesta região	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
	O vale da barragem é muito encaixado	3	II	27	Fechamento de trincas	Prevenção	4	108				
					Recompactação	Prevenção						
					Aplicação de material mais plástico nesta região	Prevenção						
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO DE CONTROLE	D	NPR		
4 Ombreira Direita												
Apoiar a barragem de aterro na interface com o terreno natural, mantendo sua estabilidade	4 (2) Erosão interna	Piping	9	V	Falha de projeto e construção	1	I	9	Fechamento de trincas	Prevenção	5	45
									Recompactação	Prevenção		
									Aplicação de material mais plástico nesta região	Prevenção		
									Uso de filtros, para retenção de partículas do solo	Prevenção		
					Inspeção visual e instrumentação	Detecção						
	O vale da barragem é muito encaixado	3	II	27	Fechamento de trincas	Prevenção	5	135				
					Recompactação	Prevenção						
					Aplicação de material mais plástico nesta região	Prevenção						
					Uso de filtros, para retenção de partículas do solo	Prevenção						
					Inspeção visual e instrumentação	Detecção						
5 Ombreira Esquerda												
Apoiar a barragem de aterro na interface com o terreno natural, mantendo sua estabilidade	5 (1) Movimento de massa na direção do fundo do vale	Instabilidade local	9	V	Falha de projeto e construção	2	II	18	Fechamento de trincas	Prevenção	4	72
									Recompactação	Prevenção		
									Aplicação de material mais plástico nesta região	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					O vale da barragem é muito encaixado	4	III	36	Fechamento de trincas	Prevenção			4	144
	Recompactação	Prevenção										
	Aplicação de material mais plástico nesta região	Prevenção										
	Inspeção visual e instrumentação	Detecção										
	5 (2) Erosão interna	Piping	9	V	Falha de projeto e construção	1	I	9	Fechamento de trincas	Prevenção	5	45
									Recompactação	Prevenção		
									Aplicação de material mais plástico nesta região	Prevenção		
									Uso de filtros, para retenção de partículas do solo	Prevenção		
					Inspeção visual e instrumentação	Detecção						
		O vale da barragem é muito encaixado	4	III	36	Fechamento de trincas	Prevenção	5	180			
						Recompactação	Prevenção					
Aplicação de material mais plástico nesta região						Prevenção						
Uso de filtros, para retenção de partículas do solo						Prevenção						
Inspeção visual e instrumentação						Detecção						

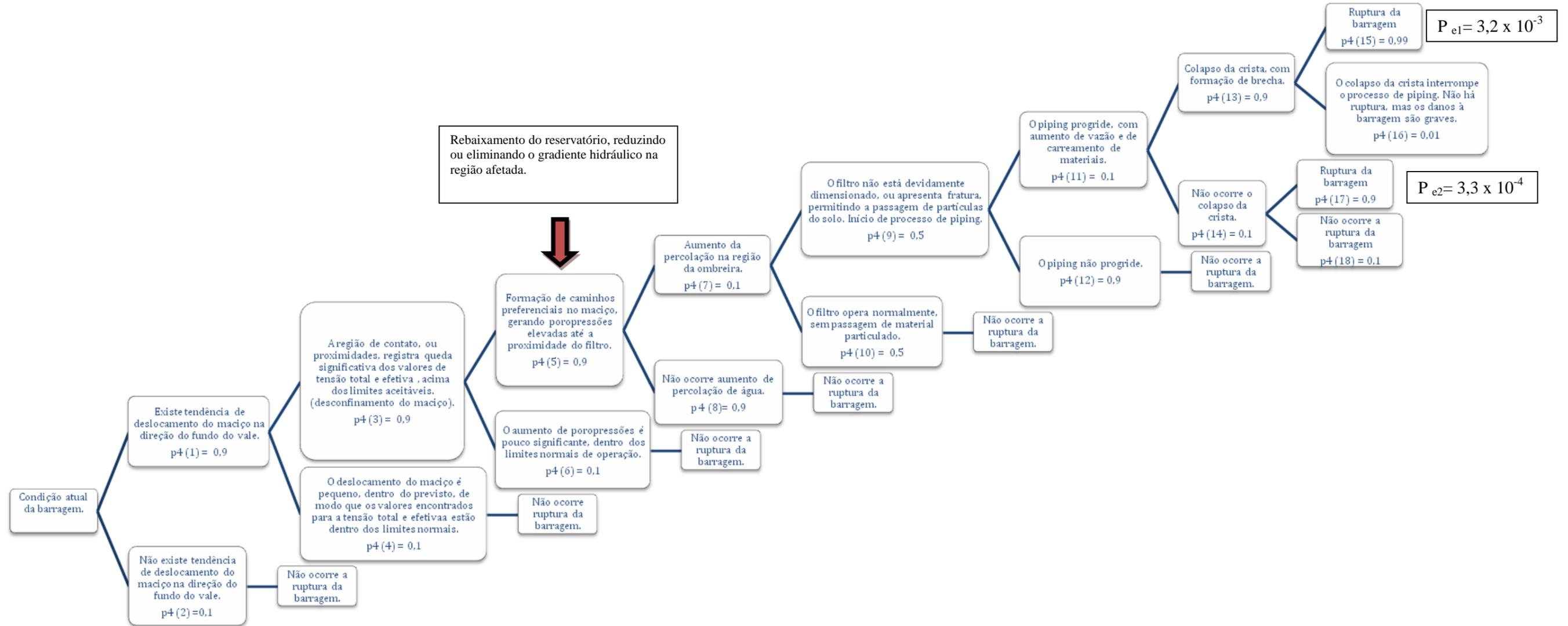
A.2.1 Árvore de eventos do comportamento esperado para o piping



A.2.2 Árvore de eventos considerando a aplicação de filtro a jusante



A.2.4 Árvore de eventos considerando o rebaixamento do reservatório



A.2.5 Árvore de eventos considerando o rebaixamento do reservatório e aplicação de filtro a jusante

