



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES**

**ANÁLISES DE RISCO APLICADAS A BARRAGENS DE TERRA E**  
**ENROCAMENTO:**

**ESTUDO DE CASO DE BARRAGENS DA CEMIG GT**

**ALEXANDRE VAZ DE MELO**

**Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2014**

Alexandre Vaz de Melo

**ANÁLISES DE RISCO APLICADAS A BARRAGENS DE TERRA E  
ENROCAMENTO:  
ESTUDO DE CASO DE BARRAGENS DA CEMIG GT**

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: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Terezinha de Jesus Espósito Barbosa

Coorientador: Prof<sup>º</sup> Dr<sup>º</sup> Mauro da Cunha Naghettini

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
Ano 2014

M528s

Melo, Alexandre Vaz de.

Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento  
[manuscrito]: estudo de caso de barragens da Cemig GT / Alexandre Vaz  
de Melo. - 2014.  
xviii, 168 f., enc.: il.

Orientadora: Terezinha de Jesus Espósito Barbosa.  
Coorientador: Mauro da Cunha Naghettini.

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

Apêndices: f.[53]

Inclui bibliografia.

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

CDU: 624.13(043)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ANÁLISES DE RISCO APLICADAS A BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO: ESTUDO DE CASO DE BARRAGENS DA CEMIG GT

#### ALEXANDRE VAZ DE MELO

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 28 de fevereiro de 2014, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Terezinha de Jesus Esposito Barbosa - Orientador  
UFMG

Prof(a). Mauro da Cunha Naghettini  
UFMG

Prof(a). Maria Giovana Parizzi  
UFMG

Prof(a). Luiz Rafael Palmier  
UFMG

Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2014.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

À querida Carol, pelo companheirismo e amor incondicional, essencial nos momentos mais difíceis. Amo você.

Aos meus pais, Mucio e Yara, que nunca mediram esforços para me dar as oportunidades que me trouxeram até aqui. À minha família, que sempre torceu por mim.

À Profa. Terezinha Espósito, pela excelente orientação, disponibilidade e por acreditar no meu potencial. O aprendizado foi de grande valia. Ao Prof. Mauro Naghettini, pela confiança e discussões importantes e equilibradas no grupo de pesquisa de gestão de risco em barragens.

Às minhas mentoras Teresa e Adelaide, por sempre me apoiarem, estimularem em mim a paixão pela Segurança de Barragens e me tornarem o profissional que sou hoje, quem sabe um dia igual a elas.

Ao Diego e à Paula, pela amizade, sintonia, conselhos, discussões sobre Segurança de Barragens, além do apoio decisivo para conclusão deste trabalho. Sem o suporte nas atividades profissionais não seria possível entregá-lo em tão pouco tempo.

Aos amigos da equipe Dams, Paulo César e Jader, pela parceria e ajuda constantes. Aos demais colegas da Gerência, pelo carinho.

À Cemig GT, pelo tradicional incentivo no aperfeiçoamento dos funcionários e pela viabilidade de aplicação prática (estudo de caso) do tema.

Aos professores do curso de Geotecnia (Gustavo, Lúcio, Graça e Giovana), pela partilha de seus conhecimentos. Aos colegas Matheus, Publio, Leandro e Gustavo, pelo companheirismo.

Aos meus melhores amigos, que tornaram esta caminhada menos árdua.

*"The problem is not the dams.*

*It is the hunger.*

*It is the thirst.*

*It is the darkness of a township.*

*It is township and rural huts without running water, light or sanitation.*

*It is the time wasted in gathering water by hand.*

*There is a real pressing need for power in every sense of the word."*

Nelson Mandela

*in Role of dams on the development and management of rivers basins*

# SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIV
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura da dissertação.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Barragens convencionais de terra e enrocamento.....	6
2.2 Riscos em barragens de terra e enrocamento.....	10
2.3 Gestão de risco aplicada a barragens.....	14
2.3.1 Avaliação de risco.....	17
2.3.1.1 Análise de risco.....	19
2.3.1.2 Apreciação de risco.....	24
2.3.2 Controle de risco.....	28
2.4 Gestão de risco no Brasil: Lei 12.334.....	29
2.5 Terminologia aplicada à gestão de risco.....	33
2.6 Métodos de análise de risco.....	34

2.6.1 Índice global de risco.....	37
2.6.2 Índice global de risco modificado.....	40
2.6.3 Índice de Lafitte.....	43
2.6.4 Metodologia para tomada de decisões: sistema de classificação de barragens Sabesp.....	46
2.6.5 Metodologia de classificação de barragens Cemig.....	49
2.6.6 Potencial de risco.....	54
2.6.7 Matrizes de classificação: Lei 12.334.....	58
2.6.8 Outros métodos de análise preliminar de risco.....	64
2.6.9 Diagramas de localização, causa e indicadores de falhas – LCI.....	66
2.6.10 Análise dos modos de falha e seus efeitos – FMEA.....	72
2.6.11 Análise por árvore de eventos – ETA.....	77
2.6.12 Análise por árvore de falhas – FTA.....	81
3 METODOLOGIA.....	84
3.1 Geral.....	84
3.2 Seleção do grupo de barragens.....	84
3.2.1 Área de concentração: foco em estruturas geotécnicas.....	84
3.2.2 Função da barragem: hidreletricidade.....	84
3.2.3 Porte da barragem: grandes barragens.....	85
3.2.4 Idade: Concepção à luz da moderna mecânica dos solos e engenharia de barragens.....	85
3.3 Coleta de dados.....	86
3.4 Aplicação de métodos de análise de risco.....	86
3.4.1 Aplicação de métodos de análise preliminar de risco em portfólio de barragens.....	87
3.4.2 Aplicação de métodos de análise de risco em barragens individuais.....	87
4 ESTUDO DE CASO.....	89
4.1 Parque gerador da Cemig Geração e Transmissão.....	89
4.2 Seleção da amostra de barragens.....	90



4.3 Caracterização dos empreendimentos.....	92
4.3.1 UHE Emborcação.....	92
4.3.2 UHE Irapé.....	94
4.3.3 UHE Jaguará.....	97
4.3.4 UHE Miranda.....	99
4.3.5 UHE Nova Ponte.....	102
4.3.6 UHE São Simão.....	104
4.3.7 UHE Três Marias.....	108
4.3.8 UHE Volta Grande.....	111
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	114
5.1. Aplicação dos métodos de análise preliminar de risco em portfólio.....	114
5.1.1 Aplicação do método índice global de risco.....	114
5.1.2 Aplicação do método índice global de risco modificado.....	116
5.1.3 Aplicação do método índice de Lafitte.....	118
5.1.4 Aplicação da metodologia Sabesp.....	120
5.1.5 Aplicação da metodologia Cemig.....	123
5.1.6 Aplicação do método potencial de risco.....	126
5.1.7 Aplicação das matrizes de classificação da Lei 12.334.....	129
5.2 Classificação final dos métodos de análise preliminar de risco em portfólio.....	132
5.3 Aplicação dos métodos de análise de risco em barragens individuais.....	135
5.3.1 Aplicação do método LCI.....	135
5.3.2 Aplicação do método FMEA.....	142
5.4 Avaliação em fases: análise preliminar de risco e análise individual.....	150
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	152
6.1 Conclusões.....	152
6.2 Sugestões para pesquisas futuras.....	156

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	158
APÊNDICE.....	i
Apêndice A.1.....	i
Apêndice A.2.....	vii
Apêndice A.3.....	xii
Apêndice A.4.....	xv
Apêndice A.5.....	xix
Apêndice A.6.....	xxi
Apêndice A.7.....	xxiii
Apêndice A.8.....	xxiv
Apêndice A.9.....	xxvii
Apêndice A.10.....	xxx
Apêndice A.11.....	xliv

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

<i>a</i>	Aceleração [ $g = m/s^2$ ]
<i>A<sub>n</sub></i>	Adequação ao item de critério de projeto atual [adimensional]
<i>C</i>	Consequência [adimensional ou perda de vidas, valor monetário]
<i>CL</i>	Índice parcial relativo às condicionantes locais [adimensional]
<i>C<sub>G</sub></i>	Capacidade de geração [adimensional]
<i>C<sub>J</sub></i>	Danos a jusante [adimensional]
<i>Conf</i>	Grau de confiança [adimensional]
<i>Cons</i>	Consequência [adimensional]
<i>C<sub>R</sub></i>	Volume do reservatório [adimensional]
<i>CRI</i>	Categoria de risco [adimensional]
<i>CT</i>	Características técnicas [adimensional]
<i>D</i>	Índice de detecção [adimensional]
<i>D<sub>G</sub></i>	Índice de gravidade da deterioração [adimensional]
<i>DPA</i>	Dano potencial associado [adimensional]
<i>D<sub>U</sub></i>	Índice de urgência da necessidade de reparo [adimensional]
<i>E</i>	Índice parcial relativo aos fatores externos ou ambientais [adimensional]
<i>EC</i>	Estado de conservação [adimensional]
<i>ER</i>	Estado real da barragem [adimensional]
<i>er<sub>i</sub></i>	Descritores do estado real da barragem [adimensional]
<i>F</i>	Índice parcial relativo à confiabilidade [adimensional]
<i>FO</i>	Índice parcial relativo às condicionantes locais [adimensional]

$g$	Gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
hm <sup>3</sup>	Hectômetro cúbico [hm <sup>3</sup> ]
$I$	Importância [adimensional]
$IC$	Índice de comportamento [adimensional]
$IG$	Índice de risco de Lafitte [adimensional]
$IGI$	Índice global de impacto [adimensional]
$IGI$	Índice global de risco [adimensional]
$i_i$	Descritores da importância [adimensional]
$Ind_{conf}$	Índice de confiança [adimensional]
$Ind_{crit}$	Índice de criticalidade [adimensional]
$Ind_{ord}$	Índice de ordenação [adimensional]
$Ind_{risco}$	Índice de risco [adimensional]
$ISE$	Índice parcial relativo aos impactos socioecon. no vale jusante [adimensional]
$m$	Metro [m]
$m^3$	Metro cúbico [m <sup>3</sup> ]
$MW$	Megawatt [MW]
$NPR$	Número de prioridade de risco [adimensional]
$O$	Índice de ocorrência [adimensional]
$P$	Periculosidade [adimensional]
$P$	Potencial de risco [adimensional]
$P$	Probabilidade [adimensional]
$PAR$	Pessoas em risco [pessoas]
$P_b$	Tipo da barragem [adimensional]
$PE$	Perdas econômicas [adimensional]
$P_f$	Tipo de fundação [adimensional]
$p_i$	Descritores da periculosidade [adimensional]

$P_i$	Idade [adimensional]
$PP$	Periculosidade potencial [adimensional]
$pp_i$	Descritores da periculosidade potencial [adimensional]
$PPV$	Perda potencial de vidas humanas [pessoas]
$PR$	Potencial de risco [adimensional]
$Prob$	Probabilidade [adimensional]
$PS$	Plano de segurança da barragem [adimensional]
$PV_{Pn}$	Peso do item de critério de projeto atual [adimensional]
$R$	Índice parcial relativo aos danos potenciais humanos e econ. [adimensional]
$R$	Risco [adimensional ou perda de vidas, valor monetário]
$R$	Risco estimado [adimensional]
$RPN$	<i>Risk Priority Number</i> [adimensional]
$S$	Índice de severidade [adimensional]
$V$	Vulnerabilidade [adimensional]
$V$	Velocidade [cm/s]
$v_i$	Descritores da vulnerabilidade [adimensional]
$V_p$	Índice de adequação aos critérios de projeto atuais [adimensional]
$V_m$	Índice da condição atual das estruturas [adimensional]

### **Letras Gregas**

$\alpha$	Descritor [adimensional]
$\alpha_g$	Índice global de risco [adimensional]
$\Sigma$	Somatório

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Seção transversal da barragem de Sadd El Kafara	6
FIGURA 2.2 Barragem de terra homogênea com filtro vertical e tapete horizontal	9
FIGURA 2.3 Barragem de terra zoneada com filtro vertical e tapete horizontal	9
FIGURA 2.4 Barragem de terra-enrocamento (núcleo central)	9
FIGURA 2.5 Barragem de terra-enrocamento (núcleo inclinado para montante)	10
FIGURA 2.6 Processo de identificação de risco	11
FIGURA 2.7 Perspectivas de sociedades orientadas para a segurança e o risco	15
FIGURA 2.8 Atividades fundamentais da gestão de risco	16
FIGURA 2.9 Atividades fundamentais da gestão de risco	17
FIGURA 2.10 Representação do processo de avaliação de risco	18
FIGURA 2.11 Princípios de aceitabilidade e tolerabilidade	25
FIGURA 2.12 Curvas F-N para o risco societal	26
FIGURA 2.13 Curvas F-N a) Austrália (ANCOLD) b) EUA (USBR)	27
FIGURA 2.14 Exemplo de matriz de risco com 5 classes de consequências e probabilidades	28
FIGURA 2.15 Exemplo de matriz de risco com 4 classes de consequências e probabilidades	28
FIGURA 2.16 Arranjo esquemático da Política Nacional de Segurança de Barragens	31
FIGURA 2.17 Matriz de risco Cemig	54
FIGURA 2.18 Parte de diagrama LCI	70
FIGURA 2.19 Planilha FMEA/FMECA	74
FIGURA 2.20 Matriz de risco FMEA	76
FIGURA 2.21 Características essenciais de uma árvore de eventos utilizada em barragens	78
FIGURA 2.22 Exemplo de árvore de eventos para o perigo de abalo sísmico	78
FIGURA 2.23 Exemplo de desencadeamento das árvores (lógica, eventos e consequência)	79
FIGURA 2.24 Exemplo de diagrama de influência	80
FIGURA 2.25 Representação esquemática da FTA	81
FIGURA 2.26 Exemplo de aplicação de uma árvore de falha	82
FIGURA 3.1 Esquema geral da metodologia	88
FIGURA 4.1 Usinas da Cemig GT em Minas Gerais	90
FIGURA 4.2 Seleção de usinas e respectivas bacias hidrográficas	91
FIGURA 4.3 Usina Hidrelétrica de Emborcação	92
FIGURA 4.4 Arranjo geral da UHE Emborcação	93

FIGURA 4.5 Seção da barragem de Emborcação	94
FIGURA 4.6 Usina Hidrelétrica de Irapé	95
FIGURA 4.7 Arranjo geral da UHE Irapé	96
FIGURA 4.8 Seção da barragem de Irapé	97
FIGURA 4.9 Usina Hidrelétrica de Jaguará	97
FIGURA 4.10 Arranjo geral da UHE Jaguará	98
FIGURA 4.11 Seção da barragem de Jaguará	99
FIGURA 4.12 Usina Hidrelétrica de Miranda	100
FIGURA 4.13 Arranjo geral da UHE Miranda	100
FIGURA 4.14 Seção da barragem de terra-enrocamento de Miranda	101
FIGURA 4.15 Seção da barragem de terra de Miranda	101
FIGURA 4.16 Usina Hidrelétrica de Nova Ponte	102
FIGURA 4.17 Arranjo geral da UHE Nova Ponte	103
FIGURA 4.18 Seção da barragem de Nova Ponte	104
FIGURA 4.19 Usina Hidrelétrica de São Simão	104
FIGURA 4.20 Arranjo geral da UHE São Simão	105
FIGURA 4.21 Seção da barragem da margem direita de São Simão	106
FIGURA 4.22 Seção da barragem da margem esquerda de São Simão	107
FIGURA 4.23 Seção da barragem do leito do rio de São Simão	107
FIGURA 4.24 Usina Hidrelétrica de Três Marias	108
FIGURA 4.25 Arranjo geral da UHE Três Marias	109
FIGURA 4.26 Seção da barragem do leito do rio de Três Marias	110
FIGURA 4.27 Seção da barragem sobre os condutos de Três Marias	110
FIGURA 4.28 Usina Hidrelétrica de Volta Grande	111
FIGURA 4.29 Arranjo geral da UHE Volta Grande	112
FIGURA 4.30 Seção da barragem de Volta Grande	113
FIGURA 5.1 Curva F-N - Diretriz de risco societal para barragens existentes	125
FIGURA 5.2 Proposta de apreciação de riscos conjugando matriz de risco e curva F-N	126
FIGURA 5.3 Matriz de risco do método LCI	141
FIGURA 5.4 Sistema da barragem de Três Marias	143
FIGURA 5.5 Sistema da barragem de Emborcação	143
FIGURA 5.6 Matriz de risco para os elementos críticos da barragem de Três Marias	147
FIGURA 5.7 Matriz de risco para os elementos críticos da barragem de Emborcação	149

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Descrições e funções das zonas de aterro de barragens	8
TABELA 2.2	Transformações verbais para numéricas	20
TABELA 2.3	Casos recentes de rupturas de barragens no Brasil	30
TABELA 2.4	Índice global de risco	38
TABELA 2.5	Índice global de risco modificado	42
TABELA 2.6	Índice de Lafitte	44
TABELA 2.7	Periculosidade potencial (PP)	47
TABELA 2.8	Estado real da barragem (ER)	48
TABELA 2.9	Potencial de risco	50
TABELA 2.10	Índices de adequação aos critérios de projeto atuais	51
TABELA 2.11	Itens de projeto a serem avaliados à luz dos critérios atuais	52
TABELA 2.12	Notas de gravidade e urgência	52
TABELA 2.13	Notas de consequência	53
TABELA 2.14	Periculosidade	55
TABELA 2.15	Vulnerabilidade	56
TABELA 2.16	Importância	56
TABELA 2.17	Classes do potencial de risco	57
TABELA 2.18	Matriz de classificação – características técnicas	59
TABELA 2.19	Matriz de classificação – estado de conservação	60
TABELA 2.20	Matriz de classificação – plano de segurança	61
TABELA 2.21	Matriz de classificação – dano potencial associado	62
TABELA 2.22	Características principais dos métodos utilizados	66
TABELA 2.23	Avaliação do impacto	68
TABELA 2.24	Definição de estudos subsequentes	69
TABELA 2.25	Classificação dos índices de severidade, ocorrência e detecção	75
TABELA 2.26	Severidade (S) avaliada sob diferentes aspectos	75
TABELA 4.1	Usinas da Cemig GT	89
TABELA 4.2	Características principais das barragens selecionadas no estudo de caso	91
TABELA 5.1	Pontuação do índice global de risco	115
TABELA 5.2	Classificação do índice global de risco	116
TABELA 5.3	Pontuação do índice global de risco modificado	117



TABELA 5.4 Classificação do índice global de risco modificado	118
TABELA 5.5 Pontuação do índice de Lafitte	119
TABELA 5.6 Classificação do índice de Lafitte	120
TABELA 5.7 Pontuação da metodologia Sabesp	121
TABELA 5.8 Classificação da metodologia Sabesp	122
TABELA 5.9 Pontuação da metodologia Cemig	124
TABELA 5.10 Classificação da metodologia Cemig	125
TABELA 5.11 Pontuação do potencial de risco	127
TABELA 5.12 Classificação do potencial de risco	128
TABELA 5.13 Pontuação matrizes de classificação Lei 12.334 – CT e PS	130
TABELA 5.14 Pontuação matrizes de classificação Lei 12.334 – EC e DPA	131
TABELA 5.15 Classificação com base na Lei 12.334	132
TABELA 5.16 Classificação das barragens em variados métodos	133
TABELA 5.17 Classificação consolidada baseada nos sete métodos	134
TABELA 5.18 Avaliação do índice global de impacto para o vale inferior a 5 km	136
TABELA 5.19 Avaliação do índice global de impacto para o vale de 5 km a 30 km	136
TABELA 5.20 Diagrama LCI Três Marias	137
TABELA 5.21 Diagrama LCI Emborcação	138
TABELA 5.22 Elementos críticos na barragem de Três Marias	140
TABELA 5.23 Elementos críticos na barragem de Emborcação	140
TABELA 5.24 Classes e índices utilizados no FMEA	144
TABELA 5.25 Leiaute de formulário para aplicação do FMEA	145
TABELA 5.26 Registros para justificativa e avaliação/pontuação do FMEA – Três Marias	145

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALARP	<i>As Low As Reasonably Practicable</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AS/NZS	<i>Australian / New Zealand Standard</i>
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CDA	<i>Canadian Dam Association</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEMIG GT	Cemig Geração e Transmissão S.A.
CI	<i>Condition Indexing Methods</i>
CIE	Companhia Internacional de Engenharia
CNPGB	Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – CE
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ETA	Análise por Árvores de Eventos
EUA	Estados Unidos da América

FMEA	Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos
FMECA	Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticalidade
FTA	Análise por Árvores de Falhas
HSE	<i>Health and Safety Executive</i>
IECO	<i>International Engineering</i>
IESA	Internacional de Engenharia
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
INAG	Instituto da Água
LCI	Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MIN	Ministério da Integração Nacional
MSK	Escala Medvedev-Sponheuer-Karnik
NOIB	Normas de Observação e Inspeção de Barragens
OBSIS	Observatório Sismológico
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PMI	<i>Project Management Institute</i>
PRA	<i>Portfolio Risk Assessment</i>
PREP	<i>Preliminary Risk Exposure Profile</i>
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
RAM-D	<i>Risk Assessment Methodology for Dams</i>
RBPS	<i>Risk Based Profiling System</i>
REMR	<i>Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation</i>
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens

SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SIR	Sismicidade Induzida por Reservatório
SPANCOLD	<i>Spanish National Committee on Large Dams</i>
TPR	<i>Technical Priority Rating</i>
UHE	Usina Hidrelétrica
UNB	Universidade de Brasília
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>

## RESUMO

Barragens são elementos críticos e essenciais em nossa infraestrutura e, diante dos acidentes ocorridos recentemente no país, existe uma forte demanda da sociedade em conhecer o risco imposto por essas estruturas. Prova disso é a criação da Política Nacional de Segurança de Barragens, que potencializa a relevância do tema e fomenta a cultura de segurança de barragens e gestão de risco. Nesse contexto, as técnicas de análise de risco, largamente difundidas em outras áreas de conhecimento, são instrumentos importantes em uma abordagem premente de gestão orientada para o risco. Apresenta-se um panorama dos métodos de análise de risco disponíveis na literatura com emprego potencial em barragens, tais como os Índices de Risco, Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI), Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) e Análises por Árvore de Eventos (ETA) e Árvore de Falhas (FTA). O presente trabalho tem como objetivo precípuo a aplicação dos métodos essencialmente de natureza qualitativa (Índices de Risco, LCI e FMEA), expondo suas vantagens e limitações e os utilizando para hierarquização de barragens, além de avaliação pormenorizada e sistêmica de estruturas identificadas como de maior risco. O estudo de caso é realizado em uma amostra de barragens de terra e enrocamento operada pela empresa Cemig Geração e Transmissão S.A. (Cemig GT), subsidiado por pesquisa documental, banco de dados de deteriorações e inspeções de campo. Em que pesem a variedade e a subjetividade dos métodos qualitativos, os resultados mostram que eles tendem a convergir quanto à análise das barragens com base no risco. A metodologia de aplicação evidencia a viabilidade de avaliação em fases, abrangendo a análise preliminar para portfólio de barragens, seguida pelas análises formais e individuais de risco para as estruturas mais críticas. Os resultados ratificam a aplicabilidade das técnicas de análise de risco, contribuindo para a consolidação dessa ferramenta no processo de avaliação de risco de barragens.

**Palavras Chaves:** *Análise de Risco, Métodos de Análise de Risco, Gestão de Risco, Avaliação de Risco, Segurança de Barragens*

## ABSTRACT

Dams are critical and essential elements in our infrastructure and, due to the recent accidents in the country (Brazil), there is an increasing demand from society to meet the risk imposed by these structures. This is underlined by the creation of the Dam Safety National Policy which enhances the relevance of the topic and fosters a culture of dam safety and risk management. In this context, technical risk analysis, widely adopted in other areas of knowledge, are important tools in a pressing approach towards risk oriented management. An overview of the risk analysis methods available in the literature with potential use in dams is presented, such as Risk Indexes, Location, Cause, Indicator Diagrams (LCI), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Event Tree Analysis (ETA) and Fault Tree Analysis (FTA). The study aims to apply the methods essentially qualitative (Risk Indexes, LCI and FMEA), exposing their advantages and limitations and using them to rank a group of dams, as well as to perform detailed and systematic evaluation of structures identified as posing higher risk. The case study is performed on a group of earth and rockfill dams operated by the company Cemig Generation and Transmission S.A. (Cemig GT), supported by documentary research, deterioration database and field inspections. Despite the variety and subjectivity of qualitative methods, the results show that they tend to converge in terms of the risk-based classification of the dams. The implementation methodology indicates the feasibility of the evaluation in phases, including the preliminary portfolio risk analysis for the portfolio of dams, followed by formal and individual risk analysis for the most critical structures. The results confirm the applicability of the risk analysis techniques, thus contributing to the consolidation of this tool in the process of dam risk assessment.

**Key words:** *Risk Analysis, Risk Analysis Methods, Risk Management, Risk Assessment, Dam Safety*

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

As barragens são estruturas construídas historicamente pelo homem para armazenar e controlar a água, sendo a base do desenvolvimento e da gestão dos recursos hídricos de bacias fluviais. Atualmente, elas são concebidas para as mais diversas finalidades (irrigação, hidreletricidade, abastecimento de água, retenção de resíduos minerais e industriais, controle de enchentes e recreação), desempenhando um papel importante na infraestrutura e desenvolvimento de um país, principalmente por meio da contínua disponibilidade de água e energia.

Existem diversos tipos de barragens, que podem ser classificadas conforme o material utilizado para construí-las. A escolha do tipo e seção transversal de uma barragem depende de vários fatores, tais como os materiais disponíveis na obra e as condicionantes relativas à forma do vale, natureza da fundação e sequência construtiva (CRUZ, 1996). Com os avanços científicos e tecnológicos, as estatísticas mostram que o número e a altura das barragens têm crescido largamente no mundo e, de acordo com a Comissão Internacional de Grandes Barragens (*International Committee on Large Dams*), estima-se que há atualmente cerca de 50 mil grandes barragens em operação (ICOLD, 2008a).

Dentre os tipos existentes, a barragem de aterro (terra e enrocamento) constitui-se em um dos principais, representando aproximadamente 75% do total mundial (ICOLD, 2008b). Sherard *et al.* (1966) destacam que uma das principais vantagens econômicas da barragem de terra é que a natureza já fabricou os materiais de construção e os colocou de forma gratuita no local. Além disso, é possível construir uma barragem de terra praticamente em qualquer tipo de fundação. Esses fatores fazem com que elas sejam consideradas soluções de projeto extremamente versáteis e, por isso, as mais construídas no mundo.

Embora as barragens ofereçam benefícios inquestionáveis para a sociedade, impulsionando um desenvolvimento sustentável, seus impactos sobre as áreas vizinhas incluem diversos fatores, entre eles, aspectos relacionados à segurança. Idealmente, toda barragem deveria ser adequadamente planejada, projetada, construída e mantida, mas a observação do grande número de acidentes recentes envolvendo barragens, especialmente estruturas geotécnicas, tem mostrado que esse ideal

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. De fato, 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 (ICOLD, 2005).

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). É reconhecido que essa abordagem tradicional também é um meio efetivo de gestão de risco, mas a pressão crescente da sociedade por transparência e responsabilidade nas tomadas de decisões tem feito com que técnicas de avaliação de risco, largamente difundidas em outras áreas de conhecimento, sejam empregadas como uma ferramenta adicional para auxiliar na gestão de segurança de barragens.

Pimenta (2009) também enfatiza a necessidade de que as abordagens tradicionais, orientadas para a segurança (centradas nas obras), evoluam para as abordagens orientadas para o risco, buscando tratar as ações, desempenho e consequências de forma integrada. Caldeira (2008) assinala que o uso do conceito de risco é interessante devido ao caráter racional, sistemático e transparente da sua quantificação.

Nesse contexto, surge o conceito atual de gestão de risco no âmbito da segurança de barragens, consistindo 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 emergência, revisão e comunicação). Essa nova abordagem insere-se como uma melhoria da prática tradicional e não como um senso de substituição.

Dentre as atividades fundamentais mencionadas, uma de particular interesse neste trabalho é a análise de risco. Ela representa um processo estruturado que visa estimar tanto a probabilidade de falha da barragem como a extensão da sua consequência. Isso se dá basicamente pelo cálculo de uma grandeza matemática (ou par de valores), que traduza as duas variáveis. ICOLD (2005) assinala que a estimativa do risco não é uma propriedade física da barragem, e sim uma representação matemática do seu estado de conhecimento e confiança no futuro desempenho.



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.

Existem vários métodos para análise de risco disponíveis na literatura, entre eles os Índices de Risco, Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI), Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), Análise por Árvore de Eventos (ETA) e Análise por Árvore de Falhas (FTA). Métodos como Índice de Risco, FMEA e LCI são essencialmente qualitativos, enquanto que as árvores de eventos (ETA) e de falhas (FTA) podem ser utilizadas tanto qualitativamente como quantitativamente. Basicamente, todos os métodos têm em comum a análise de eventos indesejáveis, das suas respectivas causas, efeitos e consequências.

Nesse sentido, verifica-se que vários dos métodos são potencialmente aplicáveis a barragens, cujo caráter é singular devido ao seu comportamento ser condicionado pelos vários subsistemas, componentes e respectivas interligações. A aplicação pode ser realizada tanto em um portfólio de barragens como em barragens individuais.

## **1.2 Justificativa**

Perini (2009) ressalta que abordagens com base no risco em barragens vêm sendo consideradas por várias organizações e em legislações de outros países, mas no Brasil sua utilização ainda é incipiente. ICOLD (2005) e Pimenta (2009) também apontam que a implementação de atividades de gestão e de análise de risco ainda está longe de se constituir uma prática corrente na maioria dos países membros da Comissão Internacional de Grandes Barragens.

Diante do grande interesse social com as infraestruturas existentes, especialmente com as barragens, que possuem histórico de rupturas recentes no Brasil, há um campo fértil para implementação dos conceitos de gestão de risco e aplicação dos métodos de análises de risco em barragens. A Lei nº

12.334/2010, recentemente em vigor no Brasil, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, potencializa a relevância do tema, fomentando a cultura de segurança de barragens e gestão de risco.

ICOLD (2005) enfatiza que a avaliação de risco formal para barragens, utilizando métodos reconhecidos de análise de risco, está em fase de desenvolvimento e mais pesquisas e discussões são necessárias. O tema do presente estudo favorece a abertura dessa discussão sobre a aplicabilidade de análises de risco dentro da gestão de segurança de barragens.

Além disso, o processo de análise de risco, por si só, traz inúmeras vantagens para o tomador de decisão. Caldeira (2008) aponta que a análise de risco, como um processo estruturado de apoio à decisão, providencia uma técnica consistente de comparação da segurança relativa das estruturas, permitindo estabelecer prioridades com vistas ao aumento da segurança estrutural. Hartford e Baecher (2004) assinalam que as técnicas de análise de risco melhoram o processo tradicional, fornecendo, entre vários benefícios, uma análise ampla e integrada de todos os componentes do sistema da barragem e como eles interagem entre si.

Assim sendo, diante do grande potencial de aplicação das análises de risco em barragens, considera-se de grande atualidade e relevância a presente dissertação, que busca contribuir para a consolidação da ferramenta no domínio da gestão de risco e segurança de barragens.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo geral da dissertação é a aplicação, a análise e a discussão de técnicas de análises de risco em barragens de terra e enrocamento, abrangendo métodos de análise preliminar de risco para portfólio de barragens e métodos formais de análise de risco em barragens individuais.

Para alcançar o objetivo principal, este estudo apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Revisar conceitos e princípios fundamentais de gestão de risco no âmbito da segurança de barragens;
- Apresentar e avaliar os diferentes métodos de risco potencialmente aplicáveis a barragens de terra e enrocamento. Caracterizar seus objetivos, princípios, procedimentos de aplicação, benefícios e limitações;

- Analisar e classificar um portfólio de barragens da Cemig GT à luz dos métodos de análise preliminar de risco: índice global de risco; índice global de risco modificado; índice de Lafitte; metodologia de classificação de barragens Sabesp; potencial de risco; metodologia de classificação de barragens Cemig e matrizes de classificação (Lei 12.334);
- Avaliar de forma pormenorizada duas barragens identificadas com maiores riscos, por meio dos métodos Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI) e Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA);
- Validar a proposta metodológica de avaliação em fases, composta por análise preliminar de risco em portfólio seguida pelas análises formais e individuais de risco.

#### **1.4 Estrutura da dissertação**

O trabalho em questão está dividido em 6 capítulos. Na sequência do presente capítulo introdutório (1), o capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, abrangendo, além de uma apresentação das barragens de terra e enrocamento e seus riscos associados, uma revisão dos conceitos e aspectos relacionados à gestão de risco e seu estado da arte. Aborda também alguns dos principais métodos de análise de risco, aplicados a barragens, utilizados no mundo e, principalmente, no Brasil. Os métodos enquadram-se tanto em análises preliminares de portfólios, como em barragens individuais.

No capítulo 3 é caracterizada a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa, sintetizando os critérios de seleção de barragens para o estudo de caso, o processo de pesquisa documental e coleta de dados e a definição dos métodos de análise de risco a serem empregados.

No capítulo 4 apresenta-se o estudo de caso, com breve descrição da amostra de barragens selecionadas com base nos critérios propostos na metodologia. Os resultados e discussões, retratados no capítulo 5, envolvem a aplicação dos métodos de análise de risco e a validação da proposta metodológica.

O último capítulo (6) descreve as considerações finais do trabalho, as limitações e as potencialidades do estudo e metodologia proposta, bem como recomendações para trabalhos futuros.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas que subsidiaram esta dissertação, assim como os apêndices elaborados pelo autor.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Barragens convencionais de terra e enrocamento

A construção de barragens é uma das atividades técnicas mais antigas executadas em benefício das civilizações. Barragens construídas com solos e rochas são conhecidas desde o terceiro milênio antes de Cristo (KUTZNER, 1997).

A barragem mais antiga registrada no mundo é a de Jawa, na Jordânia, 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 bem conhecida e que remete à mesma época é a barragem de Sadd el Kafara, localizada no Egito, de aproximadamente 2.650 AC. (FAHLBUSCH, 2009). Apesar das largas dimensões da seção transversal, o projeto da barragem de Sadd El Kafara é interessante pela aparente semelhança com as barragens modernas de enrocamento com núcleo central de argila (terra-enrocamento). A FIG. 2.1 mostra a seção da barragem de 14 m de altura e 108 m de extensão.

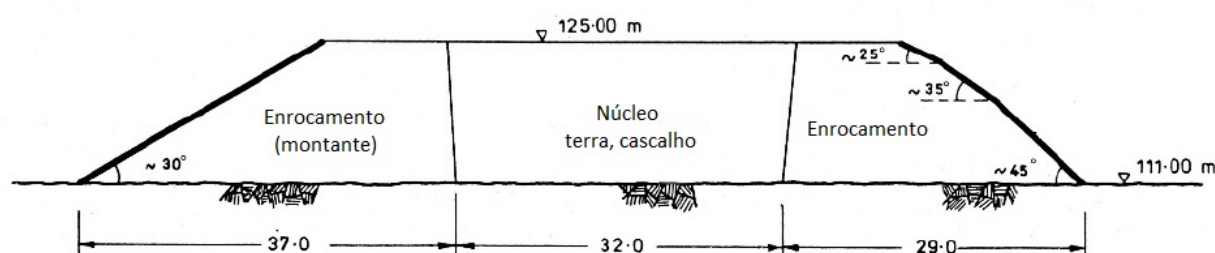


FIGURA 2.1 – Seção transversal da barragem de Sadd El Kafara.

Fonte: Adaptado de FAHLBUSCH, 2008, p. 15.

Jansen (1988) relata que 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.

Em meados do século XX, os avanços científicos e tecnológicos na construção de aterros, especialmente no que se refere ao transporte e compactação por meio de equipamentos mecânicos,

impulsionaram a construção de grandes barragens. No entanto, Jansen (1988) ressalta que, apesar dos importantes avanços alcançados nos tempos modernos, a engenharia tem muitas limitações reconhecidas. A medida e o caráter de risco não são totalmente previsíveis em todos os casos. Isso é especialmente importante quando se considera que a matéria-prima são os materiais naturais. Em se tratando do que tem sido chamado de moderna mecânica de solos, Cruz (1996) a associa apenas aos projetos e construções mais recentes de barragens, significando uma referência aos últimos 50 ou 60 anos.

Barragens podem ser classificadas em diferentes categorias, dependendo do propósito da classificação. Um dos tipos mais comum de classificação é aquela baseada nos materiais utilizados para sua construção. De especial interesse neste trabalho são as barragens de terra (homogênea e zoneada) e as barragens de enrocamento com núcleo de argila (conhecidas também como terra-enrocamento).

Silva Filho (2001) define que as barragens de terra e/ou enrocamento são aquelas construídas com materiais naturais, tais como argilas, siltes e areias, ou com materiais produzidos artificialmente, tais como britas, enrocamentos ou rejeitos de mineração. São constituídas, via de regra, com materiais de áreas de empréstimos (ou escavações obrigatórias) e construídas sob rigoroso processo de controle.

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 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. 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.

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 anteriores, pois elas necessitam ser compatíveis com a deformabilidade e resistência dos materiais utilizados na estrutura.

Dado o exposto, tem-se que as barragens de terra e de enrocamento constituem dois dos principais tipos de barragens em todo o mundo e são, portanto, soluções de projeto bastante versáteis. Cruz (1996) considera que elas 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. Fell *et al.* (2005) compilam na TAB. 2.1 (modificada) as zonas geralmente utilizadas nos projetos e suas respectivas funções para o bom desempenho de uma barragem. O sistema numérico é apenas indicativo, uma vez que não há uma codificação universal para zonas de aterros de barragens. As FIG. 2.2 a 2.5 ilustram as seções típicas das barragens convencionais de terra e terra-enrocamento e alguns dos tratamentos de fundação básicos e usualmente aplicados.

TABELA 2.1 – Descrições e funções das zonas de aterro de barragens

ZONA	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO
1	Núcleo argiloso	Controle da percolação através da barragem.
2A	Filtro fino	(a) Controle de erosão interna da zona 1, (b) Controle de erosão interna da fundação barragem / drenagem (quando usado como tapete horizontal), (c) Controle de poropressão no talude de jusante quando utilizado como dreno vertical.
2B	Filtro grosso	(a) Descarga / drenagem das águas de percolação coletadas nos drenos vertical ou horizontal, (b) Controle de erosão interna da zona 2A para o enrocamento.
2C	(i) Filtro / Transição sob rip-rap	Controle de erosão da zona 1 através do rip-rap.
	(ii) Filtro / Transição de montante	Controle de erosão da zona 1 para o enrocamento de montante do núcleo da barragem.
1-3	Solo-enrocamento	Fornece estabilidade e controle parcial de erosão interna.
3A	Enrocamento fino	Fornece estabilidade. Usualmente é livremente drenante para permitir descarga da percolação através da barragem. Previne erosão interna da zona 2B para o enrocamento grosso.
3B	Enrocamento grosso	Proporciona estabilidade. Usualmente é livremente drenante para permitir descarga da percolação através e sob a barragem.
4	Rip-rap, Enrocamento de proteção	Controle de erosão da face de montante por ações de ondas e também utilizado para controle de erosão do pé de jusante devido ao refluxo de água vertida.

Fonte: Adaptado de FELL *et al.*, 2005, p. 2.

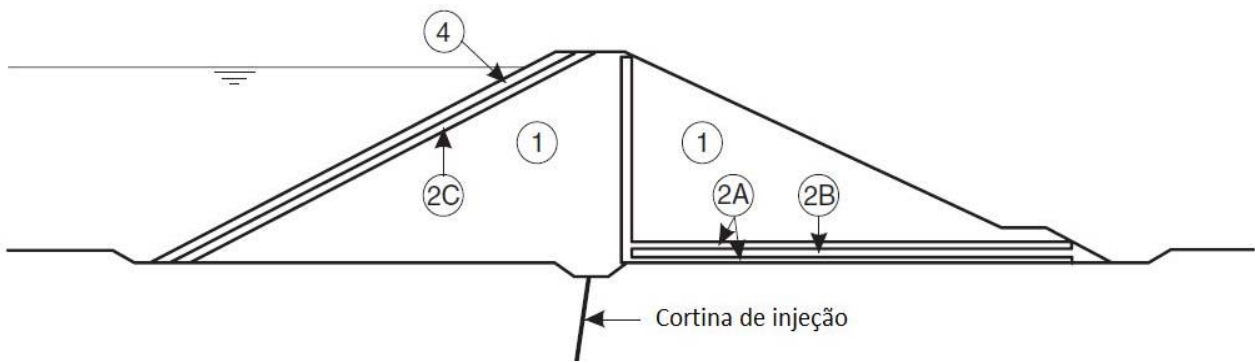


FIGURA 2.2 – Barragem de terra homogênea com filtro vertical e tapete horizontal

Fonte: Adaptado de FELL *et al.*, 2005, p. 3.

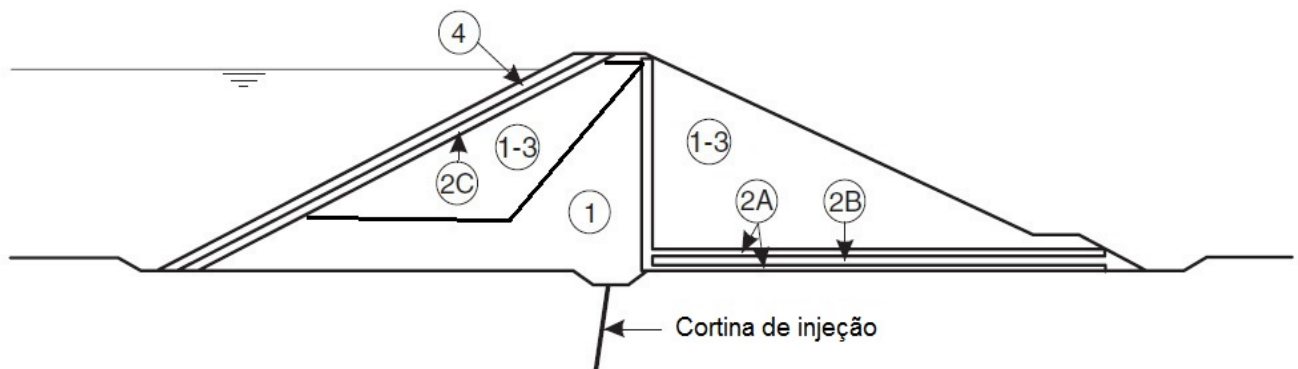


FIGURA 2.3 – Barragem de terra zoneada com filtro vertical e tapete horizontal

No caso da barragem de terra zoneada ilustrada na FIG. 2.3, o material chamado de “solo-enrocamento” (1-3) trata-se, geralmente, de material granular, mais permeável e resistente aos deslizamentos. O material pode ser, por exemplo, um saprolito ou solo arenoso.

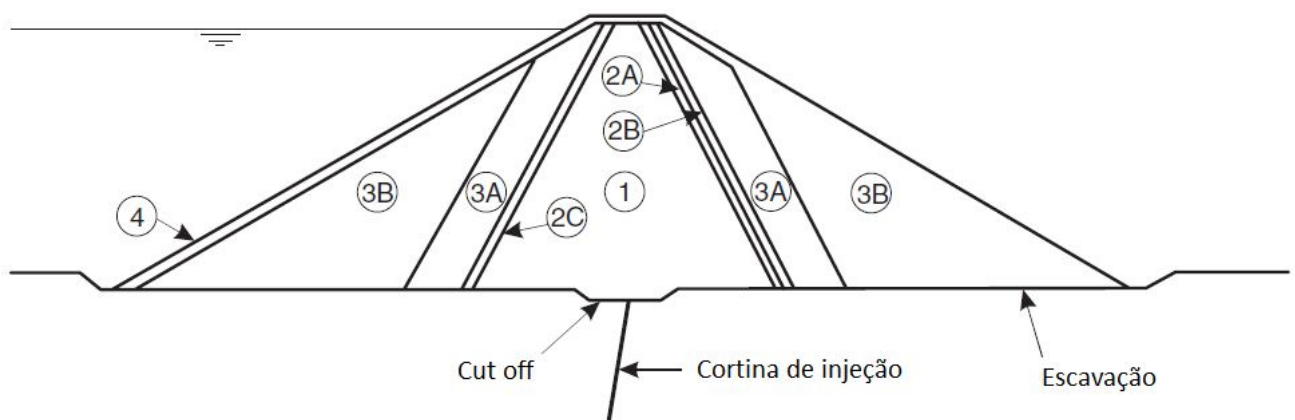


FIGURA 2.4 – Barragem de terra-enrocamento (núcleo central)

Fonte: Adaptado de FELL *et al.*, 2005, p. 3.

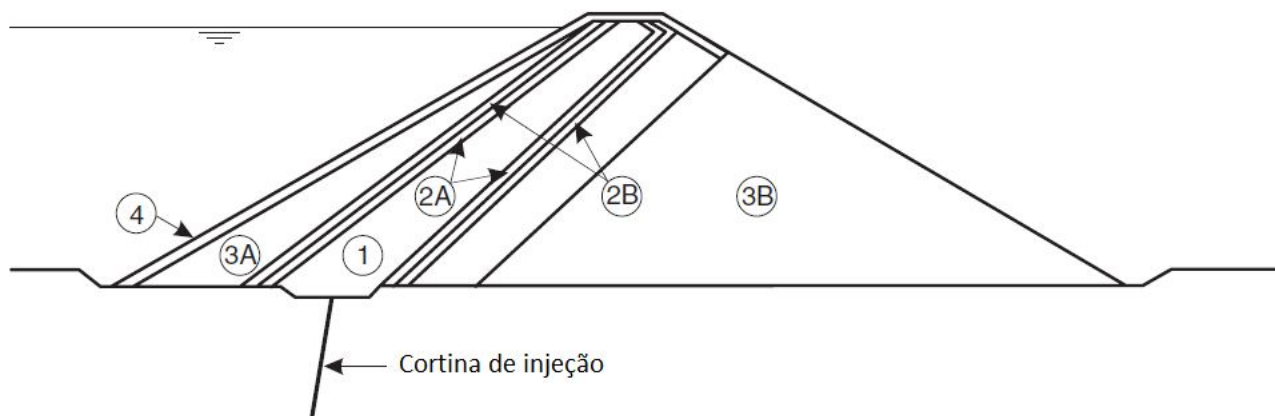


FIGURA 2.5 – Barragem de terra-enrocamento (núcleo inclinado para montante)

Fonte: Adaptado de FELL *et al.*, 2005, p. 3.

Acrescenta-se que as barragens são complementadas por estruturas anexas, igualmente importantes nas barragens de hidroeletricidade, como obras de desvio, vertedouro, tomada de água, etc. Oliveira e Brito (1998) destacam que seus detalhes de projeto e construção, assim como seus requisitos de fundação, podem ser, por vezes, mais complexos do que os da própria obra da barragem.

## 2.2 Riscos em barragens de terra e enrocamento

Devido à polissemia do termo “risco”, empregado em vários campos de conhecimento, é importante a discussão de que ele pode remeter preliminarmente a duas definições na terminologia presente, as quais devem ser distinguidas. A primeira definição se refere a uma condição com potencial de gerar um dano, ou seja, a uma condição perigosa (com caráter de incerteza). É equivalente ao termo em inglês *hazard*, cuja tradução para a língua portuguesa também pode recair sobre a palavra risco, sendo o mais adequado, no entanto, relacioná-la a perigo. Essa adequação deve ser empregada, pois se considera que uma barragem não está exposta a um risco, e sim a uma condição de perigo, uma vez que, no âmbito da avaliação do risco, o risco, na realidade, se calcula (sob a óptica do cenário, probabilidade e consequência – segunda definição). No item 2.5 e Apêndice A.1 é sintetizada a terminologia, visando uniformizar a comunicação sobre riscos.

Outra abordagem possível é quando se trata, de modo geral, do processo de identificação de riscos, que representa a determinação do que pode dar errado, por que e como. Nesse caso, o processo envolve o reconhecimento dos perigos (ou eventos iniciadores) aos quais a barragem está exposta, os modos de falha, respostas e resultados nos subsistemas e sistema, fatores de exposição e as



consequências adversas resultantes (CNPGB, 2005; CALDEIRA, 2008; BOWLES, 2010). A FIG. 2.6 ilustra o processo.



FIGURA 2.6 – Processo de identificação de riscos

Fonte: Adaptado de BOWLES, 2010, p. 6.

Sobre os perigos, ou seja, a fonte de dano potencial (ou evento iniciador que pode conduzir a um modo de falha), eles resultam tanto de uma causa externa como de uma vulnerabilidade interna da barragem (causas intrínsecas). Eles podem ter origem nas diferentes fases de vida de uma barragem: projeto, construção e operação. Conforme anotado por Hartford e Baecher (2004), a identificação dos perigos (*hazards*) é uma das etapas fundamentais para elaboração da análise de risco.

Entretanto, assim como ocorre com sua terminologia, verifica-se na literatura que não existe uma classificação unificada sobre os perigos associados às barragens. Além de serem os mais variados possíveis, eles são agrupados e listados de diferentes formas e naturezas, sendo comum encontrar referências dúbias com modos de falha e respostas do sistema (barragem). Uma adequada classificação de perigos deve ser lógica, permitindo ampliação e subdivisões, caso necessário.

Uma classificação adotada para os perigos (*hazards*) é o agrupamento em “riscos” humanos, naturais e tecnológicos (ICOLD 2005). Os “riscos” naturais (como cheias e sismos) representam um risco inevitável, mas, por vezes, podem ser estatisticamente mensurados. Os “riscos” humanos estão associados, evidentemente, ao comportamento humano, citando, por exemplo, atos de sabotagem, falhas humanas e negligência. Já os “riscos” tecnológicos podem ser associados a processos e produtos tecnológicos (emprego de novas tecnologias) que, por sua vez, se relacionam a fatos como insuficiência de sistemas e componentes de construção (por envelhecimento ou desgaste) e projetos e materiais inadequados. Dalcher (2011) sustenta uma questão interessante de que o progresso leva a novos “riscos”, e, portanto, eles permanecerão como uma consequência da inovação tecnológica.

Hughes *et al.* (2000) identificam o que eles definem por perigos primários e seus respectivos mecanismos iniciadores. Ainda ressaltam que a maior parte dos riscos e mecanismos é facilmente identificável durante as atividades de monitoramento e inspeções visuais. Os perigos primários classificados e alguns exemplos de mecanismos iniciadores são:

- Externos: galgamento, erosão superficial, perda de proteção superficial do talude, instabilidade de encostas, sismos e cheias;
- Internos (estruturais da barragem): instabilidade de massa, escorregamento, percolações elevadas, erosão interna, deformações e recalques, liquefação, perda de integridade do núcleo, efeitos de interface, poropressões e subpressões elevadas, obstrução de drenagem, tensões locais elevadas, buracos de animais e efeitos de crescimento de vegetação;
- Internos (fundações e ombreiras): instabilidade de massa, escorregamento, erosão interna, deformações e recalques, interface barragem/fundação, poropressões elevadas, perda de integridade do *cutoff*, liquefação e cavidades;
- Estruturas auxiliares: instabilidade, tensões e fissuras, deformações excessivas, poropressões, válvulas, comportas e equipamentos de controle;
- Intrínsecos (projeto/construção): concepção, projeto, detalhamento e construção inadequados;
- Efeitos de envelhecimento: deterioração de materiais e componentes, desagregação de solos e rochas e efeitos térmicos;
- Operacional: falha de operação (erro humano), monitoramento e manutenção inadequados e bloqueio de vertedouros;
- Induzidos: aviões e outros impactos, sismos artificiais, vandalismo e terrorismo.

Verifica-se que vários dos mecanismos listados podem ser facilmente inter-relacionados, como também sub-caracterizados. De maneira geral, observa-se que os perigos acabam incidindo ou nas fontes externas (representados por eventos extremos, sejam naturais ou da atividade humana) ou internas (ou intrínsecas, geralmente, associadas a deficiências fundamentais de projeto e construção ou falhas na operação e manutenção). Essa classificação é ratificada pela Associação Canadense de Barragens (CDA, 2007).

Caldeira (2008) agrupa os perigos (eventos iniciadores) nas seguintes categorias:

- Ações externas extremas: cheias e sismos;
- Anomalias nos procedimentos operacionais: bloqueio nos equipamentos e erros humanos;

- Deficiências de projeto ou de construção (que conduzem a processos internos de deterioração);
- Rupturas tecnológicas: mecânicas ou elétricas de equipamentos (corrosão e fadiga);
- Ações humanas e acidentais: atos de guerra, de vandalismo ou de sabotagem.

Em vista das abordagens apresentadas, verifica-se que a categorização dos perigos não é trivial e nem sempre suas subdivisões são independentes. No caso da sua identificação, pode ser relativamente imediata para as fontes externas, mas para as internas pode não ser tão simples.

Definidas as fontes ou situações potenciais de dano (perigos), e não menos importante para alcançar a estimativa do risco, são as etapas posteriores de identificação dos modos de falha, associados às respostas do sistema, e respectivas consequências.

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).

Hartford e Baecher (2004) comprovam que vários estudos anteriores, com registros históricos de ruptura de barragens, identificam essas três categorias de modos de falha como sendo as mais comuns que ocorrem na prática.

As categorias mencionadas, no entanto, são bastante amplas e consideram o sistema macro (barramento). Evidentemente, essas categorias gerais de modos de falha devem ser decompostas nos

subsistemas e detalhadas quando da realização das análises, em um nível mais fundamental e com o estudo pormenorizado dos mecanismos de falha.

Por fim, identificam-se os fatores de exposição relacionados ao agravamento ou atenuação dos efeitos durante a ocorrência do cenário da falha e as consequências em termos de impactos sociais, ambientais, econômicos e perda de vidas humanas.

No contexto genérico de gestão de risco, a identificação de riscos ganha elevada importância, sendo considerada, às vezes, uma etapa independente no processo, conforme observado em AS/NZS (1999), PMI (2008) e ABNT (2009). Contudo, no âmbito das barragens é consenso que a identificação dos riscos é parte integrante do processo de análise de risco, conforme verificado em Bowles (2010). Caldeira (2008) ressalta que o importante é que a identificação dos riscos seja realizada de forma exaustiva e sistemática.

### **2.3 Gestão de risco aplicada a barragens**

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

A abordagem metodológica orientada para o risco tem ganhado destaque somente nas últimas décadas, sendo, até então, bastante focada na segurança. A questão da segurança era compreensível, pois, como aponta Rettemeier *et al.* (2001), tradicionalmente as barragens são consideradas seguras, porque tem sido construídas de acordo com elevados padrões técnicos de qualidade. Na abordagem tradicional (centrada na segurança), a incerteza é levada em consideração na adoção de valores extremos de carregamento, valores conservadores para as variáveis de resistência e na aplicação de fatores de segurança. Alternativamente, medidas reconhecidamente conservadoras de projeto são incorporadas no projeto de barragens (ICOLD, 2005). Apesar disso, a sociedade tem se tornado cada vez mais consciente que sempre existe um risco residual que deve ser avaliado, apreciado e gerido. A segurança, como um valor absoluto, é inatingível. As duas perspectivas (segurança e risco) são ilustradas na FIG. 2.7.

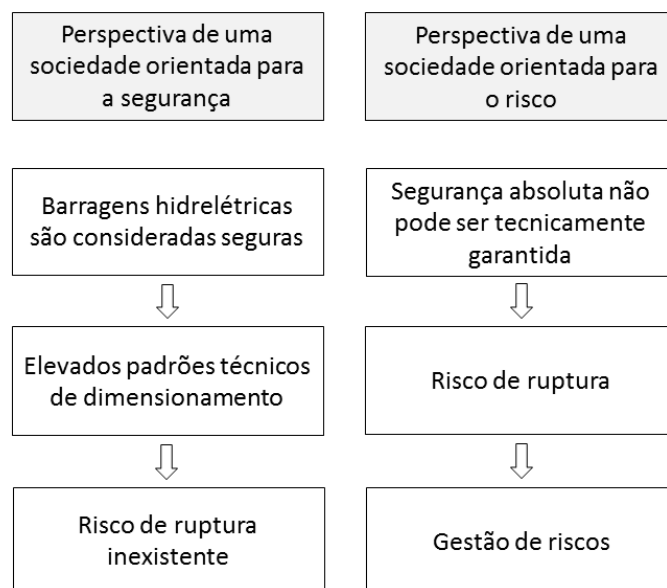


FIGURA 2.7 – Perspectivas de sociedades orientadas para a segurança e o risco

Fonte: Adaptado de RETTEMEIER *et al.*, 2001, p. 2.

ICOLD (2005) ainda reforça que o aumento da complexidade da tomada de decisão vem ao encontro da abordagem orientada para o risco, fazendo com que a abordagem tradicional baseada em normas ou padrões de segurança se torne cada vez mais inadequada para lidar com barragens. Todavia, considerando que os conceitos atuais estão ainda em fase de desenvolvimento, divulgação e aceitação na esfera da segurança de barragens, é prudente considerar que essa nova abordagem se insira como um senso de melhoria e complementação da prática tradicional, e não como sua substituição.

Hartford e Baecher (2004) também defendem o uso do processo de gestão baseado no risco como uma melhoria na prática tradicional da gestão da segurança de barragens, na qual os três componentes fundamentais - monitoramento, revisões periódicas de segurança e procedimentos de manutenção e operação - são as atividades centrais do processo.

Além disso, não há dúvidas de que a abordagem tradicional também tem sido um meio efetivo de “gestão de risco”, haja vista o histórico de projetos e empreendimentos com bons registros de desempenho (ICOLD, 2005).

No contexto atual, a gestão de risco consiste, portanto, na aplicação sistemática, coordenada e integrada de políticas de gestão, procedimentos e práticas para as tarefas de identificação, análise, avaliação, mitigação e controle do risco.

As atividades fundamentais de gestão de risco, tratadas com maior profundidade nos tópicos subsequentes, têm sido subdivididas em:

- Avaliação de risco
  - Análises de risco
  - Apreciação de risco
- Controle de risco

Kreuzer (2000) e Pimenta (2009) esboçam nas FIG. 2.8 e 2.9, respectivamente, as atividades fundamentais de gestão de risco.

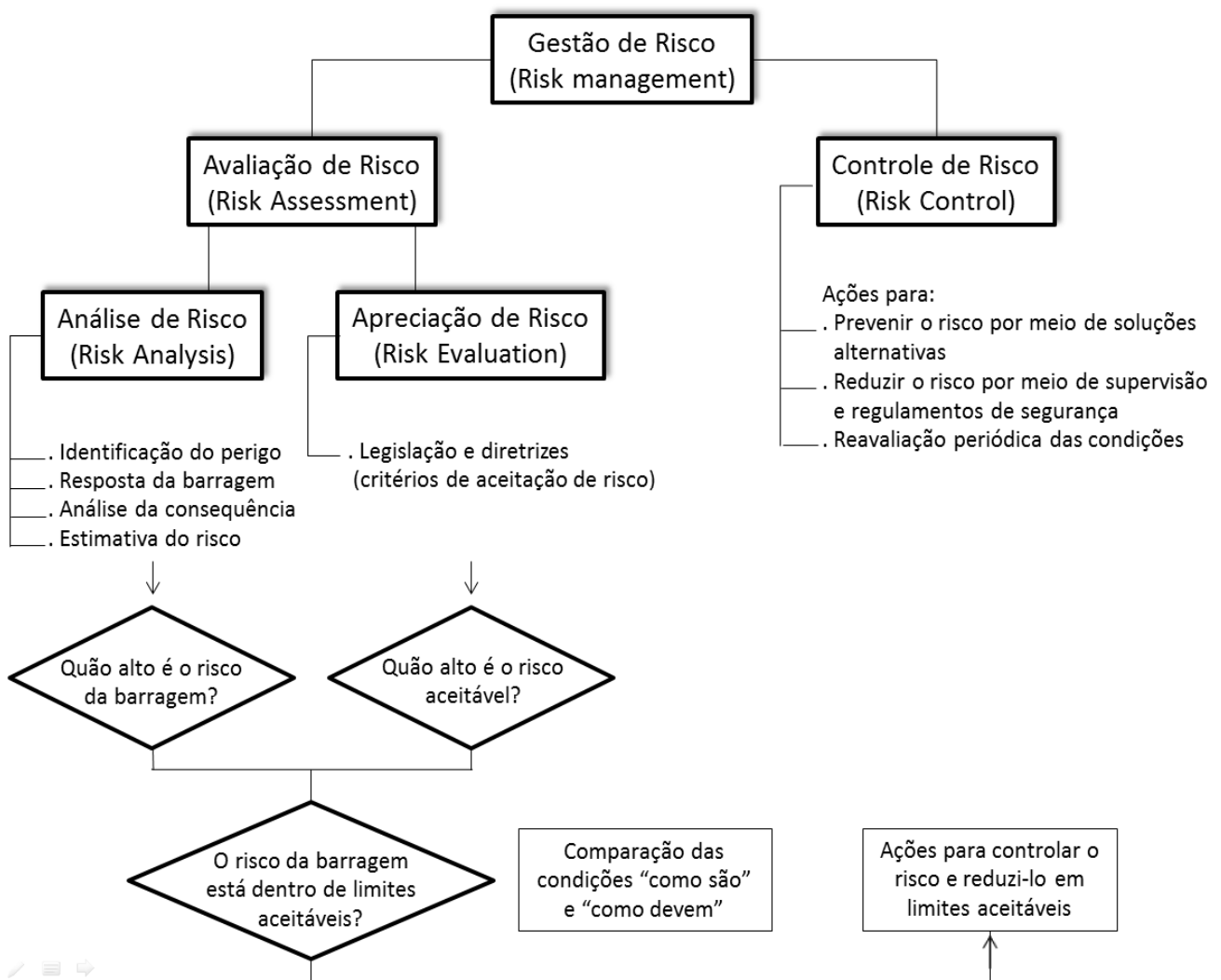


FIGURA 2.8 – Atividades fundamentais da gestão de risco

Fonte: Adaptado de KREUZER, 2000, p. 782.

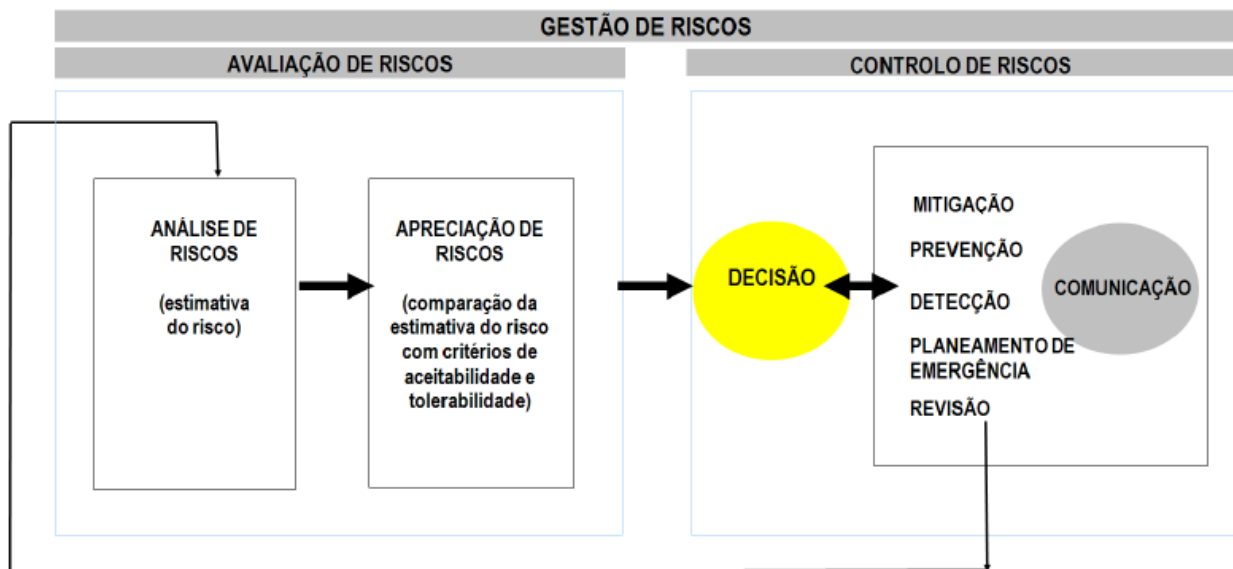


FIGURA 2.9 – Atividades fundamentais da gestão de risco

Fonte: PIMENTA, 2009, p. 135.

Pimenta (2009) assinala ainda a natureza multidisciplinar das atividades, que vão muito além das áreas técnico-científicas das análises de risco (áreas de conhecimento da geologia, geotecnia, estruturas, hidrologia, hidráulica, eletromecânica). Importante ressaltar que, em especial as atividades de apreciação de risco e os processos de decisão e de comunicação, também agregam outras áreas como a política, a social e econômico-financeira.

Com relação ao processo de decisão, embora na FIG. 2.9 esteja inserido na atividade de controle de risco, alguns autores, como CNPGB (2005) e Bowles (2010), entendem que a decisão não é de exclusividade da atividade de controle de risco, estando na fronteira entre a avaliação e o controle.

Por fim, Caldeira (2008) lembra que as atividades de gestão de risco devem se constituir em um processo transparente de suporte a boas decisões para o benefício da sociedade em geral.

### 2.3.1 Avaliação de risco

A atividade de avaliação de risco incorpora o processo total de análise e apreciação de risco. De modo mais amplo, é definido como sendo o processo de tomada de decisão se os riscos existentes são toleráveis e as atuais medidas de controle são adequadas, e, em caso negativo, se as medidas alternativas de controle do risco são justificadas ou serão implementadas (ANCOLD, 2003; CNPGB, 2005; ICOLD, 2005).

Na avaliação do risco, os processos de análise e apreciação de risco devem estar integrados, sendo feitas recomendações sobre a necessidade de se reduzir o risco (ICOLD, 2005). Segundo Hartford e Baecher (2004), o processo tem que responder à questão se a barragem está suficientemente segura, conforme FIG. 2.10.

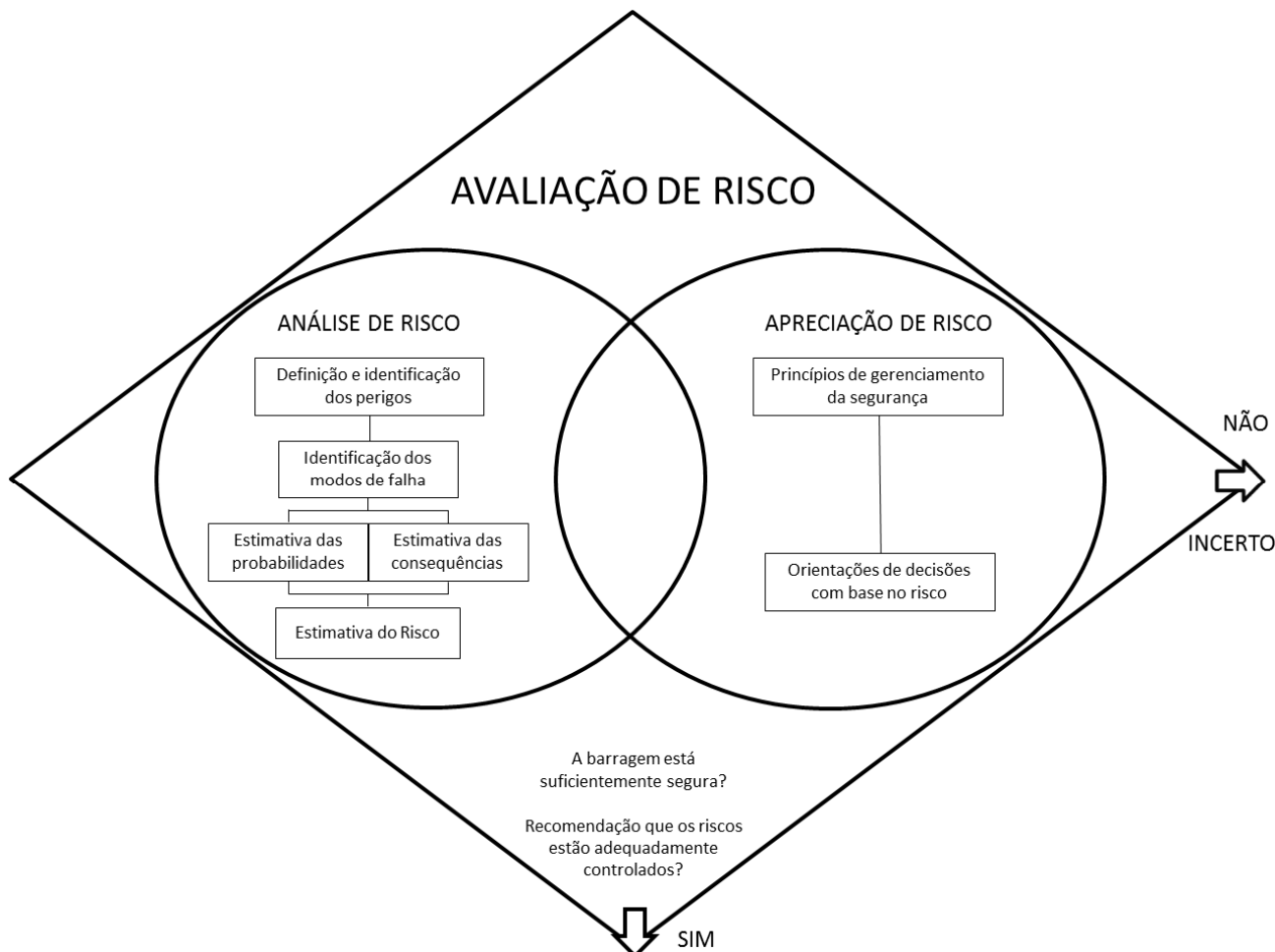


FIGURA 2.10 – Representação do processo de avaliação de risco

Fonte: Adaptado de ANCOLD, 2003, p. S2; ICOLD, 2005, p. 52.

A avaliação de risco também pode ter uma abordagem para um grupo de barragens, o que é de grande valia para os empreendedores de barragens. Bowles (2001) cita a Avaliação de Risco em Portfólio (PRA – *Portfolio Risk Assessment*) como uma ferramenta que permite realizar uma estimativa comparativa dos riscos associados a várias barragens, pertencentes a um único proprietário, e que serve de base para melhorias no programa de gestão de segurança de barragens.

Dentre os principais benefícios do processo de avaliação de risco destacam-se:

- Obtenção da resposta central se a barragem pode ou não ser seguramente operada e sob que condições;



- Melhoria no conhecimento das barragens, subsistemas, componentes (e interações entre eles), riscos associados, modos de falha e consequências;
- Comparação da segurança relativa de barragens baseada em métodos consistentes e informações objetivas;
- Possibilidade de classificação de barragens dentro de um grupo, visando definir prioridades de intervenção;
- Identificação de alternativas para administrar o risco, incluindo monitoramento e outras medidas não estruturais;
- Comparação do risco das barragens com os riscos de outras indústrias.

Por outro lado, como limitações do emprego da avaliação de risco têm-se:

- Custos e tempo elevados associados à aplicação de métodos de análises de risco, inserida na atividade de avaliação de risco;
- Dificuldade de quantificar de forma confiável as probabilidades de ruptura para certos modos de falha (ex: erosão interna);
- Dificuldade e incertezas associadas à estimativa das consequências, que envolvem perda de vidas, perdas monetárias indiretas e danos ambientais;
- Falta de uma metodologia largamente reconhecida e aceita para determinar a tolerabilidade do risco;
- Ceticismo natural na comunidade técnica quanto à aplicação de novas metodologias.

Fundamentalmente, o objetivo da avaliação de risco é apoiar o gerenciamento do risco, incluindo alternativas de controle. Pela metodologia descrita nos itens subsequentes, verifica-se que os princípios da avaliação de risco são bastante lógicos e deveriam ser considerados como parte da tomada de decisão em barragens.

#### 2.3.1.1 Análise de risco

A análise de risco consiste, essencialmente, no uso da informação disponível para estimar o risco relativo a indivíduos ou populações, a propriedades ou ambiente, decorrentes de condições de perigo. Ela envolve a desagregação ou decomposição do sistema da barragem e fontes de risco nas suas partes fundamentais. Como apontado por Caldeira (2008), a análise de risco é um tema complexo, já que envolve a pesquisa de um grande número de informações e a participação de equipes multidisciplinares para sua aplicação.

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

Ambas as análises (qualitativa e quantitativa), 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. Por isso, Pardo (2009) enfatiza que, na engenharia geotécnica, nenhuma das duas abordagens pode ser considerada totalmente adequada, pois não conseguem modelar a realidade por completo.

Alguns autores (AS/NZS, 1999; CNPGB, 2005, LADEIRA, 2007) também estabelecem uma análise intermediária, denominada semiquantitativa, onde consideram uma abordagem conjunta (qualitativa e quantitativa) e utilizam, geralmente, descritores verbais para transformações numéricas de valores de probabilidades atribuídas. A TAB. 2.2 ilustra um exemplo de descritores verbais utilizados pelo órgão governamental norte-americano U.S. Bureau of Reclamation (USBR).

TABELA 2.2 – Transformações verbais para numéricas

DESCRITOR	PROBABILIDADE
Virtualmente certo	0,999
Extremamente provável	0,995
Muito provável	0,99
Provável	0,9
Neutro	0,5
Improvável	0,1
Muito improvável	0,01
Extremamente improvável	0,005
Virtualmente impossível	< 0,001

Fonte: Adaptado de CYGANIEWICZ e SMART, 2000, p. 13.

Com relação às atividades envolvidas no processo de análise de risco, Hartford e Baecher (2004), enumeram as seguintes etapas fundamentais:

- 1 - Definição de escopo e seleção de métodos de análise;
- 2 - Identificação e definição dos perigos;
- 3 - Identificação dos modos de falha;
- 4 - Resposta da barragem e estimativa da probabilidade de falha;
- 5 - Estimativa da consequência de falha da barragem;
- 6 - Estimativa do risco;
- 7 - Documentação;
- 8 Verificação;
- 9 - Atualização da análise.

A etapa inicial (1) de definição de escopo deve descrever as razões para a realização da análise de risco (enquadramento) e formular seus objetivos. Segundo Kreuzer (2000), as análises de risco encontram aplicação em seis campos, a saber: avaliação da segurança (para uma barragem específica), tomada de decisão, diretrizes e legislação, classificação de barragens, planos de emergência (avaliação das consequências) e critérios de aceitabilidade e tolerabilidade. De acordo com Hartford e Baecher (2004), dependendo do escopo da aplicação, apenas algumas etapas do processo podem ser consideradas, embora as omissões desses elementos tenham que ser justificadas.

O primeiro passo do processo também envolve a familiarização com a barragem e seus vários subsistemas, assim como a identificação e seleção de métodos adequados para análise. Podem ser encontradas na literatura várias metodologias para análise de risco com potencial de aplicação em barragens, entre elas estão: Índices de Risco; Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI); Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA); Análise por Árvore de Eventos (ETA); e Análise Árvore por Falhas (FTA). Alguns métodos como os Índices de Risco, FMEA e LCI estão associadas às análises qualitativas, ao passo que as árvores de eventos (ETA) e de falhas (FTA) podem ser empregadas tanto nas formas qualitativa como quantitativa. De modo geral, os métodos têm em comum a análise de eventos indesejáveis, considerando suas respectivas causas, efeitos e consequências.

Hartford e Baecher (2004) citam que a seleção de métodos adequados deve estar apoiada em fatores como: objetivo do estudo, tipo de barragem, perigos a serem analisados, conhecimento da equipe, disponibilidade de recursos, requisitos e disponibilidade de informação, etc.

Definido o escopo e métodos de análise, tem-se a etapa de identificação e definição dos perigos e condições de carregamento (2), ou seja, as condições que possam gerar dano para o sistema da barragem. No caso de análises de risco quantitativas, as probabilidades associadas à ocorrência dos perigos devem ser estimadas.

O reconhecimento dos modos de falha (3) é também um passo fundamental no processo. Requer um exame sistemático do sistema da barragem para identificar as maneiras como a barragem, fundação ou estruturas anexas podem falhar sob os perigos impostos. De acordo com ANCOLD (2003), essa etapa tende a responder a pergunta primária do que pode dar errado.

A etapa de análise da probabilidade de falha da barragem (4) envolve, preliminarmente, todo o estudo da resposta da barragem devido aos eventos iniciadores (cenário de falha). A resposta da barragem é modelada de acordo com o método de análise escolhido, podendo assumir diversas formas já citadas, como FMEA, ETA e FTA. No modelo, a decomposição do sistema (subsistema e componentes) e seus mecanismos de falha devem ser avaliados de acordo com o nível de complexidade desejado para a análise.

A estimativa da probabilidade de falha da barragem é um dos benefícios das análises de risco, podendo-se tratar, dependendo da análise, explicitamente as incertezas. Kreuzer (2000), Caldeira (2008) e Pimenta (2009) definem basicamente três métodos para estimativa das probabilidades:

- Julgamento de engenharia: reflete o conhecimento de que se dispõe sobre a área técnica em questão. Consiste em uma estimativa subjetiva de probabilidades, mas, por vezes, é o único meio disponível quando faltam informações para quantificar as incertezas. Para esse método é essencial que se constitua um painel de peritos.
- Estimativa estatística com base em dados históricos: refere-se à utilização de registros históricos para estimar a frequência de falhas. Publicações como ICOLD (1995) e Foster *et al.* (1998) compilam estatísticas de rupturas de barragem e apresentam análises sistêmicas, sendo fontes valiosas de informação para inferência das frequências de ruptura. Importante ressaltar que o uso de registros históricos tem a limitação decorrente do conhecimento rudimentar dos fenômenos envolvidos nos casos de ruptura apresentados, além do aspecto de singularidade de cada obra.
- Método probabilístico ou tratamento analítico (ex: análises de confiabilidade): trata as incertezas dos modelos e parâmetros de forma explícita, propagando-as através do sistema e

expressando-as como distribuições de probabilidade. É uma forma essencialmente quantitativa para estimativa das probabilidades.

A etapa seguinte de estimativa da consequência (5) envolve a identificação e avaliação dos impactos diretos e indiretos devido à falha, estendendo-se a outros sistemas, como o vale a jusante.

A estimativa do risco (6) é ponto principal do processo, constituindo-se do cálculo da grandeza matemática (ou par de valores) que traduza o estado da barragem. ICOLD (2005) adverte que a estimativa do risco não é uma propriedade física da barragem, e sim uma representação matemática do estado de conhecimento da barragem e a confiança no seu desempenho futuro.

Na sua forma matemática, o risco, segundo Hartford e Baecher (2004), pode ser expresso segundo a EQ. 2.1. A primeira parcela da equação representa a probabilidade de ocorrência dos eventos iniciadores, enquanto que a segunda traduz a probabilidade condicional de que tais eventos conduzam à falha do sistema (resposta da barragem). A unidade do risco é regida pela medida da consequência.

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

Em que:

P = probabilidade.

Na forma qualitativa, o risco pode ser expresso simplesmente pela EQ. 2.2:

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

Em que:

P = probabilidade;

C = consequência.

Já as etapas finais de documentação (7) e verificação (8) são importantes para garantir a qualidade do processo. Devem estar produzidas em um nível apropriado de detalhes, de forma a facilitar a pesquisa e revisões futuras. O processo de análise de risco não deve ser estático e, portanto, a atualização da análise (9) deve ser realizada periodicamente.

Enfim, apesar de todo o processo exposto de análise de risco ser considerado ainda muito complexo com execução dispendiosa e morosa, ele pode ser extremamente útil para obras cujos eventuais riscos sejam elevados e associados a consequências relevantes. O conhecimento pormenorizado das vulnerabilidades e desempenho da barragem, por si só, já assegura a validade de aplicação do processo.

#### 2.3.1.2 Apreciação de risco

A atividade de apreciação de risco trabalha com a definição de critérios de aceitabilidade e tolerabilidade dos riscos, constituindo-se provavelmente o tema mais polêmico no universo da gestão de risco. A apreciação de risco ultrapassa a fronteira do mundo técnico da engenharia de barragens em direção a um enfoque mais subjetivo de julgamento de valores, abrangendo interesses políticos, sociais, econômicos e legais. No caso de barragens, tem o agravante de envolver riscos cujas consequências podem envolver um número elevado de perdas de vidas, embora associados a probabilidades de ocorrências extremamente baixas. É perceptível na mídia como a sociedade valoriza de forma diferente os acidentes de reduzida probabilidade e elevada consequência (ex: acidentes aéreos) e aqueles de alta probabilidade e baixa consequência (acidentes de transporte terrestre), mesmo que os riscos calculados (probabilidade x consequência) sejam equivalentes.

Para o entendimento da matéria, é importante discutir os conceitos de risco individual (de interesse para os indivíduos) e o societal (de interesse à sociedade como um todo). ICOLD (2005) identifica dois princípios fundamentais para o tema: o da equidade, onde os direitos individuais e da sociedade devem ser protegidos; e o da eficiência, sobre a necessidade que a sociedade tem de distribuir e usar os recursos disponíveis de tal forma a obter o máximo de benefícios.

Assim, o risco individual equivale ao incremento de risco imposto a um indivíduo pela existência de uma unidade ou atividade industrial perigosa. Esse incremento de risco é um adicional ao risco de vida, com o qual o indivíduo viveria em uma base diária se a unidade não existisse, ou, no contexto da segurança de barragens, se a barragem não rompesse. Já o risco societal é aquele que assume consequências de grande escala e/ou abrangência, implicando em uma resposta do meio social e político, por meio de discussão pública e de mecanismos de regulação. Riscos dessas dimensões (societais) estão tipicamente distribuídos de forma desigual, assim como os respectivos benefícios esperados. Por exemplo, a construção de uma barragem representa um risco para as populações situadas no vale a jusante, mas, por outro lado, pode trazer benefícios para uma população bem

maior que se beneficia do abastecimento de água (localizada longe do empreendimento ou em outras bacias hidrográficas) ou até mesmo para toda a sociedade, considerando a disponibilidade de energia por meio de um sistema interligado. A distribuição e o equilíbrio dos custos e benefícios principais é uma responsabilidade do Estado, estando também sujeitos à discussão pública.

Os critérios de aceitabilidade e tolerabilidade representam os limites máximos admissíveis para o risco. Sua terminologia, de divulgação amplamente aceita atualmente, é definida pelo *Health & Safety Executive* – HSE, órgão executivo para a saúde e a segurança do Reino Unido, país possuidor de uma longa tradição de regulamentação nessas áreas, que remonta ao século XIX. A maioria das recomendações internacionais em tolerabilidade é baseada neles. A FIG. 2.11 mostra o princípio de definição dos critérios.

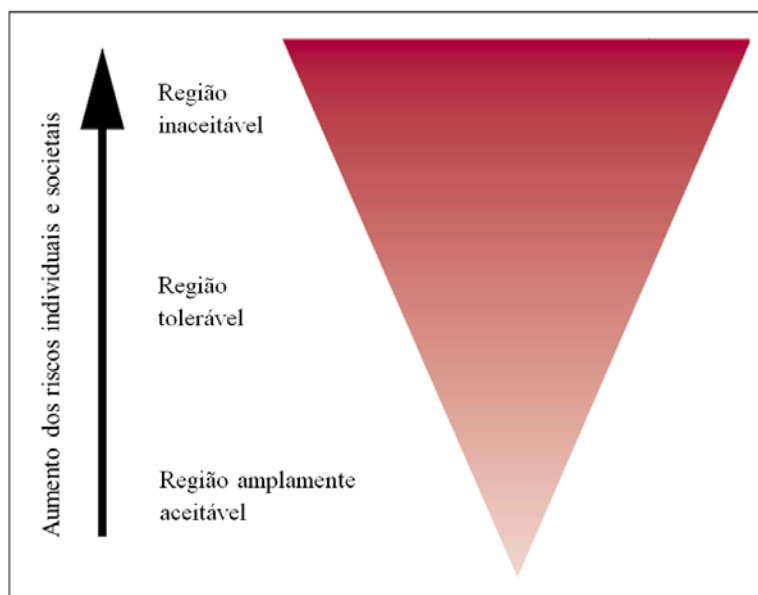


FIGURA 2.11 – Princípios de aceitabilidade e tolerabilidade

Fonte: Adaptado de HSE, 2001, p. 42.

Segundo HSE (2001), o triângulo da FIG. 2.11 representa o aumento do nível de risco para uma atividade perigosa em particular. A zona escura, no topo, representa uma região inaceitável. Para fins práticos, um risco particular que se insira nessa região é considerado inaceitável, qualquer que seja o nível de benefícios associados com a atividade. A zona clara, na base, representa, por outro lado, uma região amplamente aceitável de risco. Riscos presentes nessa região são considerados insignificantes e adequadamente controlados. Já a zona intermediária é considerada uma região tolerável, cujos riscos são, tipicamente, de atividades para as quais a população está preparada para tolerar em troca da garantia de benefícios. Nesse caso, os riscos residuais devem ser mantidos tão baixos quanto razoavelmente praticáveis, determinado pelo princípio ALARP (*As Low As*

*Reasonably Practicable*). Evidentemente, a natureza e os níveis de risco devem estar adequadamente avaliados, assim como devem ser revistos periodicamente de forma a garantir que ainda atendam ao princípio ALARP.

Retomando sobre o risco societal, ele é geralmente expresso por meio de curvas F-N, onde na ordenada plota-se o valor de F (probabilidade anual de um acidente com um número de fatalidades igual ou superior a N) e na abcissa o valor de N (número de fatalidades). Apresenta-se um exemplo de curva F-N na FIG. 2.12. Importante observar que, nesse modo de representação, só é levada em consideração a consequência associada à perda de vidas humanas, omitindo outros impactos possíveis, tais como os ambientais e econômicos. O gráfico F-N está enquadrado no âmbito das análises de risco quantitativas.

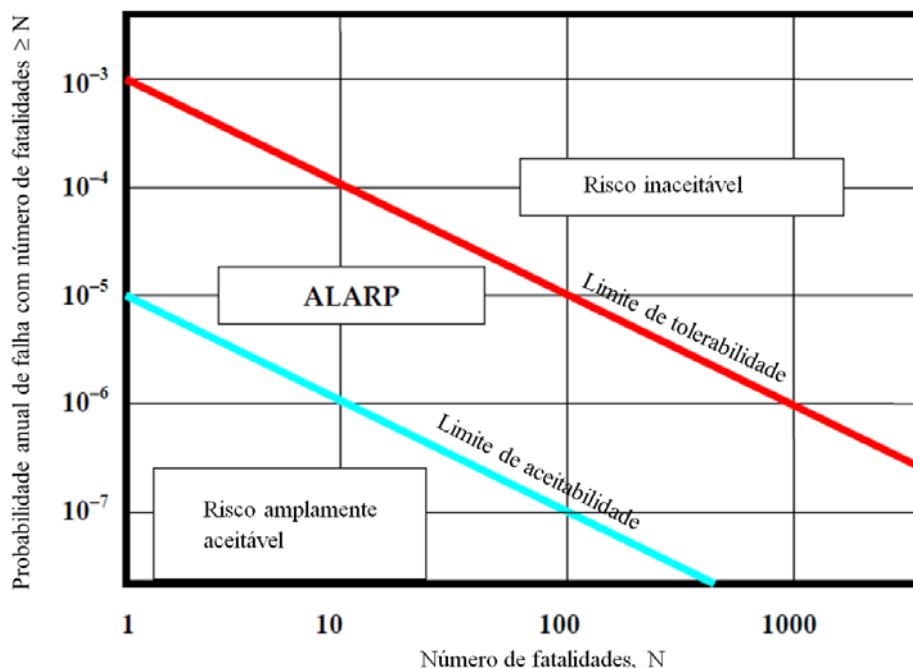


FIG. 2.12 – Curvas F-N para o risco societal

Fonte: Adaptado de CDA, 2007, p. 62.

De modo geral, podem-se distinguir três zonas na análise das curvas F-N, em conformidade com os princípios definidos por HSE (2001): a zona de riscos aceitáveis; a de riscos inaceitáveis; e a intermediária, de riscos toleráveis, onde se aplica o princípio ALARP. A separação entre as zonas é realizada pelos limites de aceitabilidade e tolerabilidade.

Existem vários modelos de curvas F-N desenvolvidos por entidades de diferentes países. ICOLD (2005) sustenta que a tolerabilidade ao risco difere para cada país, pois depende da questão cultural. A FIG. 2.13 apresenta curvas de ampla divulgação no meio técnico.



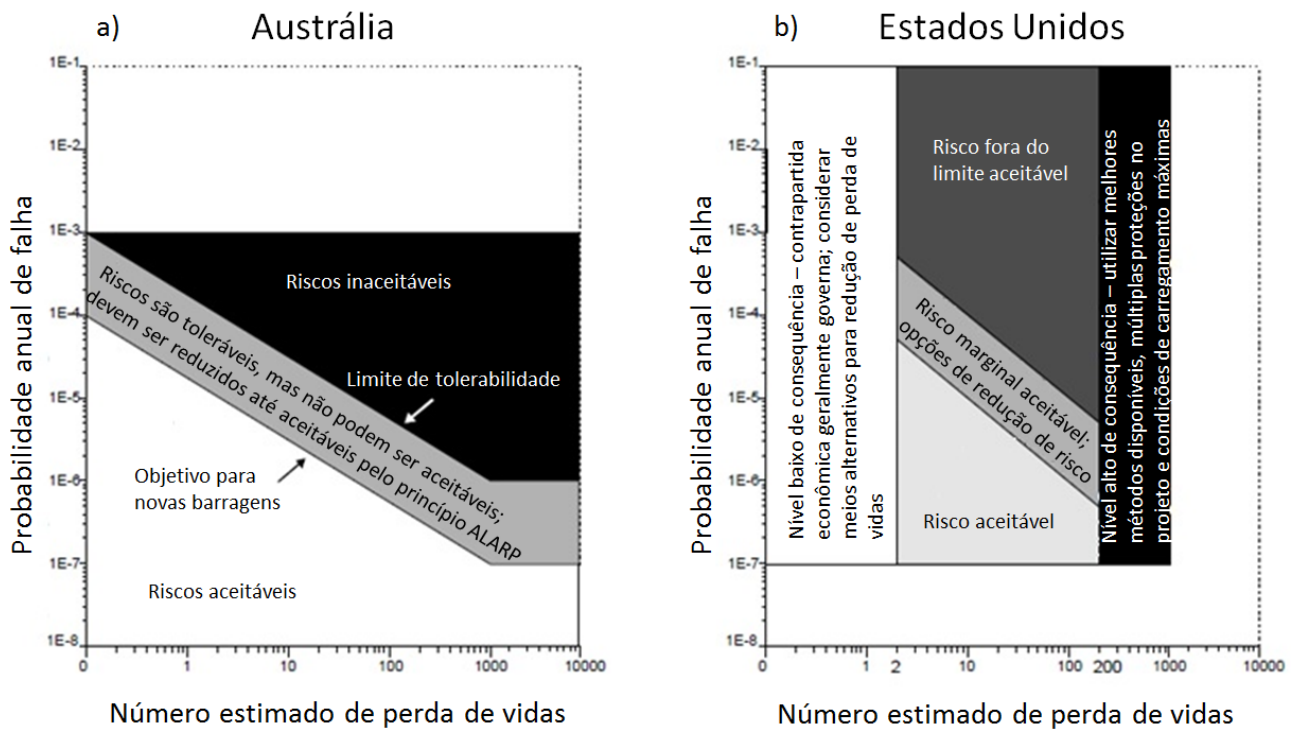


FIGURA 2.13 – Curvas F-N

a) Austrália (ANCOLD)

b) EUA (USBR)

Fonte: Adaptado de RETTEMEIER *et al.*, 2000, p. 629.

Para as análises qualitativas (e semiquantitativas), Pimenta (2009) relata sobre outras representações que vêm sendo desenvolvidas, como as matrizes de risco, que classificam a probabilidade e consequência por meio de escalas numéricas ou descritivas. Conforme ressaltado pela autora, esse tipo de ferramenta de apreciação de risco é, pela sua natureza, mais subjetivo do que aquelas utilizadas nas análises quantitativas (ex: curvas F-N), sendo usual encontrar diferentes matrizes de risco. Essas diferenciações decorrem de necessidades de ajustes específicos, seja por particularidades técnicas do portfólio de barragens sob análise, seja pela importância relativa dos pontos sob avaliação.

Para permitir a classificação, cada classe deve estar associada a uma explicação descritiva. Além disso, as matrizes de risco, por meio da gradação de cores, podem ser usadas para delinear diretrizes aproximadas de aceitabilidade e tolerabilidade, como esboçado nas FIG. 2.14 e 2.15.

No caso ilustrado na FIG. 2.14, a matriz contém cinco classes de consequências e cinco classes de probabilidades, enquanto na FIG. 2.15 a matriz é formada por quatro classes de consequências e probabilidades. As duas dimensões se combinam para compor o risco.

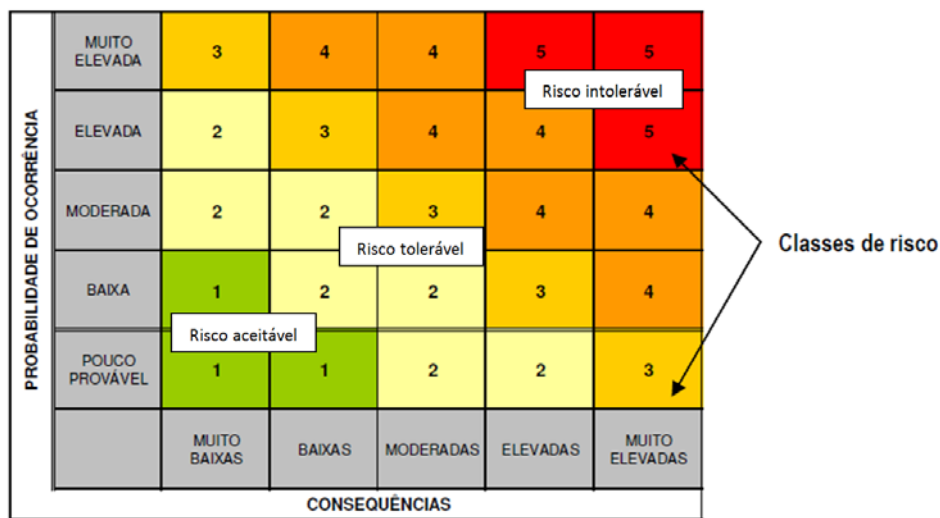


FIGURA 2.14 – Exemplo de matriz de risco com 5 classes de consequências e probabilidades  
 Fonte: PIMENTA, 2009, p. 210.

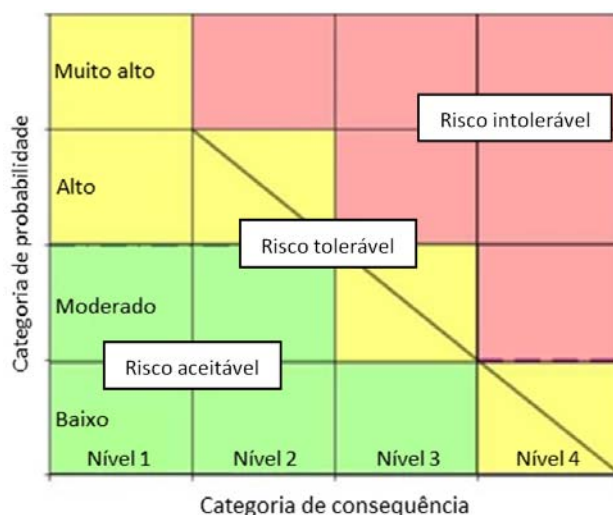


FIGURA 2.15 – Exemplo de matriz de risco com 4 classes de consequências e probabilidades  
 Fonte: Adaptado de BUREAU OF RECLAMATION, 2011, p. 31-6.

Levando-se em conta o que foi apresentado, verifica-se que existe um número significativo de propostas de critérios de aceitabilidade e tolerabilidade para apreciação de risco no domínio das barragens. Os resultados da apreciação de risco têm um papel fundamental no contexto da gestão de risco, pois alimentam o processo de decisão.

### 2.3.2 Controle de risco

Segundo Pimenta (2009), o controle de risco encerra um conjunto de atividades integradas, contemplando ações de decisão, mitigação, prevenção, detecção, planos de emergência, revisão e comunicação de riscos. AS/NZS (1999) e ICOLD (2005) citam que, da perspectiva do

gerenciamento e negócio, as opções de controle de risco podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

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

Destaca-se que as primeiras três opções efetivamente reduzem o risco em que terceiros são expostos, enquanto isso não ocorre para as quarta e quinta opções, embora afetem o risco cuja responsabilidade é do proprietário.

No presente trabalho, entende-se que o controle de risco é uma prática já estabelecida na gestão de segurança de barragens e vem sendo tratada por meio da abordagem tradicional. Vários países já dispõem de leis e regulamentações sobre o assunto.

#### **2.4 Gestão de risco no Brasil: Lei 12.334**

É de conhecimento geral que, a partir da primeira década do novo milênio, ocorreram diversos acidentes significativos com barragens no Brasil que mudaram a percepção da situação da segurança de barragens no país e suscitaram o desenvolvimento de uma regulamentação nesse sentido. Menescal (2009) sustenta que, anteriormente, a situação não parecia preocupante devido à inexistência de um registro sistemático de acidentes e incidentes. Além disso, também era dada uma maior importância às grandes barragens, principalmente as do setor elétrico, notadamente bem projetadas, construídas e mantidas.

Dias (2010) descreve alguns casos relevantes de rupturas de barragens, mostrando como as estruturas vêm sendo gerenciadas e mantidas, e salientando as deficiências na divulgação de informações técnicas mais detalhadas. Infelizmente, a carência de informações, quando se trata de acidentes, é uma prática corrente, o que inibe o potencial de aprendizado e lições para a comunidade técnica. A TAB. 2.3 apresenta algumas ocorrências de destaque a partir dos anos 2000. Com exceção da barragem de Camará, todas as demais barragens são estruturas geotécnicas, com maciços constituídos essencialmente de terra ou rejeitos.

TABELA 2.3 – Casos recentes de rupturas de barragens no Brasil

EMPREENHIMENTO	FUNÇÃO	RUPTURA	UF
Barragem da Mineração Rio Verde	Contenção de rejeitos	2001	MG
Barragem Cataguases	Contenção de resíduos industriais	2003	MG
Barragem de Camará	Hidreletricidade	2004	PB
Barragem da Mineração Rio Pomba	Contenção de rejeitos	2007	MG
Barragem de Espora	Hidreletricidade	2008	GO
Barragem de Apertadinho	Hidreletricidade	2009	RO
Barragem de Algodões I	Hidreletricidade	2009	PI

Diante dessa nova realidade, a “Lei de Segurança de Barragens” teve seu início no legislativo federal por meio da proposição de um projeto de lei, começando efetivamente sua tramitação na Câmara Federal no ano de 2003. A iniciativa contou com a participação das instituições de ensino e pesquisa, organizações profissionais e apoio de técnicos e especialistas que atuam na engenharia de barragens. Após passar por várias comissões na Câmara dos Deputados e Senado (trâmites inerentes ao processo legislativo), finalmente, em 2010, a Lei nº 12.334 foi sancionada.

Essa lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (BRASIL, 2010).

A PNSB tem como objetivos fundamentais garantir a observância de padrões de segurança, regulamentar, promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança assumidas pelos responsáveis por barragens, visando a redução da possibilidade de acidentes e suas consequências, em especial, junto à população potencialmente afetada (ANA, 2013). Ela abrange todas as barragens brasileiras enquadradas em critérios mínimos de porte e de eventuais danos decorrentes de uma ruptura (consequência), conforme listado a seguir:

- Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);
- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

- Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

A Lei 12.334 definiu que o agente fiscalizador é o órgão que outorgou o direito de uso dos recursos hídricos, seja esta para acumulação de água, geração hidrelétrica, disposição de rejeitos ou disposição de resíduos industriais. Esses órgãos, especialistas em suas respectivas áreas de atuação, têm a responsabilidade por regulamentações complementares. No caso das barragens de hidrelétricas, essa atribuição cabe à Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. As entidades, atribuições e fluxo de atividades e responsabilidades contidas na PNSB são ilustrados na FIG. 2.16.

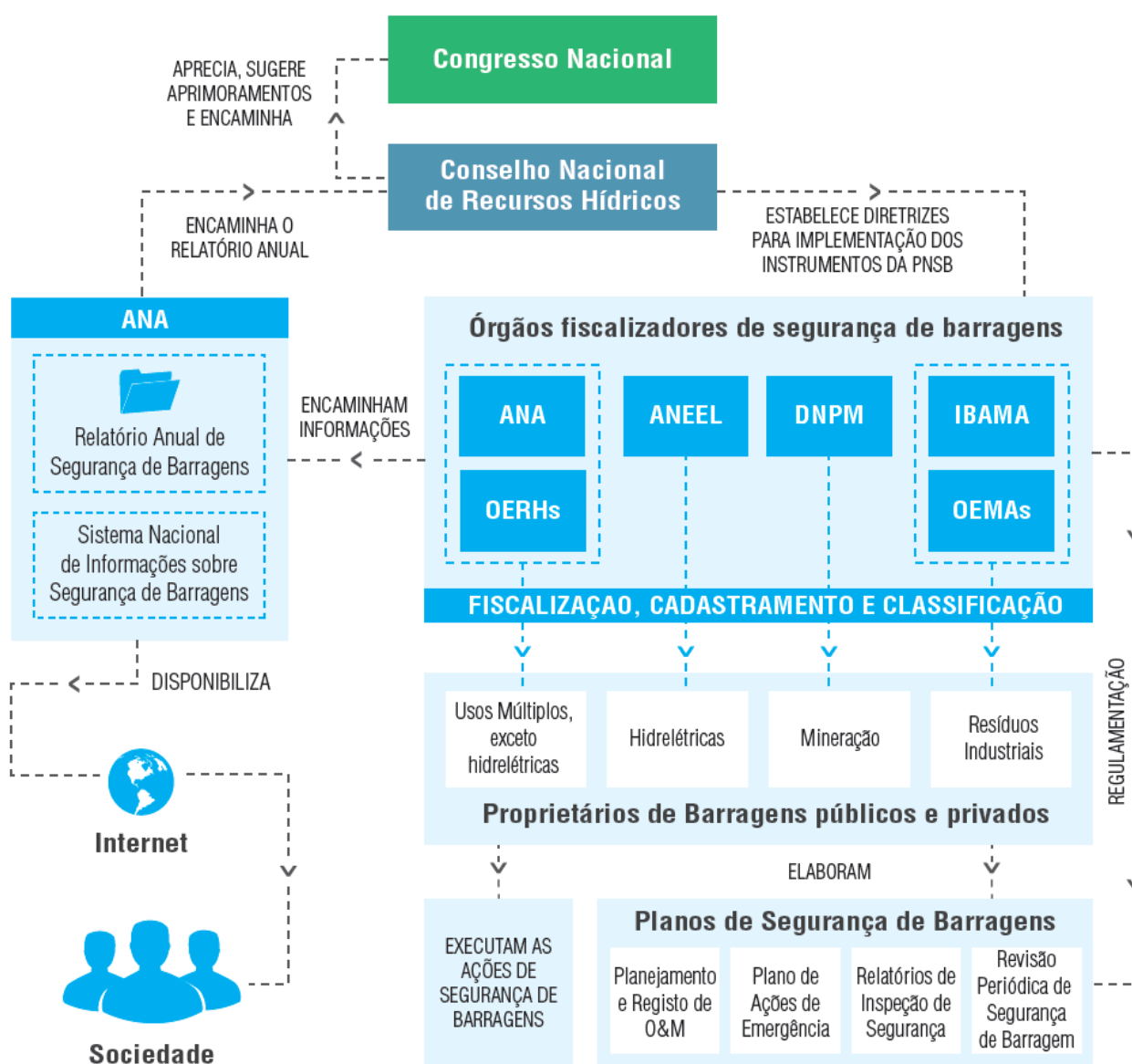


FIGURA 2.16 – Arranjo esquemático da Política Nacional de Segurança de Barragens

Fonte: ANA, 2013, p. 20.

Como desafio para implementação do fluxograma retratado na FIG. 2.16, tem-se o universo de barragens existente no território nacional. Segundo o panorama divulgado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), existem 13.529 barragens cadastradas na base de dados dos órgãos fiscalizadores federais e estaduais, sendo assim divididas: 11.748 barragens de usos múltiplos, 1.261 para geração de energia hidrelétrica, 264 de rejeitos de mineração e 256 de resíduos industriais. Soma-se a isso o número significativo de pequenas barragens que não possuem estruturas técnica e operacional adequadas para implementação dos instrumentos previstos na PNSB.

Importante destacar que a PNSB explicitou que a responsabilidade primária pela segurança da barragem é do empreendedor, o qual tem o dever de manter a barragem em condições adequadas. A política institui uma série de obrigações aos proprietários, com vistas à implantação de um efetivo sistema de gestão de segurança de barragens, das quais se destacam:

- Elaboração do Plano de Segurança da Barragem e o Plano de Ação de Emergência;
- Realização das Inspeções de Segurança Regular e Especial nas barragens;
- Realização da Revisão Periódica de Segurança de Barragem.

Outra importante contribuição técnica da lei, caracterizada como um de seus instrumentos, foi a criação do sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado, que se constitui a base para análise de segurança das barragens, estabelecendo níveis apropriados de monitoramento, inspeção e planos de segurança.

Em virtude dos fatos mencionados, conclui-se que a mencionada lei é um marco importante na gestão da segurança de barragens no país, valorizando a cultura de prevenção e sendo uma conquista da sociedade brasileira. Sua definição clara de responsabilidades vai ao encontro do recomendado pela ICOLD (2005), que reforça a presença de lei e órgãos fiscalizadores (participação do Estado) para garantir os requisitos mínimos de segurança das barragens. Também está alinhada com o modelo de sistema integrado de gestão da segurança de barragens proposto por Menescal (2009), defendendo mecanismos de sustentabilidade, descentralização, transparência e participação pública.

Tecnicamente, a referida lei também torna obrigatória as “boas práticas” de segurança de barragens adotadas internacionalmente. A disponibilização de informações relativas à segurança das barragens será um benefício para a sociedade e a comunidade técnica.

Acredita-se que, com a consolidação da articulação do poder público e a publicação das regulamentações complementares, realmente haverá uma mudança de paradigma no Brasil quanto à gestão de risco e segurança de barragens. Também espera-se que, futuramente, com o amadurecimento da legislação vigente no país e a divulgação de mais trabalhos científicos na área, a abordagem metodológica orientada para o risco, incluindo principalmente os fundamentos de avaliação de risco tratados no item 2.3.1, vá se incorporando naturalmente na cultura de segurança dos proprietários de barragens e complemente a gestão de risco implementada por meio das exigências legais.

## **2.5 Terminologia aplicada à gestão de risco**

A gestão de risco no âmbito de barragens é um tema relativamente recente, o que justifica o uso equivocado de diferentes terminologias aplicadas a alguns conceitos fundamentais. É de extrema importância que os termos sejam uniformizados pela comunidade técnico-científica, visando uma comunicação adequada sobre riscos.

Em face a essa realidade, verifica-se a existência de uma gama de glossários disponível na literatura, podendo-se citar, recentemente, aqueles compilados por ANCOLD (1994), Kreuzer (2000), Hughes *et al.* (2000), ANCOLD (2003), Hartford e Baecher (2004), ICOLD (2005), CDA (2007), Bureau of Reclamation (2011), SPANCOLD (2012). Evidentemente, algumas publicações se utilizam de suas predecessoras como referência. Na língua portuguesa encontram-se referências em Menescal *et al.* (2001a), Menescal (2005), CNPGB (2005) e Colle (2008).

Conforme destacado por ICOLD (2005), as definições (terminologia) devem atender aos seguintes princípios básicos:

- Compatibilidade com as normas nacionais em análise e gerenciamento de risco;
- Compatibilidade com os significados mais comuns em uso em disciplinas de análises de risco;
- Compatibilidade, na medida do possível, com o dicionário comum de significados de palavras.

Além disso, os significados que são presentemente aceitos na área de engenharia de barragens devem ser preservados, desde que não ofendam os três objetivos precedentes.

Tendo em vista que a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) é a principal entidade na área de barragens e tem o objetivo de articular e alinhar os comitês dos demais países membros, buscou-se, no presente trabalho, que as definições fossem compatíveis principalmente com aquelas estabelecidas em seu boletim técnico: *“Risk assessment in dam safety management: A reconnaissance of benefits, methods and current applications”* (ICOLD, 2005). Essa publicação constitui-se um marco importante na abordagem atual de avaliação de risco. Ademais, no intuito de unificar a terminologia na língua portuguesa, outra fonte relevante é a CNPGB (2005). Ressalta-se que a Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens mantém um grupo de trabalho específico de análise de risco em barragens de reconhecido conhecimento no assunto.

Por conseguinte, de modo a contribuir com a divulgação de uma terminologia adequada, foi elaborado um glossário para os conceitos principais, o qual é apresentado no Apêndice A.1.

## **2.6 Métodos de análise de risco**

Desde a década de 60 do século passado têm-se registros da utilização de métodos de análise de risco em várias áreas de conhecimento. Por diversas vezes, eles foram considerados necessários para implantar com segurança tecnologias modernas recém-desenvolvidas, como nas indústrias aeroespacial, química e nuclear. Existem, portanto, várias metodologias com potencial de uso em barragens, cujas aplicações são recentes.

Os métodos de análise podem ser categorizados de diferentes formas, como, por exemplo:

- pela sua natureza: qualitativa ou quantitativa;
- pelo seu tratamento: indutivo ou dedutivo;
- pelo seu potencial de aplicação: análise preliminar em portfólio ou análise em barragens individuais.

Dado o objetivo do presente trabalho, julga-se pertinente a categorização pelo seu potencial de aplicação.

As análises preliminares em portfólio são as formas mais simples de análises de risco qualitativas existentes, geralmente baseadas em índices e essencialmente utilizadas para classificação de barragens. Vale lembrar que a classificação de barragens é reconhecidamente um dos campos de aplicação das análises de risco, conforme assinalado por Kreuzer (2000). Esse autor utiliza a



expressão *Hazard Ranking*, cuja melhor tradução para a língua portuguesa entende-se ser “Classificação de Risco”, uma vez que tanto as condições da barragem como as consequências a jusante são levadas em consideração na análise. Como observado em ICOLD (2009), a classificação de barragens é uma atividade integrante e fundamental de qualquer programa de gestão de segurança de barragens.

Contudo, a análise preliminar de risco em portfólio não se restringe somente ao propósito de classificação de barragens. ICOLD (2005) ainda aponta os seguintes objetivos:

- Definição de programas de monitoramento;
- Priorização de estudos mais detalhados;
- Melhorias na segurança da barragem.

Assim sendo, a análise facilita a comparação dos riscos de diferentes empreendimentos, possibilitando, de modo global, o estabelecimento de prioridades relativas à sua redução quando se considera um montante limitado de recursos por parte dos proprietários de barragens.

Os métodos de análise preliminar usam formas descritivas e escalas numéricas para descrever as componentes associadas à probabilidade de ruptura e sua consequência. Em que pesem a grande variedade e, principalmente, a subjetividade (na concepção e aplicação) dos métodos, de modo geral, eles tendem a retratar as fontes de perigo, vulnerabilidades/confiabilidade da obra e consequências. Têm como grandes vantagens a simplicidade e implementação expedita, haja vista que não requerem a disponibilização de informações muito detalhadas sobre as estruturas.

No presente trabalho, do universo de métodos de análise preliminar existentes, dá-se atenção àqueles baseados em índices de riscos associados a matrizes de classificação, com destaque para o desenvolvimento da experiência brasileira.

Com relação à metodologia geral de implantação de uma análise preliminar em portfólio (índices de risco), Caldeira (2008) descreve as seguintes etapas:

- Seleção de um conjunto de descritores, geralmente agrupados por classes, que levem em consideração aspectos relacionados às condições externas, às características (ou condição) da barragem e às consequências;
- Atribuição de uma classificação para cada descritor;

- Definição de pesos (iguais ou diferentes) para cada descritor de cada uma das classes, de acordo com sua respectiva importância relativa;
- Definição da regra de agregação a ser utilizada em cada classe para o cálculo de índices parciais;
- Definição de uma expressão de cálculo do índice de risco com base nos índices parciais de cada classe.

Conforme ressaltado por Kreuzer (2000), tais técnicas devem ser estritamente utilizadas para uma avaliação preliminar e sempre seguidas por uma segunda fase de avaliação mais detalhada para as barragens pontuadas com altas deficiências. É nesse segundo ponto onde entram as análises de risco aplicadas a barragens individuais.

As análises de risco aplicadas a barragens individuais constituem-se, em quase sua totalidade, dos métodos formais já reconhecidos em outros campos de conhecimento, sendo adaptados para aplicação em barragens. São métodos mais elaborados e consistentes, apoiados em informações objetivas. Na aplicação em barragens, exigem o levantamento de informação particularizada, considerando dados relativos ao projeto, construção e operação das estruturas.

Na aplicação desses métodos, geralmente há que se decompor a barragem em subsistemas (ex: barragem de terra, vertedouro, muro de ligação, tomada d'água, etc.) e seus elementos básicos (ex: núcleo, rip-rap, taludes, crista, etc).

Devido à particularidade de cada método, não é possível especificar de antemão uma metodologia geral para eles. De forma geral, tendem a tratar sistematicamente os perigos (eventos iniciadores), modos de falha, respostas do sistema, resultados, fatores de exposição e consequências associadas.

Esses métodos têm como vantagem, além da inerente estimativa do risco, propiciar a melhoria no conhecimento da barragem e seu desempenho, abordando os aspectos específicos da obra e do local. Por outro lado, as demandas de informação e tempo são também mais exigentes, fazendo com que seu uso não seja prática corrente, especialmente entre proprietários de barragens que dispõem de menor estrutura organizacional.

Dentre os vários métodos existentes com potenciais aplicações em análise preliminar de risco em portfólio e em barragens individuais, a serem descritos mais detalhadamente nos itens subsequentes, podem ser citados como exemplo:

- Métodos de análise preliminar de risco em portfólio de barragens baseados em índices: Índice Global de Risco; Índice Global de Risco Modificado; Índice de Lafitte; Metodologia de Classificação de barragens Sabesp; Potencial de Risco; Metodologia de Classificação de barragens Cemig e Matrizes de Classificação (Lei 12.334).
- Métodos de análise de risco em barragens individuais: Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI); Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA); Análise por Árvore de Eventos (ETA) e Análise por Árvore de Falhas (FTA).

Os itens 2.6.1 a 2.6.8, a seguir, tratam dos métodos de análise preliminar de risco em portfólio, enquanto que os itens 2.6.9 a 2.6.12 discorrem sobre os métodos de análise de risco em barragens individuais.

### 2.6.1 Índice global de risco

O índice global de risco foi proposto por ICOLD (1982), sendo um dos precursores no sentido de potencializar a aplicação de um método em portfólio de barragens. Sua concepção tem como escopo inicial a definição de sistemas de monitoramento de barragens no que tange à instrumentação (tipo e número de instrumentos, distribuição no corpo da barragem, frequência de leituras, etc), estabelecendo o nível (rigor) de monitoramento de acordo com as condições de risco impostas pela barragem.

Os fatores considerados no método que impactam o risco da barragem são agrupados em três classes: condições externas ou ambientais, condição da barragem/confiabilidade e potenciais danos humanos e econômicos. A primeira classe (fatores externos ou ambientais – Fator E) traduz as fontes de perigo externas, empregando descritores ( $\alpha$ ) como sismicidade, escorregamento de taludes no reservatório, cheias superiores às de projeto, tipo de operação do reservatório e ações ambientais agressivas. A segunda classe, associada à confiabilidade (Fator F), leva em conta a adequação do dimensionamento estrutural, das fundações, dos órgãos de descarga, e a manutenção da barragem. Por fim, a terceira classe (Fator R) está relacionada aos danos potenciais econômicos e humanos da barragem (consequência), considerando o volume do reservatório e a existência de instalações a jusante.

Os descritores ( $\alpha$ ) são classificados por meio de uma escala qualitativa, assumindo valores de um a seis. Quando o valor do descritor é classificado como seis, o método considera que uma intervenção é indispensável. As classes, descritores e respectivas classificações são apresentados na TAB. 2.4.

TABELA 2.4 – Índice global de risco

Descritor ( $\alpha_i$ )	CONDIÇÕES EXTERNAS OU AMBIENTAIS (FATOR E)					CONDIÇÃO DA BARRAGEM / CONFIABILIDADE (FATOR F)				DANOS POTENCIAIS HUMANOS / ECONÔMICOS (FATOR R)	
	Sismicidade	Perigo de escorregamentos de taludes no reservatório	Perigo de cheias superiores às de projeto	Reserv. func. (tipo de operação, gerenciamento)	Ações ambientais agressivas (clima, água)	Dimensionamento estrutural	Fundações	Órgãos de descarga	Condições de manutenção	Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )	Instalações a jusante
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
1	Mínima ou nula ( $V < 4\text{cm/s}$ )	Mínimo ou nulo	Probabilidade muito baixa (barragens de concreto)	Regularização plurianual, anual ou sazonal	Muito fracas	Adequado	Muito boas	Confiáveis	Muito boas	$< 10^5$	Zonas inabitadas sem valor econômico
2	Baixa ( $4 < V < 8\text{cm/s}$ )	Baixo	..	..	Fracas	..	Boas	..	Boas	$10^5 - 10^6$	Áreas isoladas, agricultura
3	Média ( $8 < V < 16\text{cm/s}$ )	..	Probabilidade muito baixa (barragens de aterro)	Regularização semanal	Médias	Aceitável	Aceitáveis	..	Satisfatórias	$10^6 - 10^7$	Pequenas cidades, agricultura, ind. artesanal
4	Elevada ( $16 < V < 32\text{cm/s}$ )	..	..	Regularização diária	Fortes	..	..	..	..	$10^7 - 10^9$	Cidades de médio porte, pequenas indústrias
5	Muito elevada ( $V > 32\text{cm/s}$ )	..	..	Armazenamento por bombeamento	Muito fortes	..	Fracas	..	..	$> 10^9$	Grandes cidades, indústrias, instalações nucleares
6	..	Perigo de grandes escorregamentos	Alta probabilidade	..	..	Inadequado	Fracas ou ruins	Insuficientes; inoperantes	Insatisfatórias	..	..

Fonte: Adaptado de ICOLD, 1982, p. 17.

Os cálculos dos índices parciais (fatores) relativo às três classes são apresentados nas EQ. 2.3, 2.4 e 2.5:

$$E = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i \quad (2.3)$$

Em que:

E = índice parcial relativo aos fatores externos ou ambientais;

$\alpha_i$  = descritores.

$$F = \frac{1}{4} \sum_{i=6}^9 \alpha_i \quad (2.4)$$

Em que:

F = índice parcial relativo à confiabilidade;

$\alpha_i$  = descritores.

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=10}^{11} \alpha_i \quad (2.5)$$

Em que:

R = índice parcial relativo aos danos potenciais humanos e econômicos

$\alpha_i$  = descritores.

O índice global de risco é dado pelo produto dos índices parciais apresentados, ou seja:

$$\alpha_g = E \times F \times R \quad (2.6)$$

Em que:  $\alpha_g$  = índice global de risco.

Como na publicação da ICOLD (ICOLD, 1982) o método é voltado para a definição de sistemas de monitoramento, não há referências, à época, de aplicações reais de análises de risco em barragens e muito menos à apreciação de seus valores. A mesma publicação alerta que as tabelas são apresentadas, exclusivamente, como um exemplo qualitativo de uma possível abordagem racional,

muito embora se nota, por meio do cálculo dos índices, seu potencial de aplicação como uma análise preliminar de risco.

### 2.6.2 Índice global de risco modificado

A adoção do índice global de risco teve origem em Portugal. A regulamentação portuguesa de segurança de barragens já estabelecia em suas Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB), publicadas em 1993, o uso do índice global de risco original para definição dos sistemas de monitoramento de suas barragens (CALDEIRA, 2008). Adicionalmente, o definiam também para o estabelecimento de prioridades de inspeção de barragens com vistas à sua adequação ao Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), datado de 1990 (versão inicial). Nesta última aplicação, foram definidas três classes de barragens, a saber:

- Classe A: barragens com pelo menos um descritor com classificação seis;
- Classe B: barragens com o índice global de risco ( $\alpha_g$ ) superior a 20 e índice parcial R maior ou igual a três;
- Classe C: demais barragens.

Quanto à ordenação das barragens dentro de cada classe, segue-se o seguinte critério:

- Classe A: o número de descritores classificados com nota seis, devendo, em caso de igualdade, considerar, sucessivamente, o valor de  $\alpha_g$ , R e  $\alpha_1$ ;
- Classes B e C: o valor de  $\alpha_g$ , R e  $\alpha_1$ .

Apesar das regulamentações indicarem o uso do índice global de risco, de acordo com Pimenta (2009), sua primeira aplicação em forma de avaliação de segurança e análise de risco preliminar se deu somente em 1996 (para 38 grandes barragens) e, posteriormente, em 2001 (para 536 barragens, sendo 489 barragens de terra).

Na abrangente aplicação realizada em 2001, algumas modificações foram introduzidas no método, com o intuito de melhor esclarecer e uniformizar a classificação dos descritores (CALDEIRA e GOMES, 2006 citado por PIMENTA, 2009), conforme a seguir:

- O descritor  $\alpha_1$  tem apenas duas classificações possíveis, equivalentes às condicionantes sismológicas verificadas em Portugal;
- Os descritores  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_6$ ,  $\alpha_7$ ,  $\alpha_8$  e  $\alpha_9$  preenchem as classificações vazias, entre um e seis, e o descritor  $\alpha_4$  entre um e cinco;

- O descritor  $\alpha_4$  é alterado, reportando à velocidade de variação do nível de água;
- Os descritores  $\alpha_2$  a  $\alpha_4$  são classificados em função do tipo de barragem (barragem de terra ou barragens de concreto/alvenaria);
- Os descritores  $\alpha_5$  e  $\alpha_{11}$  têm a classificação seis que, como no método original, implicam em uma intervenção técnica indispensável.

Paralelamente, foram desenvolvidas tabelas orientativas para a classificação de cada descritor, explicitando sua descrição, conteúdo da justificativa e condições de aplicação - disponíveis em CALDEIRA (2008). As equações de cálculo dos índices parciais (E, F, R) e índice global de risco modificado ( $\alpha_g$ ) são similares às do método original, reproduzidas nas EQ. 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10.

$$E = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i \quad (2.7)$$

Em que:

E = índice parcial relativo aos fatores externos ou ambientais;

$\alpha_i$  = descritores.

$$F = \frac{1}{4} \sum_{i=6}^9 \alpha_i \quad (2.8)$$

Em que: F = índice parcial relativo à confiabilidade.

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=10}^{11} \alpha_i \quad (2.9)$$

Em que: R = índice parcial relativo a fatores humanos e econômicos.

$$\alpha_g = E \times F \times R \quad (2.10)$$

Em que:  $\alpha_g$  = índice global de risco modificado.

A TAB. 2.5 apresenta a matriz do índice global de risco modificado.

TABELA 2.5 – Índice global de risco modificado

$\alpha$ i	CLASSE ASSOCIADA A FATORES EXTERNOS OU AMBIENTAIS (E)					CLASSE ASSOCIADA À CONFIABILIDADE DA OBRA (F)				CLASSE ASSOCIADA A FATORES HUMANOS E ECONÔMICOS ( R )	
	Sismicidade (período de retorno de 1.000 anos)	Escorregamento de taludes (probabilidade)	Cheias superiores à do projeto (probabilidade)	Gestão do reservatório	Ações agressivas (Clima, água, etc)	Dimensionamento estrutural	Fundações	Órgãos de descarga	Manutenção	Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )	Instalações a jusante (associada à prob. de ocorrência de pessoas e instalações nas áreas potencialmente inundáveis)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	..	Mínima ou nula	Baixa (barragens de concreto e alvenaria)	Muito boa	Mínimas	Adequado	Muito boas	Elevada confiabilidade	Muito boa	< 10 <sup>5</sup>	Muito reduzida
2	Muito baixa 0,05g<a<0,1g	Baixa (barragens de concreto e alvenaria)	Baixa (barragens de aterro)	Boa (barragens de concreto e alvenaria)	Fracas	Adequado sob o ponto de vista estático	Boas	Média confiabilidade	Boa	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>	Pequena
3	Baixa 0,1<a<0,2g	Baixa (barragens de aterro)	Média (barragens de concreto e alvenaria)	Média (barragens de aterro)	Médias	Satisfatório	Satisfatórias	Baixa confiabilidade	Satisfatória	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup>	Média
4	..	Média (barragens de concreto e alvenaria)	Média (barragens de aterro)	Aceitável (barragens de concreto e alvenaria)	Fortes	Aceitável	Aceitáveis	Reduzida confiabilidade	Aceitável	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>9</sup>	Grande
5	..	Média (barragens de aterro)	Grande	Medíocre (barragens de aterro)	Muito fortes	Medíocre	Medíocres	Não confiáveis	Medíocre	> 10 <sup>9</sup>	Elevada
6	..	Elevada	Elevada	..	Associadas a danos estruturais	Inadequado	Inaceitável	Inexistentes ou inoperantes	Inaceitável	..	Muito elevada

Fonte: Adaptado de PIMENTA, 2009, p. 265.



Apesar da sua similaridade com o índice global de risco, o método tem seu papel de importância, tendo em vista sua ampla aplicação efetiva em barragens.

Quanto à apreciação de riscos, Caldeira (2008) compila os resultados dos índices parciais e globais no que tange às barragens de aterro abrangidas pelo RSB, permitindo visualizar um panorama da situação do portfólio de barragens portuguesas. Dos resultados obtidos, concluiu-se que o índice parcial que mais contribuiu no índice global foi o relativo à confiabilidade. Além disso, verificou-se uma grande variabilidade nos índices, podendo estar relacionada às condições desiguais das barragens, como também às avaliações realizadas por diferentes empresas e equipes.

Sobre a classificação das barragens, a classe A, embora não seja explicitamente definida como tal, poderia ser caracterizada como a zona onde os riscos seriam inaceitáveis, uma vez que caracteriza situação de intervenção imediata indispensável.

### 2.6.3 Índice de Lafitte

Inspirado no índice global de risco, Lafitte (1996 citado por PIMENTA, 2009) desenvolveu um índice para classificação de barragens com o objetivo de definir prioridades de intervenção, monitoramento e alerta de populações a jusante.

O método de Lafitte, de forma muito similar ao anterior, também agrupa os descritores em três classes:

- CL: relacionada às condicionantes locais;
- FO: relacionada à confiabilidade da obra;
- ISE: relativo aos impactos socioeconômicos no vale a jusante.

Por outro lado, o método utiliza um maior número de descritores para avaliação. A TAB. 2.6 mostra a regra geral de classificação do método.

Da TAB. 2.6, depreende-se que os descritores também são pontuados de um a seis, todavia os descritores  $\alpha_7$ ,  $\alpha_8$  e  $\alpha_{12}$  podem assumir, na pior situação, valor igual a 30 pontos. O descritor  $\alpha_{12}$  também pode ser registrado com nota equivalente a 20 pontos. Toda classificação maior ou igual a seis exige uma intervenção técnica. Diferentemente do método anterior, nenhum dos descritores apresenta distinção de nota em função do tipo de barragem (terra ou concreto).

TABELA 2.6 – Índice de Lafitte

Descr Class	CLASSE ASSOCIADA ÀS CONDICIONANTES LOCAIS (CL)						CLASSE ASSOCIADA À CONFIABILIDADE DA OBRA (FO)						CLASSE ASSOCIADA AOS IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS NO VALE JUSANTE (ISE)			
	Sismicidade (intensidade) peso 3	Hidrologia (conhecimento disponível) peso 4	Aporte de sedimentos (quantidade) peso 1	Clima (condições climáticas) peso 2	Geologia (condições geológicas) peso 3	Estabilidade dos taludes do reservatório (probabilidade de escorregamentos) peso 3	Qualidade do corpo da barragem peso 4	Qualidade das fundações peso 4	Varição do nível da água no reservatório peso 1	Órgãos de descarga peso 3	Descarregador de fundo peso 2	Monitoramento, operação e manutenção peso 4	Conseq. na população a jusante peso 3	Conseq. no meio ambiente, estruturas e infraestruturas interferidas peso 1	Importância da infraestruturas em estudo peso 1	Sistemas de aviso e alerta peso 2
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$	$\alpha_{10}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{14}$	$\alpha_{15}$	$\alpha_{16}$
1	MSK $\leq$ VI	Bom	Baixo	Amenas	Boas	Muito reduzida	Boa	Boa	Anual ou interanual	Superdimensionado	Superdimensionado	Muito bons	Sem fatalidades	Áreas inabitadas sem valor econômico	Reduzida	Existente (automatizado)
2	VI < MSK $\leq$ VII	..	..	..	..	Reduzida	..	..	..	Adequado	Adequado	Bons	..	Casas isoladas, agricultura	Média	..
3	VII < MSK $\leq$ XIII	Razoável	Médio	Médias	Razoáveis	Média	Aceitável	Aceitável	Mensal	Aceitável	Aceitável	Satisfatórios	5 a 10 fatalidades	Pequenos aglomerados populacionais, agricultura	Significativa	Existente (não automatizado)
4	XIII < MSK $\leq$ IX	..	..	..	..	Elevada	..	..	..	..	..	..	..	Cidades de médio porte, serviços, pequena indústria	Elevada	..
5	IX < MSK $\leq$ X	Fraco	Elevado	Extremas	Medíocres	..	..	..	Semanal ou diária	..	..	Inadequados (20 pontos)	..	Grandes cidades, serviços, comércio, indústria	..	..
6	X < MSK $\leq$ XI	..	..	..	..	Possibilidade de ocorrência de grandes escorregamentos	Inadequada (30 pontos)	Inadequada (30 pontos)	..	Inadequado	Inadequado	Gravemente inadequados (30 pontos)	Mais de 10 fatalidades	..	..	Inexistente

Fonte: Adaptado de PIMENTA, 2009, p. 287.

Nota: MSK – refere-se à escala de intensidade sísmica

Os cálculos dos índices parciais relativos às três classes de análise são apresentados nas EQ. 2.11, 2.12 e 2.13:

$$CL = \frac{3 \alpha_1 + 4 \alpha_2 + 1 \alpha_3 + 2 \alpha_4 + 3 \alpha_5 + 3 \alpha_6}{16} \quad (2.11)$$

Em que:

CL = índice parcial relativo às condicionantes locais;

$\alpha_i$  = descritores.

$$FO = \frac{4 \alpha_7 + 4 \alpha_8 + 1 \alpha_9 + 3 \alpha_{10} + 2 \alpha_{11} + 4 \alpha_{12}}{18} \quad (2.12)$$

Em que:

FO = índice parcial relativo à confiabilidade da obra;

$\alpha_i$  = descritores.

$$ISE = \frac{3 \alpha_{13} + 1 \alpha_{14} + 1 \alpha_{15} + 2 \alpha_{16}}{7} \quad (2.13)$$

Em que:

ISE = índice parcial relativo aos impactos socioeconômicos no vale a jusante;

$\alpha_i$  = descritores.

O índice de risco de Lafitte é dado pelo produto dos índices parciais apresentados, ou seja:

$$IG = \frac{1 CL + 2 FO + 4 ISE}{7} \quad (2.14)$$

Em que: IG = índice de risco de Lafitte.

Conforme observado nas equações, nessa metodologia são atribuídos pesos diferentes tanto para os descritores como para o cálculo do índice risco, traduzindo a importância e influência de cada fator para o autor, tendo por base o contexto de seu portfólio de barragens. Evidentemente entende-se ser mais lógico relativizar a importância de cada fator, embora essa atribuição de pesos seja complexa e remeta à natureza subjetiva, inerente aos métodos preliminares.

Lafitte (1996 citado por PIMENTA, 2009) aplicou o método em 42 barragens suíças controladas pelo Estado. Os resultados do estudo realizado permitem inferir que as barragens são bem dimensionadas e mantidas (FO), situam-se em locais onde as condições locais não são desfavoráveis (CL) e cujas consequências de uma eventual ruptura são elevadas (ISE). Tais resultados também auxiliam na compreensão dos pesos atribuídos pelo autor aos índices parciais das três classes (PIMENTA, 2009).

#### 2.6.4 Metodologia para tomada de decisões: sistema de classificação de barragens Sabesp

Kuperman *et al.* (1994) desenvolveram no ano de 1992, em caráter pioneiro no Brasil, uma metodologia para tomada de decisões baseada na classificação de barragens, de acordo com sua “periculosidade potencial”, seu “estado real” e seu “índice de comportamento”. A metodologia tinha como objetivo fundamental a comparação da segurança das diversas barragens, orientando as ações de manutenção e investigação. Inicialmente, o método foi aplicado em 24 barragens, com função de abastecimento de água, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp.

Com a experiência acumulada de aplicação do método ao longo dos anos, Kuperman *et al.* (2001) reavaliaram e incorporaram alguns novos critérios, consolidando assim a metodologia de tomada de decisões para barragens. A metodologia, de acordo com os autores, auxiliaria a companhia a deliberar de forma técnica e economicamente consistente sobre as condições das barragens sob sua responsabilidade.

A classificação das barragens é avaliada essencialmente por dois parâmetros, associados à periculosidade potencial e ao estado real. O primeiro fator pontua características de localização e de projeto, refletindo o potencial existente para a ocorrência de danos materiais, ambientais, perdas de vidas humanas ou a importância de uma eventual interrupção operativa da unidade. O segundo fator, relativo ao estado da barragem, é fruto da análise das condições reais observadas em cada instalação, incluindo também aspectos sobre a disponibilidade de informações de projeto e frequência do monitoramento. O índice de comportamento é simplesmente uma conjugação dos dois fatores comentados.

A avaliação da periculosidade potencial é realizada com base na TAB. 2.7. Os textos entre parênteses descrevem os critérios de aplicação, enquanto os valores representam as notas atribuídas a cada classificação.

TABELA 2.7 – Periculosidade potencial (PP)

IMPORTÂNCIA PARA A SABESP <sup>1</sup>	DIMENSÃO DA BARRAGEM <sup>2</sup>	VOLUME DE ÁGUA ARMAZENADA <sup>3</sup>	IMPACTO A JUSANTE			TIPO DE BARRAGEM <sup>7</sup>	ÓRGÃO VER-TENTE <sup>8</sup>	VAZÃO DE PROJETO <sup>9</sup>
			Social <sup>4</sup>	Ambiental <sup>5</sup>	Econômico <sup>6</sup>			
Pequena (redução da oferta é suportável, sendo fácil supri-la de modo alternativo) (10)	Pequena (H < 15m ; 0,05hm <sup>3</sup> < V < 1hm <sup>3</sup> ) (10)	Baixo (V < 0,05hm <sup>3</sup> ) (5)	Baixo (populações a jusante não afetadas) (10)	Baixo (área afetada < 0,1 km <sup>2</sup> , duração do impacto inferior a 1 mês e nenhum efeito ecológico maior) (10)	Baixo (sem danos ; reparações menores que R\$200mil) (5)	Concreto (15)	De superfície sem controle (15)	Vazão Máxima Provável (VMP) ou 1000 < Período de recorrência (TR) < 10.000 anos (20)
Média (não funcionamento é possível ; custos razoáveis e remanejamento) (8)	Média (15m < H < 30m ; 1hm <sup>3</sup> < V < 50hm <sup>3</sup> ) (6)	Pequeno (0,05hm <sup>3</sup> < V < 1hm <sup>3</sup> ) (4)	Pequeno (menos de 100 pessoas afetadas e/ou perda de capacidade produtiva menor que 10%) (8)	Pequeno (0,1km <sup>2</sup> < área afetada < 1km <sup>2</sup> ; 1mês < duração do impacto < 1ano; alteração na vegetação) (8)	Pequeno (até 5 casas danificadas e/ou despesas entre R\$200mil e R\$10milhões) (4)	Enroca- mento (12)	De superfície com controle (10)	100 < Período de recorrência (TR) < 1000 anos (12)
Significativa (não func. com custos significativos e remanejamentos importantes) (6)	Média (15m < H < 30m ; 1hm <sup>3</sup> < V < 50hm <sup>3</sup> ) (6)	Médio (1hm <sup>3</sup> < V < 50hm <sup>3</sup> ) (3)	Médio (de 100 a 1000 pessoas afetadas e/ou perda de capacidade produtiva menor que 30%) (6)	Médio (1km <sup>2</sup> < área afetada < 10km <sup>2</sup> ; 1ano < duração do impacto < 10 anos; espécies afetadas e efeitos sobre meio ambiente sensíveis) (3)	Médio (destruídas entre 6 e 49 casas ou danificadas muitas casas e/ou despesas entre R\$11 milhões e R\$50milhões) (3)	Terra (8)	De fundo (5)	Período de recorrência (TR) < 100 ou desconhecido ou calculado há mais de 20 anos (2)
Grande (não func. com custos elevados e remanejamentos importantes) (4)	Grande (H > 30m ; V > 50hm <sup>3</sup> ) (2)	Grande (50hm <sup>3</sup> < V < 100hm <sup>3</sup> ) (2)	Grande (mais de 1000 pessoas afetadas e/ou perda maior que 30% da capacidade produtiva) (0)	Grande (área do impacto > 10km <sup>2</sup> ; duração > 10 anos; importantes efeitos ecológicos e grandes impactos ao meio ambiente) (0)	Grande (destruídas mais de 50 casas e/ou despesas maiores do que R\$50milhões) (0)	Terra (8)	De fundo (5)	Período de recorrência (TR) < 100 ou desconhecido ou calculado há mais de 20 anos (2)
Elevada (redução inaceitável da oferta de água) (2)		Elevado (V > 100hm <sup>3</sup> ) (1)						

Fonte: Adaptado de KUPERMAN *et al.*, 2001, p. 538.

O valor da periculosidade é calculado segundo a EQ. 2.15:

$$PP = \sum_1^9 pp_i \quad (2.15)$$

Em que:

PP = periculosidade potencial;

pp<sub>i</sub> = descritores da periculosidade potencial

A segunda classe de descritores, que procura traduzir as reais condições das barragens, é avaliada por meio da TAB. 2.8.

TABELA 2.8 – Estado real da barragem (ER)

INFORMAÇÕES DE PROJETO <sup>10</sup>	FREQUÊNCIA NA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO <sup>11</sup>	PERCOLAÇÃO <sup>12</sup>	DEFORMAÇÕES <sup>13</sup>	NÍVEL DE DETERIORAÇÃO DE PARAMENTOS OU TALUDES <sup>14</sup>	EROSÕES A JUSANTE <sup>15</sup>	CONDIÇÕES DOS EQUIP. DOS DESCARREGADORES <sup>16</sup>
Completas (5)	Adequada (10)	Conforme prevista em projeto ou inexistente (20)	Conforme previstas em projeto ou inexistentes (20)	Mínimo ou inexistente (15)	Mínimas ou inexistentes (15)	Boa (15)
Parciais (4)	Razoável (6)	Fora do previsto, mas não crítica (15)	Fora do previsto, mas não críticas (15)	Baixo (12)	Poucas (12)	Razoável (8)
Incompletas (2)	Inadequada (2)	Crítica (5)	Críticas (5)	Moderado (6)	Moderadas (6)	
Inexistentes (0)	Nenhuma (0)	Desconhecida (0)	Desconhecidas (0)	Alto (4)	Elevadas (4)	Ruim (6)
				Excessivo (3)	Significativas (3)	Inoperantes ou sem registro (3)

Fonte: Adaptado de KUPERMAN *et al.*, 2001, p. 543.

O valor do estado real da barragem é dado pela EQ. 2.16:

$$ER = \sum_{10}^{16} er_i \quad (2.16)$$

Em que:

ER = estado real da barragem;

er<sub>i</sub> = descritores do estado real da barragem.

O “Índice de comportamento” (IC) é determinado com base nos dois índices classificatórios definidos anteriormente, conforme a EQ. 2.17:

$$IC = 0,4 PP + 0,6 ER \quad (2.17)$$

Em que:

IC = índice de comportamento;

PP = periculosidade potencial;

ER = estado real da barragem.

Os pesos 0,4 e 0,6 representam a importância e influência de cada fator para os autores. Com relação à apreciação dos resultados práticos da aplicação, Kuperman *et al.* (2001) definem as seguintes faixas:

- $IC > 70$  = Normalidade: não há defeitos reportáveis. Não requer quaisquer ações imediatas.
- $60 < IC \leq 70$  = Atenção: existem alguns defeitos que não comprometem seu desempenho; as anomalias ou restrições não apresentam risco à segurança da barragem a curto prazo, porém devem ser controladas e monitoradas. Levantamentos e estudos devem ser realizados para confirmar ou alterar seu índice de comportamento. Não há, ainda, necessidade de priorizar eventuais intervenções corretivas.
- $50 < IC \leq 60$  = Alerta: existem anomalias que podem representar eventual risco à segurança da barragem e/ou operação do sistema. Há necessidade de uma avaliação detalhada da real situação da barragem, reavaliação do índice de comportamento e estudos de alternativas para reparos. Devem ser tomadas providências para eliminação ou controle do problema.
- $IC \leq 50$  = Estudos detalhados sobre a barragem indicam haver anomalias que representam risco à segurança da mesma e/ou à operação do sistema. Dependendo do tipo de barragem e do problema, a situação pode ficar fora de controle e haver risco de ruptura iminente, dependendo da operação do sistema. Pode ser necessário o rebaixamento imediato do reservatório, abandono eventual do local e o acionamento de um plano de ação emergencial.

#### 2.6.5 Metodologia de classificação de barragens Cemig

Fusaro (1999) apresenta a metodologia de classificação de barragens que vinha sendo utilizada pela Cemig, desde 1996, com o intuito de definir o nível de monitoramento necessário para garantia da segurança das barragens. No contexto da literatura nacional, e ainda de forma inovadora, essa é a segunda metodologia de classificação de barragens com registro de utilização no Brasil.

Posteriormente, a partir de 2003, foi desenvolvida uma nova metodologia, incorporando alguns conceitos de análises de risco já empregados no cenário mundial de segurança de barragens, de forma que fosse possível não só definir os níveis de monitoramento das barragens, mas principalmente categorizar e priorizar serviços de manutenção. Os parâmetros considerados no método foram selecionados e calibrados a partir da análise de informações do banco de deteriorações da ICOLD e do histórico da Cemig. Dados estatísticos de ruptura de barragens da ICOLD também foram utilizados, assim como fatores baseados no julgamento de engenharia (FUSARO, 2003). A metodologia aqui apresentada tornou-se uma ferramenta importante no gerenciamento do portfólio de barragens operadas e mantidas pela Cemig GT.

A classificação das barragens pelo método é determinada, qualitativamente, a partir do risco estimado representado por cada barragem, equivalente à probabilidade de ruptura multiplicada pela consequência. A probabilidade de ruptura, por sua vez, é subdividida em dois parâmetros (potencial de risco e vulnerabilidade), compondo, assim, a EQ 2.18:

$$R = (P + V) \times C \quad (2.18)$$

Em que:

R = risco estimado;

P = potencial de risco;

V = vulnerabilidade;

C = consequência.

O Potencial de Risco (P) é um parâmetro que busca quantificar características intrínsecas ao projeto, que definiriam estruturas mais ou menos seguras de acordo com estudos estatísticos de ruptura (Boletim n° 99 da ICOLD), levando em consideração o tipo da barragem, o tipo de fundação e sua idade, conforme TAB. 2.9.

TABELA 2.9 – Potencial de risco

TIPO BARRAGEM (Pb)	TIPO FUNDAÇÃO (Pf)	IDADE (Pi)
Concreto (20)	Rocha sã (10)	Se Idade < 10, Pi = 100
CCR (40)	Rocha tratada (30)	..
Enrocamento (80)	Solo/aluvião tratado (80)	Se Idade ≥ 10, Pi = 8988,9 x Idade <sup>(-1,9544)</sup>
Terra (100)	Solo/aluvião (100)	..

Fonte: Adaptado de FUSARO, 2003, p. 63.



A EQUAÇÃO 2.19 sintetiza o cálculo do potencial de risco:

$$P = P_b + P_f + P_i \quad (2.19)$$

Em que:

$P_b$  = tipo da barragem;

$P_f$  = tipo de fundação;

$P_i$  = idade.

A Vulnerabilidade (V) é um parâmetro que representa o quanto as estruturas do barramento estão vulneráveis a uma possível ruptura, mensurada por uma parcela relativa à adequação aos critérios de projeto atuais ( $V_p$ ) e outra à condição atual das estruturas ( $V_m$ ), de acordo com a EQ 2.20:

$$V = V_p + V_m \quad (2.20)$$

Em que:

$V_p$  = índice de adequação aos critérios de projeto atuais;

$V_m$  = índice da condição atual das estruturas.

O índice  $V_p$ , por sua vez, busca avaliar o quanto as estruturas que compõem o barramento foram projetadas em aderência aos principais critérios de projeto atuais, sendo definido pela EQ. 2.21:

$$V_p = \sum (A_n \times PV_{Pn}) \quad (2.21)$$

Em que:

$A_n$  = adequação ao item de critério de projeto atual, conforme TAB. 2.10;

$PV_{Pn}$  = peso do item de critério de projeto atual, conforme TAB. 211.

TABELA 2.10 – Índices de adequação aos critérios de projeto atuais

$A_n$	ADEQUAÇÃO AOS CRITÉRIOS DE PROJETO ATUAIS (A)
0	Atende aos critérios de projeto atuais
1	Aparentemente atende aos critérios de projeto atuais
2	Atende parcialmente aos critérios de projeto (não atende aos carregamentos excepcionais)
3	Aparentemente não atende aos critérios de projeto atuais
4	Não atende aos critérios de projeto atuais

Fonte: Adaptado de FUSARO, 2003, p. 64.

TABELA 2.11 – Itens de projeto a serem avaliados à luz dos critérios atuais

PV <sub>PN</sub>	ESTRUTURAS DE TERRA
5	Borda livre da estrutura
5	Estabilidade ao escorregamento dos taludes montante/jusante e fundação
5	Dimensionamento do sistema de drenagem e transições do maciço de terra
5	Tratamento de fundação adequado
PV <sub>PN</sub>	ESTRUTURAS DE CONCRETO (BARRAGEM E CIRCUITO HIDRÁULICO DE GERAÇÃO)
5	Borda livre da estrutura
5	Estabilidade global (deslizamento estrutura/fundação, tombamento, flutuação, tensões)
5	Tratamentos de fundação adequados
PV <sub>PN</sub>	EXTRAVASORES
50	Vazão de projeto dos órgãos extravasores
5	Estabilidade global (deslizamento estrutura/fundação, tombamento, flutuação, tensões, vibrações)
5	Tratamentos de fundação adequados
5	Regras operativas e treinamento do operador/barrageiro

Fonte: Adaptado de FUSARO, 2003, p. 64.

O índice  $V_m$  define as condições de manutenção das estruturas que compõem o barramento, sendo determinado pelas deteriorações observadas em campo, em que cada uma delas recebe uma nota de gravidade e urgência (do reparo), de acordo com as descrições estabelecidas na TAB. 2.12.

TABELA 2.12 – Notas de gravidade e urgência

GRAVIDADE		URGÊNCIA	
A deterioração, no grau em que se apresenta, ...		Esta deterioração requer ...	
50	afeta gravemente a segurança global do barramento	..	..
20	afeta significativamente a segurança global do barramento	..	..
10	afeta em menor grau a segurança global do barramento	2,0	ação imediata
6	afeta indiretamente a segurança global do barramento	1,5	ação programável para o próximo ciclo
5	afeta a segurança funcional/ambiental do empreendimento ou a segurança do trabalho	1,0	acompanhamento periódico / monitoramento
2	se evoluir poderá afetar a segurança funcional/ambiental do empreendimento ou a segurança do trabalho	0,5	ação programável a longo prazo
2	se evoluir poderá afetar a segurança do barramento	..	..
1	pode ser indicativo de problema, mas as informações existentes levam a crer que não é um problema que afeta a segurança	..	..
0,5	afeta aspectos de conservação do patrimônio	..	..

Fonte: Adaptado de FUSARO, 2003, p. 65.

Importante ressaltar que, na composição desse índice, só entram as deteriorações que podem afetar a vulnerabilidade do barramento, isto é, aquelas falhas que, de algum modo, podem conduzir à ruptura da barragem. O produto da gravidade e urgência calculado de cada deterioração é um instrumento de priorização dos serviços relativos à segurança de barragens e manutenção das estruturas civis.

O índice  $V_m$  é então calculado pela EQ. 2.22:

$$V_m = \sum (D_G \times D_U) \quad (2.22)$$

Em que:

$D_G$  = índice de gravidade da deterioração;

$D_U$  = índice de urgência da necessidade de reparo.

Por fim, a estimativa da consequência traduz os danos e prejuízos causados por uma eventual ruptura da barragem, de acordo com a EQ. 2.23. A TAB. 2.13 detalha os índices parciais da consequência.

$$C = C_G + C_R + C_J \quad (2.23)$$

Em que:

$C$  = consequência;

$C_G$  = capacidade de geração;

$C_R$  = volume do reservatório;

$C_J$  = danos a jusante.

TABELA 2.13 – Notas de consequência

POTÊNCIA INSTALADA (MW) $C_G$	VOLUME RESERVAT.(hm <sup>3</sup> ) $C_R$	DANOS A JUSANTE $C_J$
$0 \leq x < 30$ (0)	$0 \leq x < 5$ (0)	Danos econom., sociais, amb.mín./Nenhuma perda de vida humana (1)
$30 \leq x < 250$ (1)	$5 \leq x < 50$ (1)	..
$250 < x < 500$ (2)	$50 < x < 500$ (2)	Danos econômicos, sociais e ambientais moderados. (2)
$x \geq 500$ (3)	$500 \leq x < 5000$ (3)	..
..	$x \geq 5000$ (4)	Danos econômicos, sociais e ambientais elevados/excessivos (3)

Fonte: Adaptado de FUSARO, 2003, p. 67.

Concluído o cálculo dos índices apresentados, a matriz de risco, ilustrada na FIG. 2.17, resume a distribuição dos riscos associados às diversas barragens, definindo três classes de barragens (A, B e C), que, por sua vez, estabelecem os níveis de monitoramento das barragens.

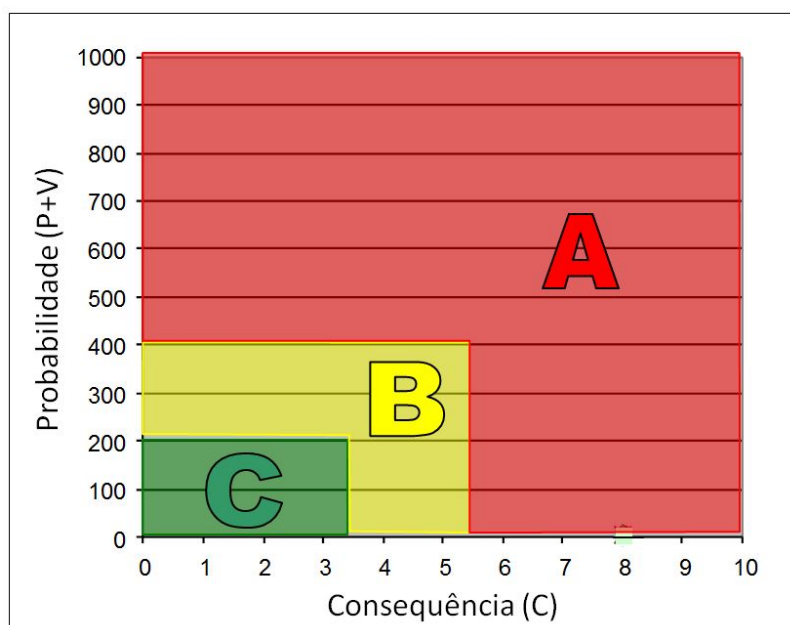


FIGURA 2.17 – Matriz de risco Cemig  
Fonte: Adaptado de FUSARO, 2003, p. 62.

### 2.6.6 Potencial de risco

A metodologia de avaliação do potencial de risco desenvolvida por Menescal *et al.* (2001b) teve como objetivo principal a classificação de barragens destinadas a usos múltiplos sob responsabilidade da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará – COGERH.

Essa metodologia assume uma importância no contexto brasileiro de métodos de análise preliminar, porque foi incorporada na publicação oficial do Ministério da Integração Nacional, intitulada Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, que, por sua vez, viria a influenciar na elaboração das matrizes de análise da Lei 12.334.

O potencial de risco (PR) é constituído de três fatores:

- Periculosidade (P): composto por descritores relativos a parâmetros intrínsecos da barragem ou características técnicas do projeto;
- Vulnerabilidade (V): composto por descritores associados ao estado atual da barragem;

- Importância (I): com descritores relacionados à consequência de uma eventual ruptura da barragem.

A TAB. 2.14 apresenta a avaliação relativa ao primeiro fator (periculosidade). Os valores entre parênteses representam as notas atribuídas a cada classificação.

TABELA 2.14 – Periculosidade

DIMENSÃO DA BARRAGEM <sup>1</sup>	VOL. TOTAL DO RESERVATÓRIO <sup>2</sup>	TIPO DE BARRAGEM <sup>3</sup>	TIPO DE FUNDAÇÃO <sup>4</sup>	VAZÃO DE PROJETO <sup>5</sup>
Altura ≤ 10m e Comprimento ≤ 200m (1)	Pequeno < 20hm <sup>3</sup> (3)	Concreto (4)	Rocha (1)	Decamilenar (1)
10m < Altura < 20m e Comprimento ≤ 200m (3)	Médio até 200 hm <sup>3</sup> (5)	Alvenaria de pedra/concreto rolado (6)	Rocha alterada Sapolito (4)	Milenar (2)
20 ≤ Altura ≤ 50m ou Comprimento 200m a 3000m (6)	Regular 200 a 800hm <sup>3</sup> (7)	Terra Enrocamento (8)	Solo residual / Aluvião até 4m (5)	500 anos (4)
Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)	Muito grande > 800hm <sup>3</sup> (10)	Terra (10)	Aluvião arenoso espesso / Solo orgânico (10)	Inferior a 500 anos ou desconhecida (10)

Fonte: Adaptado de MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002, p. 81.

O valor da periculosidade é calculado segundo a EQ. 2.24:

$$P = \sum_{1}^{5} p_i \quad (2.24)$$

Em que:

P = periculosidade;

p<sub>i</sub> = descritores da periculosidade.

Já a TAB. 2.15 apresenta a avaliação do fator vulnerabilidade. Destaca-se que alguns descritores podem receber pontuação equivalente a 10, implicando, segundo o método, em uma intervenção na barragem.

TABELA 2.15 – Vulnerabilidade

TEMPO DE OPERAÇÃO <sup>6</sup>	EXISTÊNCIA DE PROJETO ( <i>AS BUILT</i> ) <sup>7</sup>	CONFIAB. ESTRUTURAS VERTE-DOURAS <sup>8</sup>	TOMADA DE ÁGUA <sup>9</sup>	PERCOLAÇÃO <sup>10</sup>	DEFORMAÇÕES AFUNDAMENTO ASSENTAMENTOS <sup>11</sup>	DETRIOÇÃO DOS TALUDES / PARAMENTOS <sup>12</sup>
> 30 anos (0)	Existem <i>as built</i> Projetos e Avaliação do Desempenho (1)	Muito satisfatória (2)	Satisfatória Controle a montante (1)	Totalmente controlada pelo sistema de drenagem (1)	Inexistente (0)	Inexistente (1)
de 10 a 30 anos (1)	Existem projetos e <i>as built</i> (3)	Satisfatória (3)	Satisfatória Controle a jusante (2)	Sinais de umedecimento nas áreas jus., taludes ou ombreiras (4)	Pequenos abatimentos da crista (2)	Falhas no rip-rap e na proteção de jusante (3)
de 5 a 10 anos (2)	Só projeto básico (5)	Suficiente (6)	Aceitável (3)	Zonas úmidas em taludes de jus., ombreiras, área alagada jus devido ao fluxo (6)	Ondulações pronunciadas, fissuras (6)	Falha proteções, drenagens insuficientes e sulcos nos taludes (7)
< 5 anos (3)	Não existe projeto (7)	Não satisfatório (10)	Deficiente (5)	Surgência de água em taludes, ombreiras e área de jusante (10)	Depressão na crista, afundamentos nos taludes, ou na fundação/trincas (10)	Depressão no rip-rap, escorreg., sulcos profundos de erosão, vegetação (10)

Fonte: Adaptado de MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002, p. 82.

O valor da vulnerabilidade é calculado segundo a EQ. 2.25:

$$V = \sum_6^{12} v_i \quad (2.25)$$

Em que:

V = vulnerabilidade;

$v_i$  = descritores da vulnerabilidade.

A TAB. 2.16 mostra a classificação associada ao fator Importância.

TABELA 2.16 – Importância

VOL. ÚTIL (hm <sup>3</sup> ) <sup>13</sup>	POPULAÇÃO A JUSANTE <sup>14</sup>	CUSTO DA BARRAGEM <sup>15</sup>
grande (2) > 800	grande (2,5)	elevado (1,5)
médio (1,5) 200 a 800	média (2,0)	médio (1,2)
baixo (1) <200	pequena (1,0)	pequeno (1,0)

Fonte: Adaptado de MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002, p. 83.

O valor da importância é calculado segundo a EQ. 2.26:

$$I = \frac{i_{13} + i_{14} + i_{15}}{3} \quad (2.26)$$

Em que:

I = importância;

$i_i$  = descritores da importância.

Por fim, o potencial de risco é dado pela EQ. 2.27:

$$PR = \frac{(P + V)}{2} \times I \quad (2.27)$$

Em que:

PR = potencial de risco;

P = periculosidade;

V = vulnerabilidade;

I = importância.

Quanto à apreciação do risco, Menescal *et al.* (2001b) definem as classes da TAB. 2.17, ressaltando que barragens com PR acima de 55 devem ser reavaliadas mais criteriosamente e aquelas incluídas na classe A exigem intervenção, a ser definida com base em uma inspeção especial.

TABELA 2.17 – Classes do potencial de risco

CLASSE	CRITÉRIO (PR)	DESCRIÇÃO
A	> 65 (ou $v_i = 10$ )	Alto
B	40 A 65	Médio
C	25 A 39	Normal
D	15 A 24	Baixo
E	< 15	Muito baixo

Fonte: Adaptado de MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002, p. 83.

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2002), o método foi aplicado a 116 barragens sob jurisdição da COGERH. Menescal *et al.* (2001b) ainda apresentam, com base no método, tabelas propositivas para frequência de inspeções e monitoramento com instrumentação.

### 2.6.7 Matrizes de classificação: Lei 12.334

Conforme tratado no item 2.4, é de conhecimento geral que a Lei 12.334 (“lei de segurança de barragens”) instituiu, como primeiro de seus instrumentos, um sistema de classificação de barragens por categoria de risco e dano potencial associado. Essa classificação, baseada em índices de risco e matrizes de classificação, é fruto da experiência acumulada ao longo dos anos com as metodologias anteriormente apresentadas.

A adoção de um sistema de classificação na lei ratifica a relevância dos métodos, ainda que de uso preliminar, para a análise de risco em portfólio de barragens. A classificação de barragens em questão constitui-se a base para análise de segurança das barragens abrangidas pela Lei 12.334, fixando níveis de monitoramento, inspeção e planos de segurança.

A definição das diretrizes para estabelecimento dos critérios gerais de classificação de barragens foi atribuída ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. Assim sendo, a Resolução nº 143, de julho de 2012, divulgou as regras gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório.

Importante salientar que compete aos órgãos fiscalizadores a regulamentação de alguns dispositivos da lei, diferindo em função do uso que é dado ao barramento. Como já exposto, no caso das barragens de geração de energia elétrica, essa responsabilidade cabe à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Nesse sentido, podem existir alterações, ainda que mínimas, na regulamentação dos critérios para classificação dos empreendimentos de energia elétrica. Até o presente momento (fevereiro de 2014) não existe regulamentação da ANEEL em vigor e, portanto, é exibido o sistema de classificação definido na íntegra pelo CNRH, relativo a barragens de acumulação de água.

A classificação proposta pelo CNRH utiliza três matrizes de classificação para determinar a categoria de risco. Sua definição em alto, médio ou baixo é feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem. A EQUAÇÃO 2.28 sintetiza essa relação.

$$CRI = CT + EC + PS \quad (2.28)$$

Em que:



CRI = categoria de risco;

CT = características técnicas;

EC = estado de conservação;

PS = plano de Segurança da Barragem.

As TAB. 2.18, 2.19 e 2.20 mostram as respectivas matrizes de classificação que compõem a categoria de risco (CRI). Vários dos descritores selecionados no método são similares àqueles observados nas metodologias anteriores. Carim *et al.* (2013), por meio de uma análise crítica dos descritores, propõem critérios de avaliação para cada um deles, com o intuito de uniformizar a classificação das matrizes.

TABELA 2.18 – Matriz de classificação – características técnicas

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

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2012, p. 151.

O valor de CT é dado pela EQ. 2.29:

$$CT = \sum (a \text{ até } f) \quad (2.29)$$

Em que:

CT = características técnicas;

a até f = descritores da matriz de características técnicas.

TABELA 2.19 – Matriz de classificação – estado de conservação

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

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2012, p. 151.

O valor de EC é calculado pela EQ. 2.30:

$$EC = \sum (d \text{ até } g) \quad (2.30)$$

Em que:

EC = estado de conservação;

d até g = descritores da matriz de estado de conservação.

TABELA 2.20 – Matriz de classificação – plano de segurança

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

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2012, p. 151.

O valor de PS é dado por:

$$PS = \sum (n \text{ até } r) \quad (2.31)$$

Em que:

PS = plano de segurança da barragem;

n até r = descritores da matriz de plano de segurança da barragem.

A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo é feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem. Associado à matriz de dano potencial, apresentada na TAB. 2.21, também consta o critério de volume do reservatório.

TABELA 2.21 – Matriz de classificação – dano potencial associado

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

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2012, p. 152.

O valor de DPA é dado pela EQ. 2.32:

$$DPA = \sum (s \text{ até } v) \quad (2.32)$$

Em que:

DPA = dano potencial associado;

s até v = descritores da matriz de dano potencial associado.

A Resolução nº 143 do CNRH estabelece faixas de classificação, separadamente, para a categoria de risco (CRI) e para o dano potencial associado (DPA). O risco, propriamente dito como probabilidade de falha e consequência, não é explicitado. No entanto, a grandeza do risco pode ser inferida partindo do pressuposto de que os dois fatores (CRI e DPA), de certa forma, traduzem o par de valores probabilidade e consequência.

Assim sendo, pode-se assumir que:

- o fator Categoria de risco (CRI) é a probabilidade de falha
- o fator Dano potencial associado (DPA) é a consequência resultante

Com isso, o valor do Risco é dado pela EQ.2.33:

$$R = CRI \times DPA \quad (2.33)$$

Em que:

R = risco;

CRI = categoria de risco;

DPA = dano potencial associado;

Ainda que falha quanto à nomenclatura técnica de risco, a metodologia da Lei 12.334 enquadra-se em uma das “boas práticas” da gestão de segurança de barragens adotadas internacionalmente. A implementação expedita do método, além de atender ao objetivo primário de classificação das barragens, também permite uma primeira reflexão sobre possíveis modos de falha de uma barragem e pode permitir o estabelecimento de níveis de monitoramento. A análise preliminar de portfólio, com a promulgação da lei, abrange o universo de barragens brasileiras, podendo fornecer um panorama geral da segurança de barragens de todo o país.

### 2.6.8 Outros métodos de análise preliminar de risco

Além dos métodos destacados nos itens anteriores, existem outros passíveis de utilização, com o propósito de classificação de barragens, descritos na literatura. Como relatado por ICOLD (2009), existe uma variedade de classificações, estabelecidas por procedimentos e critérios bem definidos. Os critérios relativos às diferentes características da estrutura, assim como da magnitude das consequências, são muito variáveis e dependem dos autores, proprietários, empresas ou regulamentos existentes.

Harrald *et al.* (2004) discorrem sobre algumas metodologias utilizadas na avaliação e análise de risco relativas a operação e manutenção de barragens: RBPS (*Risk Based Profiling System*), TPR (*Technical Priority Rating*), CI (*Condition Indexing Methods*), PRA (*Portfolio Risk Assessment Methodology*), RAM-D (*Risk Assessment Methodology for Dams*) e EPRI (*Electric Power Research Institute's tool*).

A RBPS é uma metodologia utilizada pelo órgão governamental norte-americano *Bureau of Reclamation* (USBR) para melhorar a capacidade de priorizar as atividades e recursos relativos à segurança de barragens, e para identificar aquelas estruturas que apresentam maiores riscos (HARRALD *et al.*, 2004). A metodologia RBPS é baseada em um índice de risco e suas condições são avaliadas por meio de quatro categorias principais (estática, hidrológica, sísmica e operação e manutenção), calculando-se, no fim, o índice de risco (*Risk Index*). De acordo com Harrald *et al.* (2004), anteriormente à utilização da RBPS, vinha sendo empregada a metodologia TPR, desenvolvida em 1986. Ela era usada para priorizar um grande número de projetos potenciais de engenharia e construção, com um conjunto de critérios técnicos. Contudo, como a TPR não era um sistema baseado em risco, acabou por ser substituída pela RBPS.

A PRA, descrita em Bowles *et al.* (1998), tornou-se uma prática padrão na Austrália, estando inserida na atividade ampla de avaliação de risco. Essa metodologia tem por objetivo priorizar as ações de segurança de barragens e investimentos em medidas de redução de risco, fortalecendo o programa de segurança de barragens dos proprietários desses empreendimentos. Além disso, fornece um perfil de risco do portfólio de barragens existente (BOWLES *et al.*, 1998).

A metodologia CI utiliza-se do conceito de *Condition Indexing* (indexação de condição), que representa o processo pelo qual o atual estado físico de uma instalação (ou parte dela) deve ser definido. Primeiramente foi desenvolvida pelo órgão federal norte-americano USACE (*United*

*States Army Corps of Engineers*), inserido em um programa de reparo, avaliação, manutenção e reabilitação (*REMR Program*). No entanto, essa metodologia inicialmente focava somente na condição ou estado físico determinado pelas inspeções visuais sem considerar diretamente o risco. Com isso, em parceria com a empresa estatal canadense Hydro-Quebec, foi evoluída uma variante da metodologia CI, baseada no risco, e posteriormente chamada de *Risk indexing tool* (ferramenta de indexação de risco), própria para uso em barragens de aterro. A ferramenta busca identificar deficiências potenciais para a segurança da estrutura e tem como objetivo o desenvolvimento de um método de classificação que descreva a condição atual das barragens de uma maneira uniforme, incluindo um procedimento para priorização de atividades de operação e manutenção.

Quanto às metodologias RAM-D e EPRI (*Hydro Facility Vulnerability Assessment Tool* da *Electric Power Research Institute-EPRI*), segundo Harrald *et al.* (2004), elas diferem dos demais métodos, pois estão relacionadas a questões de segurança patrimonial. Ambos os métodos classificam e quantificam o risco da barragem relacionado somente ao perigo de ataque terrorista.

Pimenta (2009), baseada na experiência obtida com a aplicação prática do índice global de risco nas barragens portuguesas, desenvolveu também um novo método de índices, com a proposição do índice de risco e índice de controle do risco. O índice de risco leva em consideração vários descritores agrupados em três índices parciais (ações exteriores, consequências e confiabilidade), enquanto o índice de controle relaciona-se com prevenção, detecção e mitigação das consequências. Segundo a autora, os índices procuram integrar os conceitos das análises de risco e uniformizar o modo de apresentação e classificação dos descritores que compõem cada um deles.

Opyrchal *et al.* (2000) propõem um método para calcular o *hazard index* (melhor tradução: índice de risco) para as estruturas polonesas, de modo a refletir seu estado técnico e as infraestruturas econômicas existentes na área de inundação. O método calcula um *global hazard index* – GHI (índice global de risco), que busca comparar os riscos produzidos pelas diferentes estruturas e determinar a ordem de reparos, modernizações, investimentos e instalação de sistemas de alerta.

Kreuzer (2000) e ICOLD (2005) também destacam o método *Preliminary Risk Exposure Profile* (PREP), discutido por Hartford e Steward (1999 citado por KREUZER, 2000).

No cenário nacional também há o desenvolvimento de métodos alternativos de classificação de barragens. Zuffo (2005) desenvolveu uma metodologia para avaliação da segurança de barragens denominada Índice de Segurança de Barragens. O método considera diversos critérios (descritores)

agrupados em três classes (potencial de risco, performance e fatores ambientais) e foi aplicado a barragens de diversas finalidades. Atualmente (fevereiro de 2014), um grupo de estudos em segurança de barragens da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) está aperfeiçoando o índice de segurança de barragens.

Duarte (2008) adaptou o método do Potencial de Risco, proposto por Menescal *et al.* (2001b), para a utilização em barragens de contenção de rejeitos de mineração e resíduos industriais, modificando as tabelas de periculosidade, vulnerabilidade e importância do método original. Com isso, para seu universo de barragens, consegue-se focar as ações de segurança nas estruturas críticas quanto ao potencial de risco e potencial de dano ambiental.

Dias (2010) apresenta uma proposta de metodologia de avaliação qualitativa da segurança de barragens. A componente da probabilidade é avaliada por um conjunto de questões/perguntas associadas a cada modo de falha e justificada nos níveis baixa, média ou alta. A consequência é classificada descritivamente em relação ao seu dano potencial associado também em baixa, média e alta. O resultado do risco é apresentado em uma matriz de risco, permitindo a visualização comparativa direta da situação das estruturas, no caso de proprietários com mais de uma barragem.

Com relação às metodologias efetivamente utilizadas neste estudo (itens 2.6.1 a 2.6.7), a TAB. 2.22 resume suas características principais. A tabela mostra que, *grosso modo*, os métodos desenvolvidos ao longo dos anos tenderam a incorporar novos descritores, aumentando o número de aspectos sob avaliação.

TABELA 2.22 – Características principais dos métodos utilizados

MÉTODOS	AUTOR	ANO (divulgação)	NÚMERO DE CLASSES	NÚMERO DE DESCRITORES
Índice global de risco	ICOLD	1982	3	11
Índice global de risco modificado	ICOLD/INAG/LNEC	2001	3	11
Índice de Lafitte	Lafitte	1996	3	16
Metodologia de classificação Sabesp	Kuperman <i>et al.</i>	1994	2	16
Metodologia de classificação Cemig	Fusaro	1999	3	18
Potencial de risco	Menescal <i>et al.</i>	2001	3	15
Matrizes de classificação Lei 12.334	Brasil/CNRH	2012	4	21

#### 2.6.9 Diagramas de localização, causa e indicadores de falhas – LCI

O LCI é um método para aplicação específica em barragens, desenvolvido no Reino Unido por Hughes *et al.* (2000). O método é considerado uma variante do FMECA (apresentado no item 2.6.10), por meio do uso de diagramas de localização, causa e indicadores de falhas.



A aplicação do método, originalmente intitulado “*Risk Management for UK Reservoirs*”, é realizada em três estágios fundamentais (HUGHES *et al.*, 2000):

- 1 - Avaliação do impacto;
- 2 - Definição dos estudos subsequentes, de acordo com a avaliação do impacto;
- 3 - Avaliação FMECA (diagramas LCI).

O primeiro estágio, relativo à avaliação de impacto, por sua vez, é subdividido em cinco etapas:

- 1 - Coleta de dados e inspeção de campo;
- 2 - Previsão da vazão de descarga da barragem (devido à formação da brecha de ruptura);
- 3 - Previsão dos níveis de inundação potencial a jusante da barragem;
- 4 - Previsão dos impactos (consequências);
- 5 - Cálculo da pontuação de impacto (também definido por IGI – índice global de impacto).

Ressalva-se que, caso estudos de *dam-break* e mapas de inundação estiverem disponíveis para a barragem em análise, as etapas relativas às predições de vazões e níveis atingidos pela onda de inundação tornam-se desnecessárias. A previsão dos impactos é avaliada tanto para o vale a jusante próximo da barragem (< 5km) como para o vale afastado (entre 5 e 30km). Essa segregação se deve à importância do vale imediatamente a jusante, pois, segundo Graham (1998 citado por HUGHES *et al.*, 2000), metade das fatalidades ocorre nos primeiros 5 km a jusante da barragem.

A previsão dos impactos é estimada com base em sete categorias de impacto: zonas residenciais, zonas não residenciais (ex: escolas, lojas, empresas e hospitais), infraestrutura de transportes (ex: estradas, rodovias, aeroportos), áreas recreativas (acampamentos, campos, lagoas), áreas industriais, redes de abastecimento (ex: energia, água) e áreas agrícolas e habitats naturais. As perdas econômicas (PE) são avaliadas por uma escala de zero a quatro, considerando os pesos relativos a cada tipo de impacto. Tendo em vista que a perda de vidas humanas é o fator mais importante a ser levado em conta, o método, no caso das quatro primeiras categorias, utiliza-se também dos conceitos de PAR (pessoas em perigo) e PPV (perda potencial de vidas humanas). A relação entre os conceitos é descrita pelas EQ. 2.34 e 2.35:

Para o vale a jusante próximo à barragem:

$$PPV = 0,5 PAR \quad (2.34)$$

Para o vale a jusante afastado da barragem:

$$PPV = PAR^{0,6} \quad (2.35)$$

Em que:

PPV = perda potencial de vidas humanas;

PAR = pessoas em risco.

A previsão dos impactos é, portanto, avaliada com o auxílio da TAB. 2.23.

TABELA 2.23 – Avaliação do impacto

TIPO 1 – ZONAS RESIDENCIAIS			
Importância das perdas	Nº de habitações afetadas	Classificação	PAR
Nenhuma	0	0	0
Pequena	1 a 15	1	30
Média	16 a 50	2	100
Elevada	51 a 250	3	500
Muito elevada	> 250	4	2 x nº de hab.
TIPO 2 – ZONAS CONSTRUÍDAS NÃO RESIDENCIAIS			
Importância das perdas	Nº de pessoas afetadas	Classificação	PAR
Nenhuma	0	0	0
Pequena	1 a 150	1	150
Média	151 a 500	2	500
Elevada	501 a 1000	3	1000
Muito elevada	> 1000	4	nº de pessoas
TIPO 3 – INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES			
Importância das perdas	Tipo de vias afetadas	Classificação	PAR
Nenhuma	-	0	0
Pequena	Caminhos	1	25
Média	Estradas vicinais	2	50
Elevada	Rodovias estaduais	3	100
Muito elevada	Rodovias federais, aeroportos	4	Estimativa
TIPO 4 – ÁREAS RECREATIVAS			
Importância das perdas	Nº de pessoas afetadas	Classificação	PAR
Nenhuma	0	0	0
Pequena	1 a 10	1	10
Média	11 a 50	2	50
Elevada	51 a 100	3	100
Muito elevada	> 100	4	nº de pessoas
TIPO 5 – ÁREAS INDUSTRIAIS			
Importância das perdas	Tipo de área industrial afetada	Classificação	
Nenhuma	-	0	
Pequena	Artesanal	1	
Média	Associadas a saúde pública	2	
Elevada	Perímetros industriais	3	
Muito elevada	Indústrias perigosas	4	
TIPO 6 – REDES DE ABASTECIMENTO			
Importância das perdas	Tipo de redes afetadas	Classificação	
Nenhuma	-	0	
Pequena	Local (distribuição)	1	
Média	Local (origem e distribuição)	2	
Elevada	Regionais	3	
Muito elevada	Nacionais	4	
TIPO 7 – ÁREAS AGRÍCOLAS E HABITATS NATURAIS			
Importância das perdas	Tipo de área afetada	Classificação	
Nenhuma	Não cultivada	0	
Pequena	Pastagens	1	
Média	Agricultura dispersa	2	
Elevada	Agricultura intensa, habitats naturais, patrimônio nacional	3	
Muito elevada	Habitats protegidos, patrimônio mundial	4	

Fonte: Adaptado de ESPÓSITO *et al.*, 2011, p. 4.

O índice global de impacto é calculado pela EQ. 2.36:

$$IGI = 100 PE_{<5km} + PPV_{<5km} + 30 PE_{5-30km} + PPV_{5-30km} \quad (2.36)$$

Em que:

IGI = índice global de impacto;

PE = perdas econômicas;

PPV = perda potencial de vidas humanas.

O segundo estágio do método trata somente da definição dos estudos subsequentes, de acordo com os resultados obtidos na avaliação do impacto (índice global de impacto). A TAB. 2.24 resume esse estágio.

TABELA 2.24 – Definição de estudos subsequentes

IGI	CLASSIFICAÇÃO	ESTUDOS SUBSEQUENTES
< 175	Impacto baixo	Nenhum
175 a 750	Impacto médio	Etapa 3 – Avaliação FMECA (LCI)
> 750	Impacto alto	Etapa 3, com uso de modelos numéricos de propagação da onda de cheia para avaliação das consequências e consideração de rupturas parciais

Fonte: Adaptado de PIMENTA, 2009, p. 364.

Importante observar que, no caso de um impacto baixo, a componente do risco associada à obra nem chega a ser avaliada, demonstrando no método a importância que é dada ao aspecto relativo à consequência.

O estágio final, condicionado à etapa precedente, refere-se à aplicação propriamente dita dos diagramas LCI. Baseado em registros históricos e análise de um banco de dados de incidentes em barragens do Reino Unido, Hughes *et al.* (2000) identificaram tendências e desenvolveram diversos diagramas LCI, estratificados por três critérios: tipo, altura e idade da barragem. Barragens de um mesmo tipo possuem diagramas similares, mas as orientações para a pontuação são diferentes de acordo com os critérios de altura e idade. Assim, para determinada barragem em avaliação, apenas um diagrama é utilizado.

Com a divulgação e disseminação do método, outros diagramas também foram desenvolvidos para aplicações específicas. Espósito *et al.* (2011) e Espósito e Palmier (2013) apresentam, de forma

pioneira, o diagrama LCI modificado, próprio para utilização em barragens de contenção de rejeitos, não contempladas no método original.

Quanto à estrutura dos diagramas, eles consideram os componentes da barragem e como pode ocorrer uma possível falha da barragem. As falhas descritas por diferentes causas e indicadores também são consideradas. Conforme observado por Pimenta (2009), a aplicação dos diagramas LCI valoriza bastante a detecção visual de indícios e evidências de comportamentos anômalos que possam conduzir à ruptura da barragem, privilegiando, portanto, os resultados das inspeções visuais. Um exemplo de diagrama LCI, para barragens de terra com altura maior do que 30 m e conclusão depois de 1960, é ilustrado na FIG. 2.18.

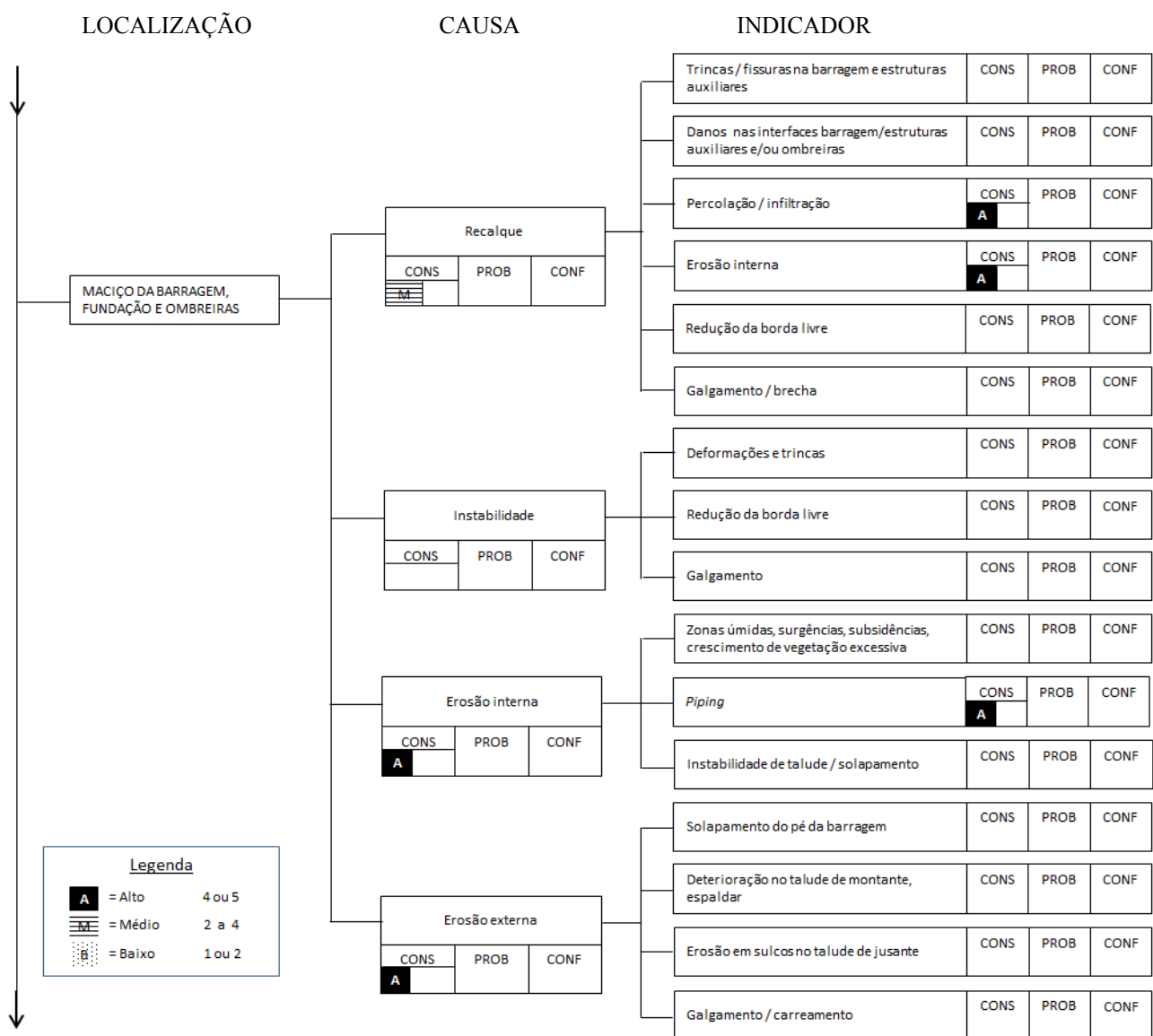


FIGURA 2.18 – Parte de diagrama LCI

Fonte: Adaptado de HUGHES *et al.*, 2000, p. 164.

Como verificado na FIG. 2.18, os indicadores são pontuados sob três atributos, em uma escala de um a cinco:

- Consequência (ou efeito): relacionado a quão diretamente a falha do elemento está relacionada à completa (ou parcial) falha da barragem (1 para baixo, 5 para elevado). Diretrizes de pontuação em alto (4 ou 5), médio (2 a 4) e baixo (1 e 2), baseados na análise de dados históricos de acidentes em barragens, são fornecidas sempre que possível nos diagramas LCI.
- Probabilidade: relacionado à probabilidade de falha do elemento (1 para baixa, 5 para elevada);
- Grau de confiança: relacionado à confiança nas estimativas da consequência e probabilidade (5 para baixo ou duvidoso, 1 para elevado ou detalhado). Reflete as incertezas no conhecimento da barragem.

Por fim, concluída a classificação dos atributos, podem ser calculados quatro índices para cada conjunto localização/causa/indicador, segundo as EQ. 2.37, 2.38, 2.39 e 2.40:

$$Ind_{ord} = Cons \times Prob \quad (2.37)$$

Em que:

$Ind_{ord}$  = índice de ordenação;

Cons = consequência;

Prob = probabilidade.

$$Ind_{conf} = Conf \quad (2.38)$$

Em que:

$Ind_{conf}$  = índice de confiança;

Conf = grau de confiança.

$$Ind_{crit} = Cons \times Prob \times Conf \quad (2.39)$$

Em que:

$Ind_{crit}$  = índice de criticalidade;

Cons = consequência;

Prob = probabilidade;

Conf = grau de confiança.

$$Ind_{risco} = Ind_{crit} \times IGI \quad (2.40)$$

Em que:

$Ind_{risco}$  = índice de risco;

$Ind_{crit}$  = índice de criticalidade;

IGI = índice global de risco.

Após a revisão das classificações, deve ser estabelecida a hierarquização dos elementos, primeiramente com base no índice de criticalidade. A partir de então, os índices complementares,  $Ind_{conf}$  e  $Ind_{ord}$ , são úteis para priorizar os elementos com necessidade de investigação ou manutenção/reabilitação, respectivamente. O índice de risco, evidentemente, representa o risco imposto pelos elementos no vale a jusante da barragem, sendo útil para uma análise comparativa entre diferentes barragens.

A propósito da apreciação de risco, há carência de valores de referência que permitam uma avaliação global dos resultados. Embora o método venha sendo sabidamente aplicado nas barragens do Reino Unido, Hughes *et al.* (2000) apresentam somente seis estudos de caso, visando auxiliar no desenvolvimento e calibração da metodologia.

#### 2.6.10 Análise dos modos de falha e seus efeitos - FMEA

A análise dos modos de falha e seus efeitos, conhecida como 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 (PETRONILHO, 2010). Quando a análise de criticalidade é também considerada, o método, uma extensão do FMEA, é usualmente denominado FMECA (Análise dos modos de falha, efeitos e criticalidade). Nesta dissertação a metodologia FMEA/FMECA será referida simplesmente como FMEA. Há algumas décadas o FMEA tem sido uma ferramenta reconhecidamente empregada em diversas indústrias, como a nuclear, aeroespacial, química, petrolífera, automobilística e, mais recentemente, na engenharia de barragens.

A metodologia FMEA é um método usualmente qualitativo (pode ser também semiquantitativo e quantitativo por meio do FMECA) e indutivo, que envolve o estudo dos modos de falhas - dos sistema, subsistemas e componentes - e os efeitos. Segundo Caldeira (2008), 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.

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).

A causa do modo de falha também é um aspecto importante no método, representando o motivo que levou o modo de falha a ocorrer. Sakurada (2001) discute sobre os conflitos que podem ocorrer na definição do modo de falha e causa do modo de falha, destacando que o mais importante é que a falha seja considerada na análise, para que então sejam tomadas as medidas necessárias para sua eliminação.

Com relação à implementação do método, existe uma grande variedade de leiautes 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.

A FIG.2.19 exemplifica um formulário para aplicação, contendo os itens mencionados.

Identificação da Obra: PDE Canga														
Fase da Obra: Concluída														
Objetivo da Análise: Análise de Desempenho														
Identificação e designação da componente	Modos Potenciais de Falha	Causas Potenciais de Falha	Ocorrência (O)	Efeitos Potenciais de Falha	Severidade (S)	Métodos de Detecção	Detecção (D)	RPN	Ação Recomendada	Responsável pela Execução	Resultados da Ação			
											O	S	D	RPN
II.1	Posição elevada do INA no maciço	Obstrução da saída da drenagem interna	4	Surgências nos taludes; Saturação do pé da pilha.	3	Inspeção Visual	1	12	Desobstrução da saída da drenagem interna; Continuidade da leitura dos MNAs.	x				
II.2	Erosões superficiais	Comprometimento da cobertura vegetal	3	Movimentos de massa localizadas; Assoreamento das áreas a jusante.	3	Inspeção Visual	1	9	Reconstituição da área afetada através de aterro controlado.	x				
	Abatimentos	Geometria inadequada	4	Movimentos de massa localizados.	3	Inspeção visual	2	24	Retaludamento	x				
II.3	Abatimentos	Geometria inadequada	4	Acúmulo de água acompanhado da saturação local; Erosão.	4	Inspeção Visual	1	16	Reaterro compactado no local	x				
III.1	Comprometimento do fluxo contínuo	Danos físicos	2	Percolação do maciço; Saturação das bermas.	4	Inspeção Visual	1	8	Adequação dos dispositivos de drenagem	x				
III.2	Comprometimento do fluxo contínuo	Obstrução da saída da drenagem interna	4	Elevação do nível de água; Saturação do pé da pilha.	4	Inspeção visual	4	64	Desobstrução da saída de drenagem interna; Continuidade da leitura dos INAs.	x				

FIGURA 2.19 – Planilha FMEA/FMECA

Fonte: PETRONILHO, 2010, p. 120.

De acordo com Sakurada (2001), todos os autores relacionam a severidade (S) aos efeitos dos modos de falha. Contudo, a ocorrência (O) e a detecção (D), dependendo do autor, são relacionadas ao modo de falha ou à causa. Palady (1997 citado por SAKURADA, 2001) sustenta que, independente da abordagem, os resultados obtidos são os mesmos.

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 TAB. 2.25, um modelo de tabela para classificação dos índices de severidade, ocorrência e detecção, aplicada no setor de mineração.



TABELA 2.25 – Classificação dos índices de severidade, ocorrência e detecção

ÍNDICE DE SEVERIDADE (S)		ÍNDICE DE OCORRÊNCIA (O)		ÍNDICE DE DETECÇÃO (D)	
S <sub>i</sub>	Efeito	O <sub>i</sub>	Probabilidade	D <sub>i</sub>	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: Adaptado de ESPÓSITO e PALMIER, 2013, p. 108.

A severidade, geralmente, também pode ser graduada e avaliada levando-se em consideração diferentes aspectos, como os efeitos em pessoas, meio ambiente, saúde e segurança, entre outros. A TAB 2.26 ilustra uma composição para definição da severidade.

TABELA 2.26 – Severidade (S) avaliada sob 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: Adaptado de HARTFORD E BAECHER, 2004, p. 41.

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, ilustrada na FIG. 2.20. 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.

		OCORRÊNCIA					
		IMPROVÁVEL (1)	REMOTO (2,3)	OCASIONAL (4,5)	ALTO (6,7)	ESPERADO (8,9)	PROVÁVEL (10)
S E V E R I D A D E	TRÁGICO (10)						
	CRÍTICO (9)		II. 1.2		II. 1.1 II. 2.1		
	MUITO SEVERO (7,8)				II. 2.3 II. 2.5		
	SEVERO (5,6)			II. 2.4			
	MÉDIO (3,4)						
	BAIXO (1,2)						

FIGURA 2.20 – Matriz de risco FMEA

Fonte: PORTES, 2013, p.83.

A representação gráfica do risco tem como vantagem a visualização dos modos de falha, com base nas componentes do risco: probabilidade e consequência. Dessa forma é possível distinguir um modo de falha de ocorrência improvável, mas consequência elevada, de outro com alta ocorrência e baixa consequência. A priorização pelo NPR não permite essa distinção, mas, por outro lado, leva em consideração o fator relativo à facilidade de detecção. A inclusão do índice de detecção é importante, tendo em vista que alguns mecanismos de falha podem não demonstrar manifestações evidentes. Dependendo do caso, um mecanismo de alto risco pode não ser notado, mesmo com uma inspeção visual rigorosa.

O FMEA, por ser um registro, tende a evitar que problemas passados ocorram novamente. As ações (controles) realizadas, fruto da análise do método, devem ser reavaliadas e documentadas. Importante ressaltar que o registro deve ser um documento dinâmico, sempre passando por atualizações (SAKURADA, 2001). No caso de barragens, o FMEA pode ser aplicado nas várias fases de vida da estrutura, seja no projeto, construção ou operação. Espósito e Palmier (2013) apontam que, pelo fato das metodologias de análise de risco terem aplicação recente em barragens,

existe uma falta de valores de referência para subsidiar a análise geral da situação de risco. No caso do FMEA, isso se torna mais evidente quando se nota que as escalas de classificação não são uniformizadas pelo método. Apesar da aparente falta de padronização, os princípios básicos do FMEA são comuns a vários padrões nacionais e internacionais, sendo um método altamente reconhecido e aceito no campo de análise de risco.

#### 2.6.11 Análise por árvore de eventos - ETA

A Análise de árvore de eventos, ou simplesmente ETA (*Event Tree Analysis*), é um método lógico, indutivo e que pode ser tratado sob todas as formas de análise (qualitativa, semiquantitativa ou quantitativa), embora usualmente esteja associada à natureza quantitativa.

Seu componente essencial, como já explícito no próprio nome, é a árvore de eventos. Segundo Hartford e Baecher (2004), a origem do método não é conhecida, mas sua aplicação em sistemas tecnológicos tornou-se comum a partir da década de 70 do século passado. Provavelmente é a abordagem mais utilizada atualmente para análise de risco formal em barragens, sendo que sua primeira aplicação se deu por Whitman (1984 citado por HARTORD e BAECHER, 2004).

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 e coletivamente exaustivos. Salmon e Hartford (1995 citado por KREUZER, 2000) assinalam que a credibilidade de uma árvore de eventos depende muito das razões dadas para escolha dos valores numéricos.

Um exemplo dos conceitos essenciais empregados na árvore de eventos é ilustrado esquematicamente na FIG. 2.21, enquanto na FIG. 2.22 é representado um extrato simplificado de uma aplicação prática.

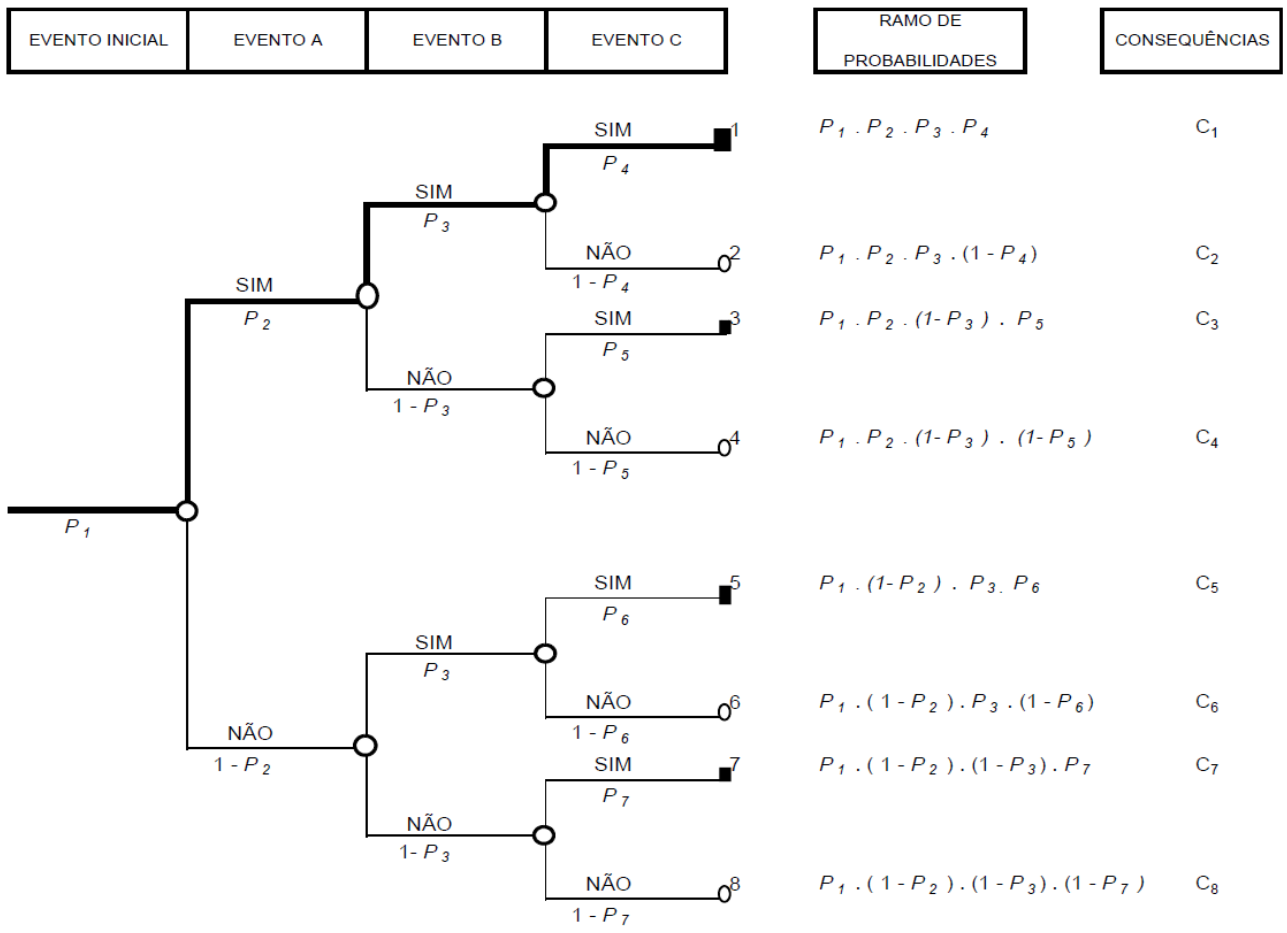


FIGURA 2.21 – Características essenciais de uma árvore de eventos utilizada em barragens

Fonte: LADEIRA, 2007, p. 68 - adaptado de HARTFORD E BAECHER, 2004, p. 48.

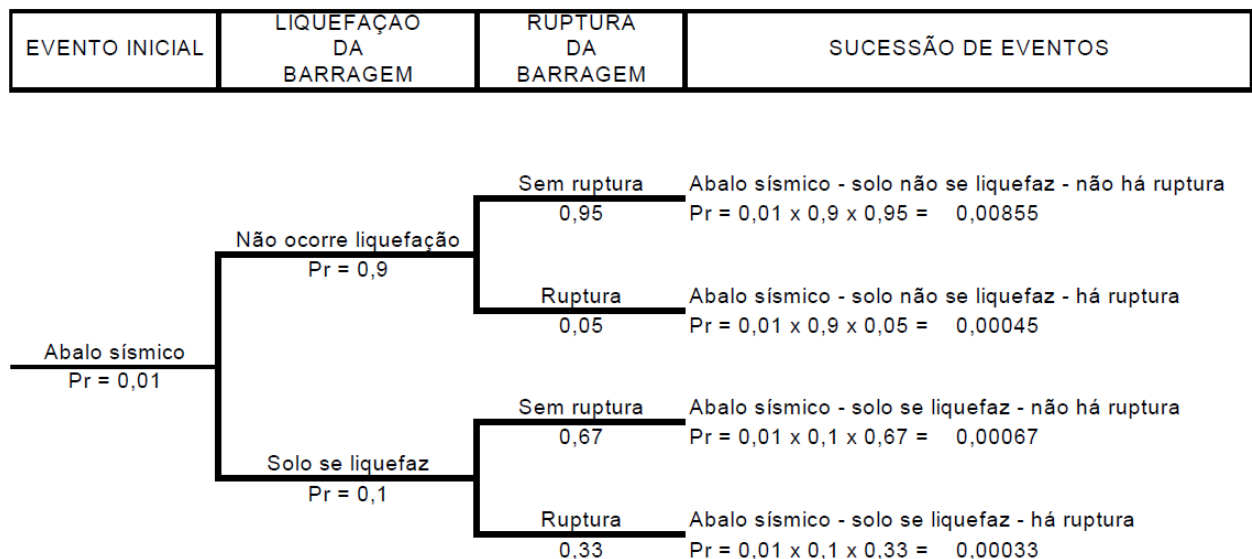


FIGURA 2.22 – Exemplo de árvore de eventos para o perigo de abalo sísmico

Fonte: LADEIRA, 2007, p. 72 - adaptado de HARTFORD E BAECHER, 2004, p. 216.

Os eventos podem ser decompostos em árvores lógicas (com as variáveis dos estados pré-existent e incertezas) e em árvores de evento, representando o modelo de resposta de um sistema físico (PIMENTA, 2009). A árvore lógica condiciona a árvore de evento, ou seja, a última se inicia a partir de um ramo extremo da primeira árvore, passando então a descrever as respostas do sistema para o evento iniciador considerado. Para uma percepção global do risco do sistema é necessário considerar todos os modos de falha e eventos iniciadores (CALDEIRA, 2008). Complementando a análise, também poderia ser desenvolvida uma árvore de consequências, geralmente tratada de forma independente da árvore de eventos (LADEIRA, 2007). A FIG. 2.23 ilustra a relação entre as árvores.

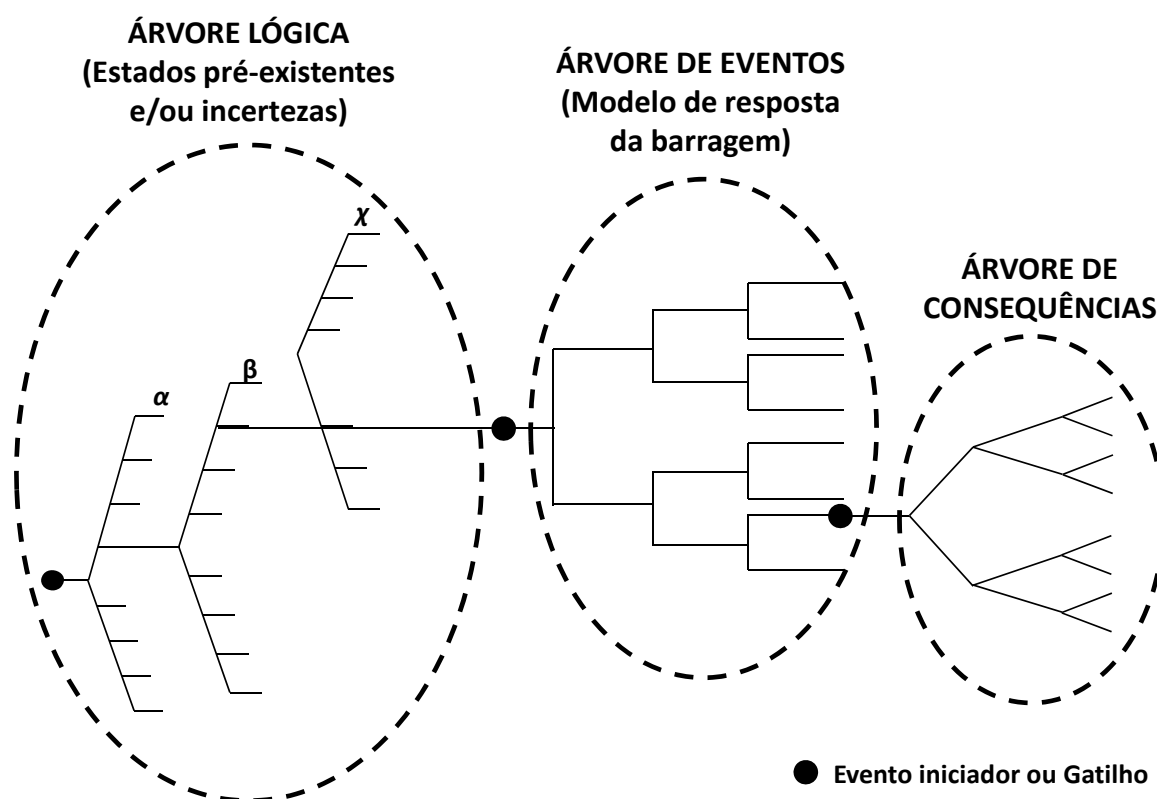


FIGURA 2.23 – Exemplo de desencadeamento das árvores (lógica, eventos e consequência)

Fonte: Adaptado de HARTFORD E BAECHER, 2004, p. 213.

Outra ferramenta fundamental para subsidiar a construção das árvores de eventos são os diagramas de influência. São representações gráficas que ilustram as relações entre os eventos iniciadores (perigos), os estados da natureza, as componentes, as condições do sistema e os respectivos efeitos ou consequências, tendo em conta as incertezas. A FIG. 2.24 exemplifica um diagrama de influência.

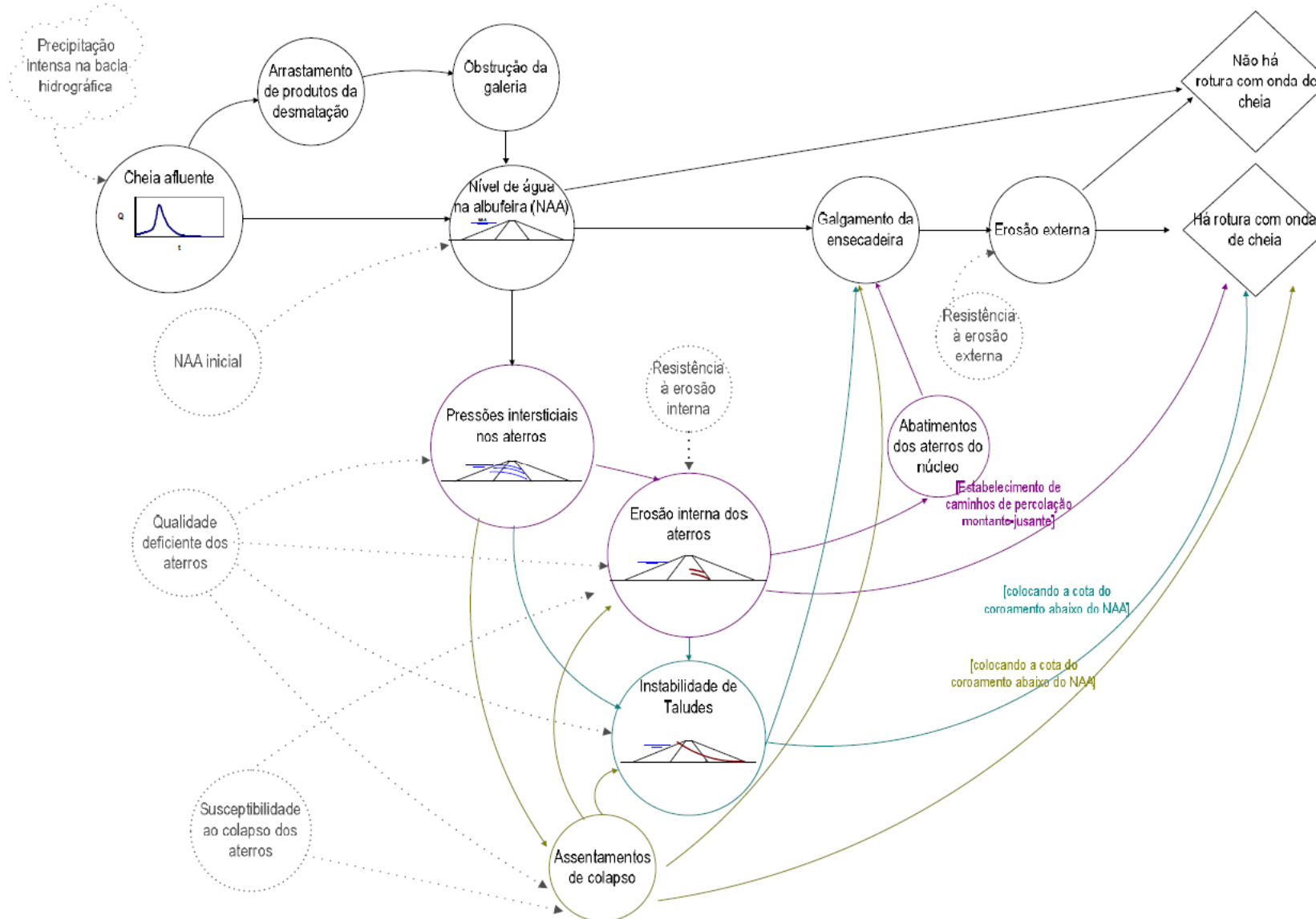


FIGURA 2.24 – Exemplo de diagrama de influência

Fonte: PIMENTA, 2009, p. 459.

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 anteriormente apresentados também estão sujeitos, e se não mais, à falta de uma base teórica rigorosa. Conforme destacado por Caldeira (2008) e Pimenta (2009), a construção da árvore por si só constitui-se uma importante ferramenta de conhecimento estruturado para inferência do desempenho de um sistema.

### 2.6.12 Análise por árvore de falhas - FTA

O método de análise por árvore de falhas, ou FTA, foi desenvolvido em 1961 por H.A. Watson, dos Laboratórios *Bell Telephone* e expandido para várias áreas de conhecimento a partir da década de 70 (HARTFORD e BAECHER, 2004). O FTA é um método dedutivo, pois, diferentemente da ETA, parte do evento final (evento de topo) para os eventos iniciadores. Assim, a partir da consideração de determinada falha, busca-se identificar todos os eventos que possam materializar sua ocorrência. Por esse motivo, é um método muito utilizado para análise pós-acidente. Pode ser utilizado em análises qualitativas, semiquantitativas ou quantitativas.

O método também é representado graficamente, FIG. 2.25, e tem como estrutura básica o desdobramento dos eventos em níveis hierárquicos, sendo que o primeiro se relaciona com o evento de topo. Vários níveis podem ser representados, dependendo da complexidade do sistema. Dois grupos de símbolos são utilizados para caracterizar a relação entre os elementos: as portas lógicas (“e” e “ou”) e os eventos. Todos os símbolos são padronizados, sendo usualmente representados por retângulos, círculos, losangos e triângulos (SAKURADA, 2001). No domínio das barragens, a FIG. 2.26 mostra um raro exemplo de aplicação do método, cujo evento de topo é o galgamento.

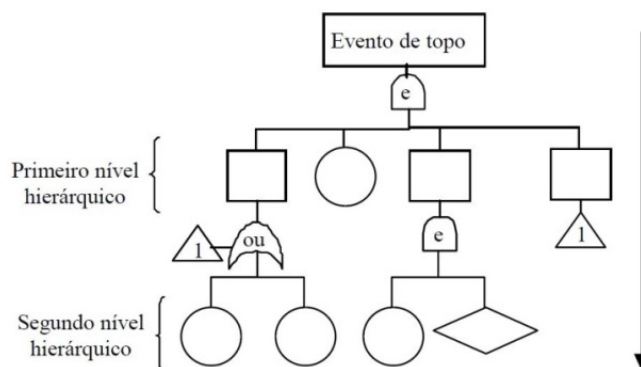


FIGURA 2.25 – Representação esquemática da FTA

Fonte: SAKURADA, 2001, p. 39.

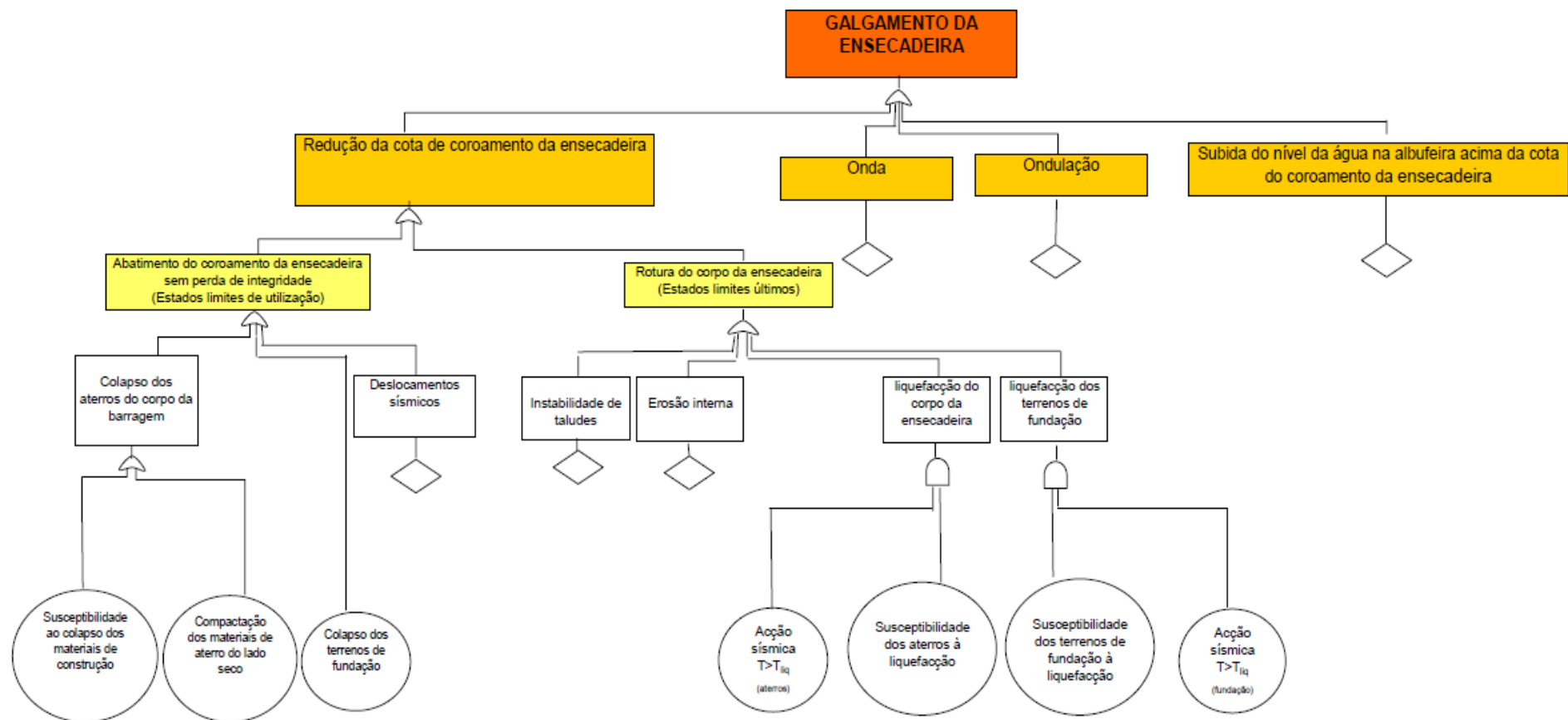


FIGURA 2.26 – Exemplo de aplicação de uma árvore de falha

Fonte: CNPGB, 2005, p. III. 12.



Em outras áreas, o método constitui-se em uma técnica bem desenvolvida e reconhecida para a avaliação da confiabilidade de sistemas. Relacionando-se a barragens, Caldeira (2008) aponta que esse tipo de método é particularmente adequado para a representação de sistemas eletromecânicos, como comportas de extravasores.

A análise das sucessões de eventos que conduzem à falha e da importância relativa dos vários eventos já é um grande benefício do método, porém, como as barragens são sistemas altamente complexos, o método FTA pode se tornar bastante extenso, dificultando sua aplicação. O ideal é aplicá-lo em eventos de topo considerados críticos para a segurança da barragem. Desse modo, os métodos indutivos, previamente aplicados, podem auxiliar na tarefa de identificação dos eventos de topo.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Geral**

Esta dissertação objetiva gerar conhecimentos (procedimentos/metodologia de análise de risco em barragens) para aplicação prática dirigida à solução de problema específico (avaliação do risco de barragem) no âmbito da gestão de risco e segurança de barragens. Também é caracterizada como um estudo de caso, uma vez que a aplicação se concentra em um grupo de barragens da empresa Cemig Geração e Transmissão. A metodologia proposta no estudo é apresentada nas etapas descritas nos itens a seguir.

### **3.2 Seleção do grupo de barragens**

Os critérios julgados como representativos para a definição da amostra de barragens neste estudo são:

#### **3.2.1 Área de concentração: foco em estruturas geotécnicas**

A compreensão do desempenho de uma barragem com estruturas mistas (concreto e terra) é complexa e se estende a diversas áreas de conhecimento. Considerando que a área de concentração do programa do curso é geotecnia, a seleção de barragens inclui somente aquelas cujo barramento é predominantemente do tipo barragem de terra ou barragem de terra-enrocamento. Dessa forma tende-se a tratar mais os aspectos geotécnicos ou de fronteira com outras áreas científicas.

Outra motivação para esse critério é que esses tipos de estruturas têm considerável importância na população total de barragens, pois, segundo ICOLD (2008b), as barragens de aterro (inclui terra e enrocamento) representam 75% do total mundial.

#### **3.2.2 Função da barragem: hidreletricidade**

Existem barragens para diversos propósitos, como irrigação, geração de energia, abastecimento de água, controle de cheias, regularização de vazões, contenção de rejeitos, etc. Como seus critérios de

projeto, operação, desempenho e componentes geralmente diferem, a seleção se restringe às barragens cujo propósito é a geração de energia. Aproximadamente 25% do total de grandes barragens têm como função a hidreletricidade (ICOLD, 2008a).

### 3.2.3 Porte da barragem: grandes barragens

De acordo com ICOLD (2008a), para uma barragem ser considerada grande e ser incluída no Registro Mundial de Barragens, deve ter altura de 15 metros ou 10 a 15 metros e armazenar mais de 3 milhões de metros cúbicos de água em seu reservatório. Esse critério, portanto, destaca na seleção estruturas consideradas representativas para a principal associação técnica-científica no campo da engenharia de barragens.

Os métodos formais de análise de risco, diante do recurso de tempo exigido, poderiam não se mostrar vantajosos para aplicação em pequenas barragens, onde as próprias atividades de monitoramento e inspeção, exigência legal com a Lei 12.334, são suficientes para manter um nível adequado de gestão da segurança. Outro fator facilitador é a uniformidade em relação ao aspecto da consequência, questão tratada em menor profundidade e em um contexto global, por se afastar do caráter geotécnico do presente trabalho.

### 3.2.4 Idade: concepção à luz da moderna mecânica dos solos e engenharia de barragens

Embora esse critério nunca seja fator impeditivo para a implementação de análise de risco em barragens, tem como propósito garantir o pleno conhecimento em relação aos critérios de projeto utilizados (de certo modo relaciona-se também com a disponibilidade de relatórios técnicos e projetos), fator fundamental para entendimento pormenorizado do desempenho da barragem e consequente aplicação dos métodos de análise de risco. Cruz (1996) assinala que é possível associar o que tem sido chamado de Moderna Mecânica dos Solos apenas aos projetos e construções mais recentes de barragens, significando uma referência aos últimos 50 ou 60 anos. Nesses projetos, portanto, já estão embutidas as evoluções científicas e técnicas introduzidas nas barragens de terra e enrocamento.

As estatísticas de ruptura mostradas por ICOLD (1995) e Foster *et al.* (1998) também corroboram com essa premissa, haja vista uma evidente mudança na segurança das barragens (diminuição de rupturas) quando são comparadas as estruturas construídas anteriormente e posteriormente a 1950.

### **3.3 Coleta de dados**

Para uma adequada aplicação dos métodos de análise de risco é fundamental conhecer em profundidade todos os dados relativos ao projeto, construção e operação das barragens a serem estudadas. Destaca-se que a natureza complexa das análises de risco exige a obtenção de bastante informação.

Dentre os dados básicos considerados necessários para essa etapa, incluem-se: altura, comprimento, tipo de material da barragem, tipo de fundação, tipo de vertedouro, vazão de projeto, período de retorno da vazão de projeto, ano de construção, volume do reservatório, capacidade instalada, existência de instalações e população a jusante, condições de conservação e manutenção (ex: presença de deteriorações como surgências, vazamentos, recalques, deterioração de taludes, erosão) e dados de instrumentação.

Durante a aplicação dos métodos a barragens individuais, ainda podem ser necessárias informações mais detalhadas de projeto e construção, como condicionantes geológico-geotécnicas, controle tecnológico dos materiais, métodos construtivos, tratamento de fundação, ensaios de granulometria, entre outros.

Quanto aos instrumentos utilizados na coleta de dados, o estudo se apoia nas seguintes fontes, a saber:

- Pesquisa documental: Análise de projetos e relatórios técnicos das barragens, disponíveis no acervo da Cemig;
- Análise do banco de dados de deteriorações das barragens, disponível em sistema informatizado interno da Cemig;
- Inspeções de campo nas barragens: relatórios e resultados.

### **3.4 Aplicação de métodos de análise de risco**

As aplicações dos métodos nas barragens de terra e enrocamento dar-se-ão em duas etapas: preliminarmente no portfólio de barragens e, em seguida, em análises individuais.

### 3.4.1 Aplicação de métodos de análise preliminar de risco em portfólio de barragens

Com o intuito de classificar o grupo de barragens com base no risco, nessa etapa prevê-se a aplicação dos métodos abordados na revisão bibliográfica da dissertação:

- Índice global de risco;
- Índice global de risco modificado;
- Índice de Lafitte;
- Sistema de classificação de barragens Sabesp;
- Metodologia de classificação de barragens da Cemig;
- Potencial de risco;
- Matrizes de análise da Lei 12.334.

Os métodos mencionados estão referenciados, respectivamente, nos itens 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3, 2.6.4, 2.6.5, 2.6.6 e 2.6.7.

### 3.4.2 Aplicação de métodos de análise de risco em barragens individuais

Identificadas as barragens de maior risco na etapa preliminar dos métodos de análise de risco em portfólio, procede-se à aplicação de métodos formais de análise de risco a barragens individuais (em duas barragens de risco elevado).

Considerando a dificuldade na caracterização analítica das incertezas associadas (nos processos de modos de falha e consequências), e o desejo de se realizar uma total análise de risco para os subsistemas barragens de terra e enrocamento (e fundações), foram selecionados os dois métodos abaixo, ambos de caráter qualitativo (ou semiquantitativo):

- LCI - Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas;
- FMEA - Análise dos modos de falha e seus efeitos.

Os métodos LCI e FMEA estão referenciados, respectivamente nos itens 2.6.9 e 2.6.10.

Tendo em vista os itens descritos, a FIG. 3.1 ilustra o esquema geral adotado na metodologia do estudo:

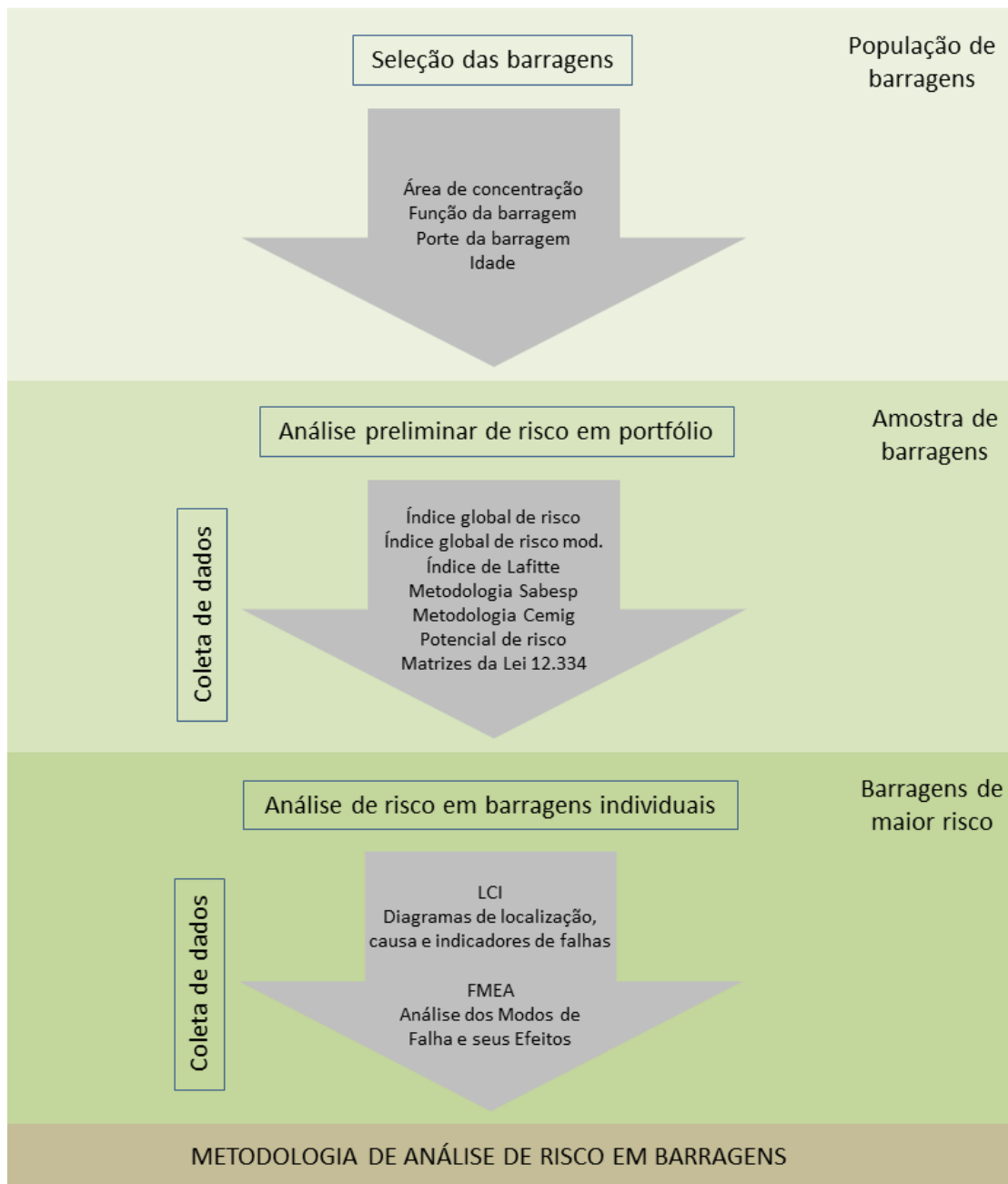


FIGURA 3.1 – Esquema geral da metodologia

## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 Parque gerador da Cemig Geração e Transmissão

A Cemig GT ocupa posição de destaque entre as maiores geradoras do país, sendo a terceira em capacidade instalada. Com relação a números de barramentos cadastrados para fins de geração de energia, o Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2013) enfatiza que a Cemig é a maior empreendedora de barragens no Brasil.

Excluindo as usinas em que a Cemig GT tem participação societária, sejam subsidiárias integrais ou consórcios, a empresa conta com um total de 39 usinas (40 barragens), listadas na TAB. 4.1 e apresentadas no mapa da FIG. 4.1. Como várias concessões estão por expirar, é importante salientar que a análise das barragens no presente estudo tem como referência a data de abril de 2013.

TABELA 4.1 – Usinas da Cemig GT

USINAS	POTÊNCIA INSTALADA (MW)	USINAS	POTÊNCIA INSTALADA (MW)
Anil	2,08	Pandeiros	4,2
Bom Jesus do Galho	0,36	Paraúna	4,48
Cajuru	7,20	Peti	9,4
Camargos	46	Piau	18,01
Dona Rita	2,40	Pissarrão	0,8
Emborcação	1.192	Poço Fundo	9,16
Gafanhoto	14	Poquim	1,41
Igarapé	131	Rio de Pedras	9,28
Irapé	360	Salto Grande (2 barragens)	102
Itutinga	52	Salto Morais	2,4
Jacutinga	0,72	Santa Luzia	0,9
Jaguara	424	Santa Marta	1,0
Joasal	8,4	São Bernardo	6,82
Lages	0,68	São Simão	1.710
Luiz Dias	1,62	Sumidouro	2,12
Marmelos	4	Três Marias	396
Martins	7,7	Tronqueiras	8,5
Miranda	408	Volta Grande	380
Nova Ponte	510	Xicão	1,81
Paciência	4,08	..	

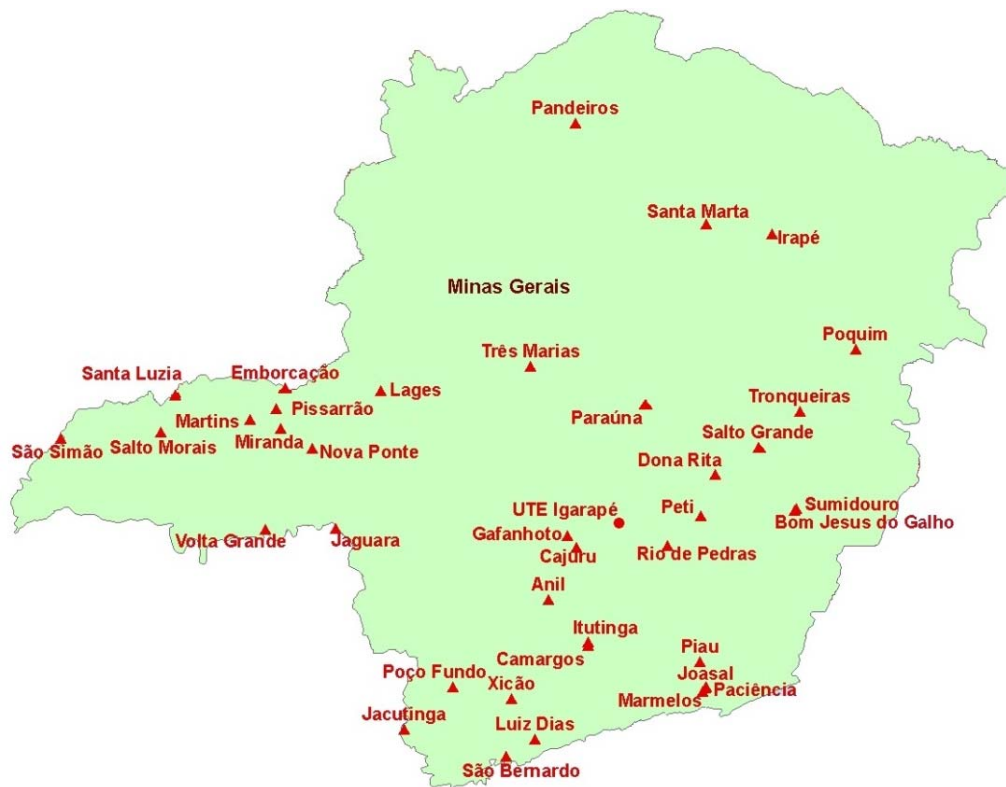


FIGURA 4.1 – Usinas da Cemig GT em Minas Gerais

Fonte: Arquivo Cemig

#### 4.2 Seleção da amostra de barragens

Com base no item 3.2 da metodologia, foram avaliadas as barragens apresentadas no universo da TAB. 4.1 e, pela análise dos critérios propostos, elas foram eliminadas sequencialmente.

- Área de concentração: foco em estruturas geotécnicas – não se enquadram as usinas com barramento composto predominantemente por barragens de concreto como Anil, Bom Jesus do Galho, Cajuru, Dona Rita, Jacutinga, Lages, Luiz Dias, Marmelos, Martins, Paciência, Pandeiros, Paraúna, Peti, Pissarrão, Poço Fundo, Poquim, Rio de Pedras, Salto Grande, Salto Morais, Santa Luzia, Santa Marta, São Bernardo, Sumidouro, Tronqueiras e Xicão. Também não se enquadra a barragem de Joasal (madeira);
- Função da barragem: hidreletricidade – não se enquadra a usina térmica de Igarapé;
- Porte da barragem: grandes barragens – não se enquadra a usina de Gafanhoto, com altura de 13,5m e reservatório de  $2,79 \times 10^6 \text{ m}^3$ ;



- Idade: concepção à luz da Moderna Mecânica dos solos e Engenharia de Barragens – não se enquadram as usinas de Camargos, Itutinga e Piau. São barragens antigas, inauguradas na década de 1950, com sistemas de drenagem não convencionais e disponibilidade escassa de documentos.

Tendo em vista os aspectos observados, foram selecionadas oito barragens do universo da Cemig GT para o presente estudo de caso, listadas na TAB. 4.2. O mapa da FIG. 4.2 mostra o filtro com as barragens escolhidas e suas respectivas bacias hidrográficas.

TABELA 4.2 – Características principais das barragens selecionadas no estudo de caso

USINAS HIDRELÉTRICAS	TIPO DE BARRAGEM	ALTURA MÁXIMA (m)	VOLUME DO RESERVATÓRIO (m <sup>3</sup> )	IDADE (anos)
Emborcação	terra-enrocamento	158	17.724,72 x 10 <sup>6</sup>	32 (1981)
Irapé	terra-enrocamento	210	5.963,92 x 10 <sup>6</sup>	8 (2005)
Jaguara	terra-enrocamento	40	470 x 10 <sup>6</sup>	43 (1970)
Miranda	terra e terra-enrocamento	85	1.120 x 10 <sup>6</sup>	16 (1997)
Nova Ponte	terra-enrocamento	142	12.792 x 10 <sup>6</sup>	20 (1993)
São Simão	terra e terra-enrocamento	127	12.540 x 10 <sup>6</sup>	35 (1978)
Três Marias	terra	70	19.528,20 x 10 <sup>6</sup>	52 (1961)
Volta Grande	terra	40	2.243 x 10 <sup>6</sup>	39 (1974)

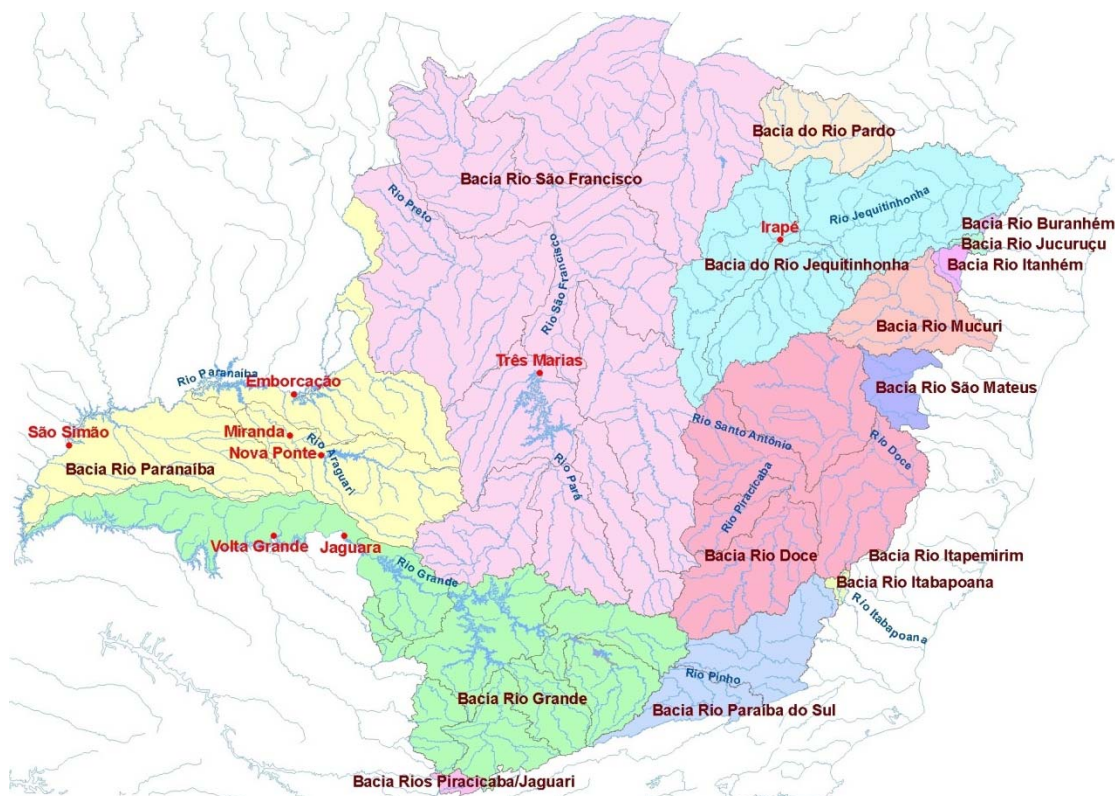


FIGURA 4.2 – Seleção de usinas e respectivas bacias hidrográficas

Fonte: Arquivo Cemig

### 4.3 Caracterização dos empreendimentos

Nos itens subsequentes são sintetizadas as descrições gerais de cada empreendimento, com destaque no projeto das barragens de terra e terra-enrocamento.

#### 4.3.1 UHE Emborcação

A Usina Hidrelétrica de Emborcação, cuja foto é mostrada na FIG. 4.3, localiza-se no curso superior do rio Paranaíba, na divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás. Emborcação é a segunda maior usina da Cemig em termos de potência instalada, com 1.192 MW.



FIGURA 4.3 – Usina Hidrelétrica de Emborcação

Fonte: Arquivo Cemig

Os primeiros estudos sobre o aproveitamento de Emborcação foram realizadas em 1964 por consultores do consórcio Canambra e equipe da Cemig, inserido nos estudos energéticos da região sudeste (CACHAPUZ, 2006; CBDB, 2000). O projeto Canambra, realizado entre 1962 e 1966, foi uma iniciativa pioneira no Brasil para levantamento dos recursos energéticos da região sudeste e, na época, considerada o maior trabalho em técnica e extensão realizado no mundo, tendo sido patrocinado pela Organização das Nações Unidas.

Os projetos básico e executivo foram realizados pela empresa projetista Tams Engenharia, posteriormente chamada de Leme Engenharia. As obras civis foram executadas pela Construtora Andrade Gutierrez, de 1977 a 1981. A construção da usina foi destaque pela utilização de

tecnologias avançadas para a época, como a concretagem a vácuo, aeração da calha do vertedouro e escavação mecanizada dos condutos forçados (CACHAPUZ, 2006).

O arranjo geral de Emborcação consiste de uma barragem de terra-enrocamento, uma das mais altas do Brasil (158m), fechando o vale principal com 1.600 m de comprimento. Na margem esquerda estão dispostos a tomada de água, condutos forçados, casa de força e vertedouro. Adicionalmente, existem dois pequenos diques, um na margem direita do reservatório e outro na margem oposta. O arranjo geral, com suas estruturas principais, é mostrado na FIG. 4.4.

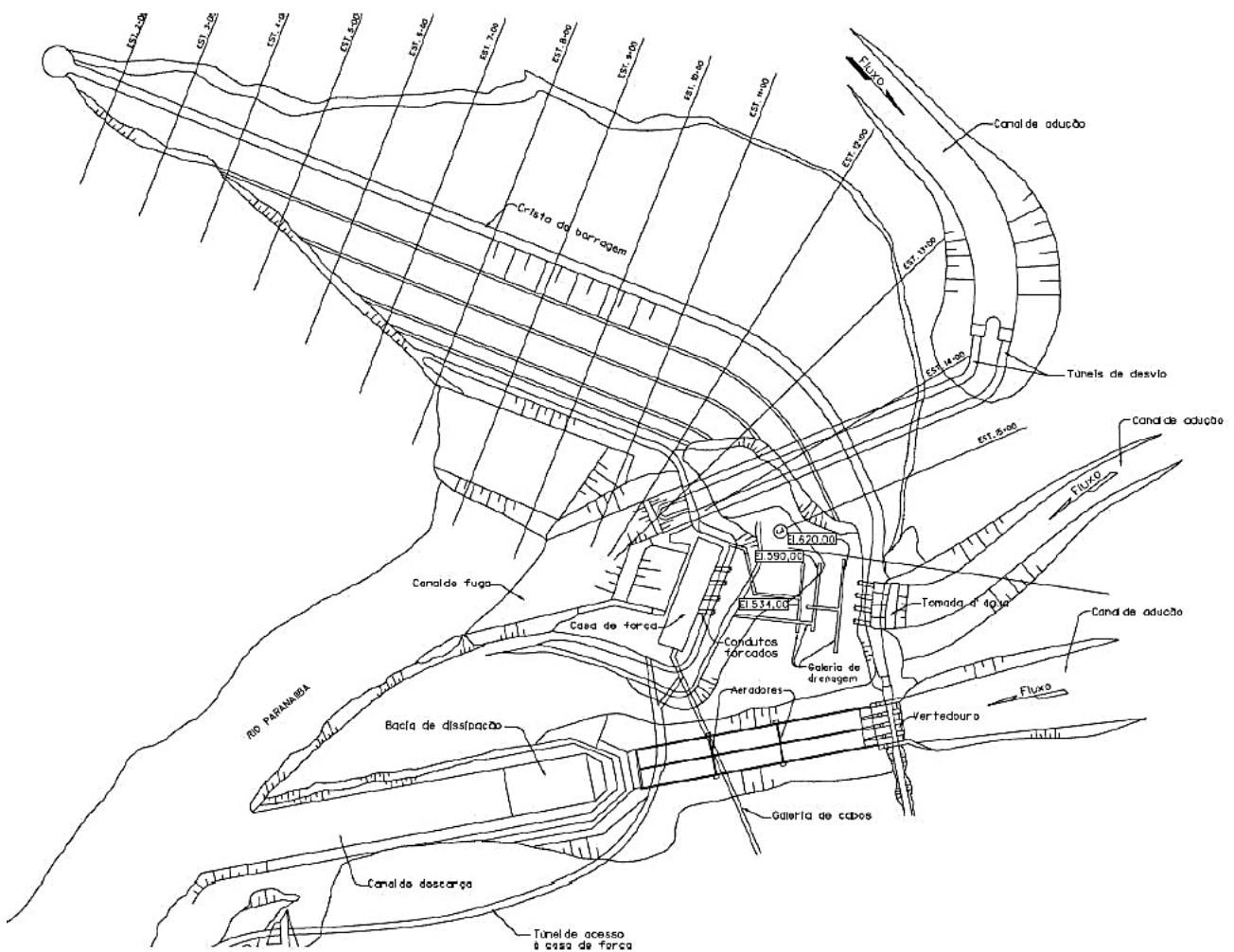


FIGURA 4.4 – Arranjo geral da UHE Emborcação

Fonte: DIVINO, 2010, p. 68.

A barragem de terra-enrocamento é constituída por um núcleo argiloso e esbelto, inclinado para montante e conectado a uma camada horizontal impermeável junto à fundação. De acordo com Carvalho (1998 citado por CEMIG, 2009a), o núcleo da barragem foi projetado de forma inclinada para diminuir a concentração de tensões no material adjacente, considerando os recalques diferenciais previstos entre o núcleo e o enrocamento, e também para facilitar o processo

construtivo durante o período chuvoso. A camada horizontal impermeável, incorporada ao núcleo, denominada tapete interno impermeável, foi compactada sobre a fundação, de forma a aumentar o caminho de percolação e colaborar na redução dos recalques diferenciais. A incorporação da camada horizontal na seção transversal da barragem foi, segundo Viotti (1997 citado por CEMIG, 2009a), uma importante contribuição ao projeto de barragens de terra-enrocamento.

A FIG. 4.5 mostra a seção transversal de maior altura e os diversos materiais que compõem o maciço da barragem. A fundação do barramento de Emborcação é constituída por rocha sã tratada em quase sua totalidade.

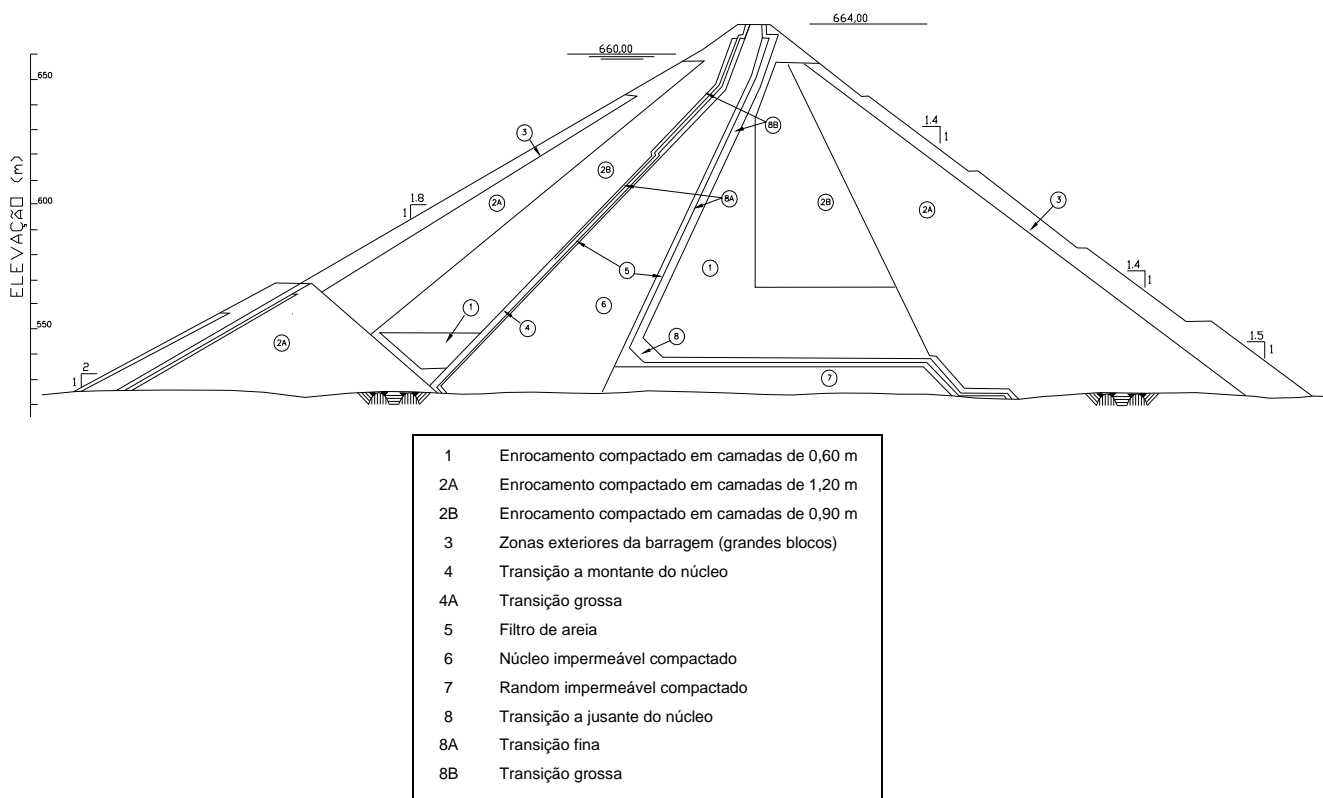


Figura 4.5 – Seção da barragem de Emborcação

Fonte: Arquivo Cemig

Referências sobre o comportamento geotécnico da barragem de terra-enrocamento de Emborcação podem ser encontradas nos trabalhos de Carvalho (1998) e Divino (2010).

#### 4.3.2 UHE Irapé

A usina hidrelétrica de Irapé (FIG. 4.6) está situada no rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. Seu aproveitamento sempre foi considerado um projeto relevante para o desenvolvimento da região do

Jequitinhonha, reconhecidamente uma das mais pobres do estado. A usina, a mais nova entre as selecionadas, entrou em operação no ano de 2005, sendo o último grande empreendimento construído de propriedade integral da Cemig GT.

Os primeiros estudos sobre a usina de Irapé, assim como ocorreu para a usina de Emborcação, foram realizados entre 1963 e 1965 por consultores do consórcio Canambra e técnicos da Cemig.

O projeto executivo foi de responsabilidade das empresas Intertechne Consultores e Leme Engenharia. As obras civis se iniciaram em 2002 por um consórcio liderado pela Construtora Andrade Gutierrez. Durante a fase de construção, a logística mostrou-se bastante complexa devido à localização da barragem, inserida em um vale bastante encaixado e de difícil acesso. Isso exigiu uma grande movimentação de rocha e solo (CACHAPUZ, 2006).



FIGURA 4.6 – Usina Hidrelétrica de Irapé

Fonte: Arquivo Cemig

O arranjo geral de Irapé compreende uma barragem de terra-enrocamento com 590 m de comprimento e 210 m de altura, sendo a barragem mais alta existente atualmente no Brasil. Na margem esquerda encontra-se a casa de força, condutos forçados e as estruturas de adução e de extravasão, com o vertedouro de calha subterrânea (três túneis escavados em rocha). A estrutura denominada extravasor é semelhante à do vertedouro, com a diferença de sua soleira estar situada em uma cota inferior.

A FIG. 4.7 ilustra o arranjo geral da usina de Irapé.

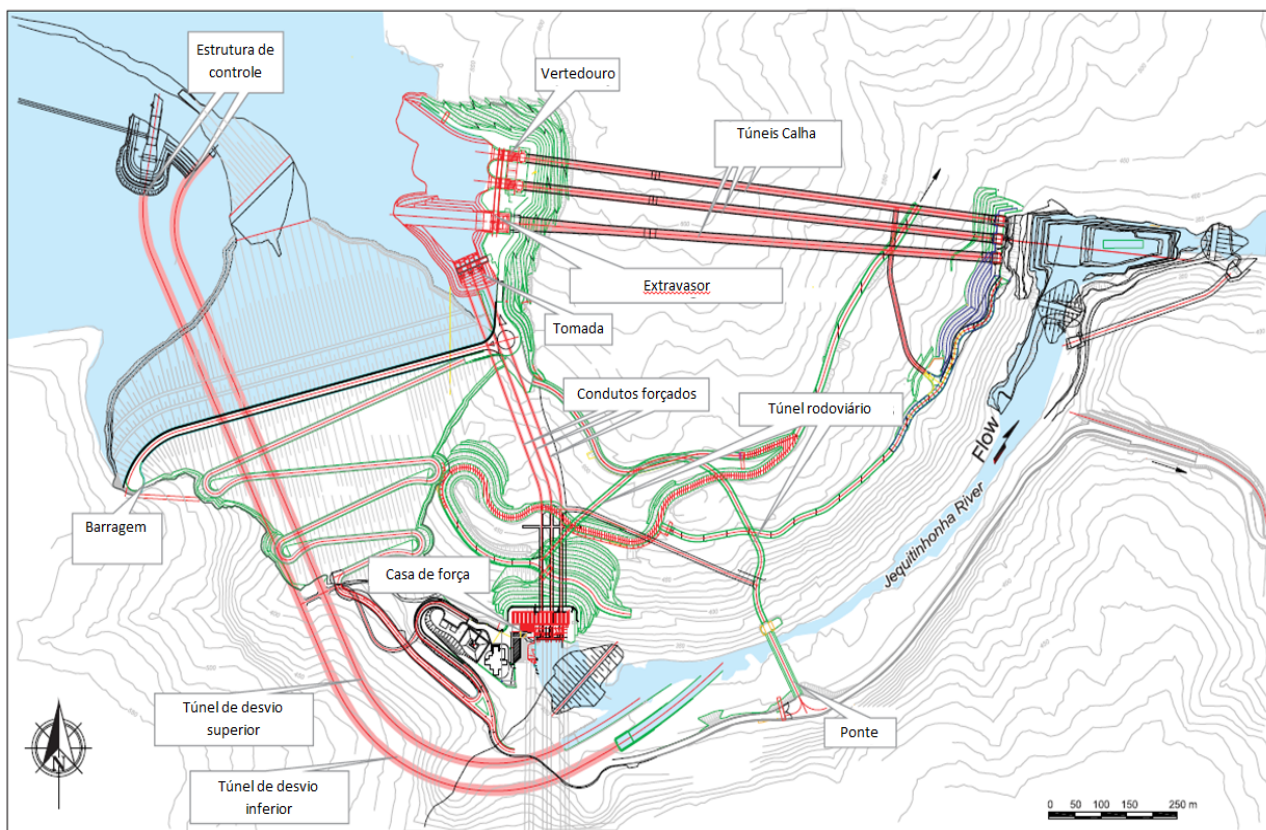


FIGURA 4.7 – Arranjo geral da UHE Irapé

Fonte: Arquivo Cemig

A FIG. 4.8 mostra a seção de maior altura da barragem de Irapé e os materiais constituintes. 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”. A fundação da barragem é constituída por uma rocha alterada com tratamento.

Os estudos desenvolvidos e informações sobre o desempenho geotécnico da barragem de Irapé estão disponíveis nos trabalhos de Aires (2006) e Calcina *et al.* (2007).

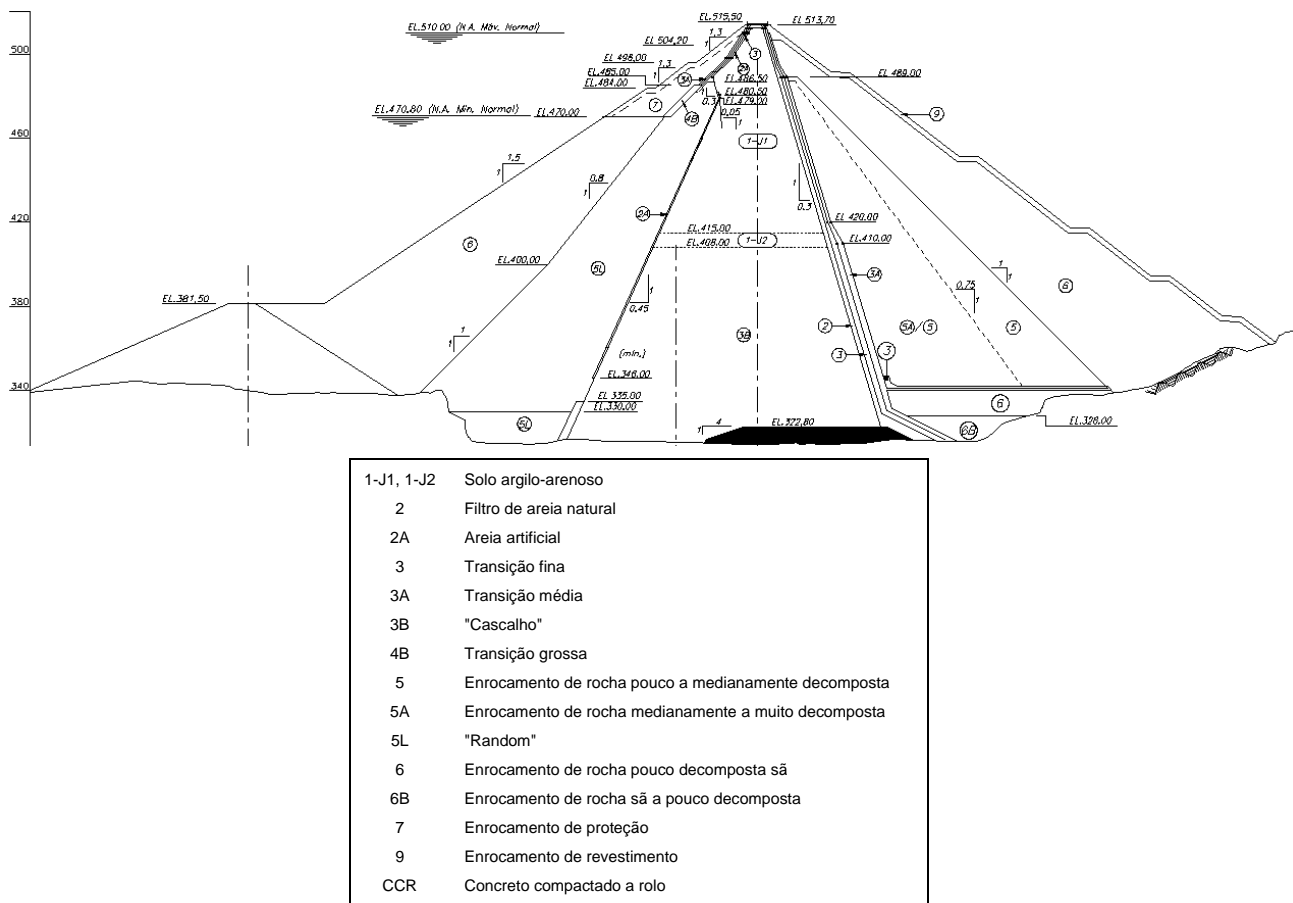


FIGURA 4.8 – Seção da barragem de Irapé

Fonte: Arquivo Cemig

### 4.3.3 UHE Jaguara

A usina hidrelétrica de Jaguara, FIG. 4.9, localiza-se no rio Grande, na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo. É a sétima usina da cascata de aproveitamentos hidrelétricos do rio Grande.



FIGURA 4.9 – Usina Hidrelétrica de Jaguara

Fonte: Arquivo Cemig

Sua construção teve início em julho de 1966, sendo concluída em 1970 pela Construtora Mendes Júnior. O projeto executivo da barragem de terra-enrocamento foi de responsabilidade da empresa Geotécnica. Com capacidade de 424 MW, Jaguará se tornou, na época, a maior usina do parque gerador da Cemig.

Seu arranjo geral, FIG. 4.10, é composto por uma barragem de enrocamento, com 325m de comprimento e altura máxima de 40m, junto a ombreira direita e um vertedouro na região do leito do rio. Na margem esquerda encontra-se a tomada de água, casa de força e uma barragem de gravidade. Existe ainda um dique com cerca de 500 m de extensão, fechando uma pequena depressão na margem direita do reservatório.

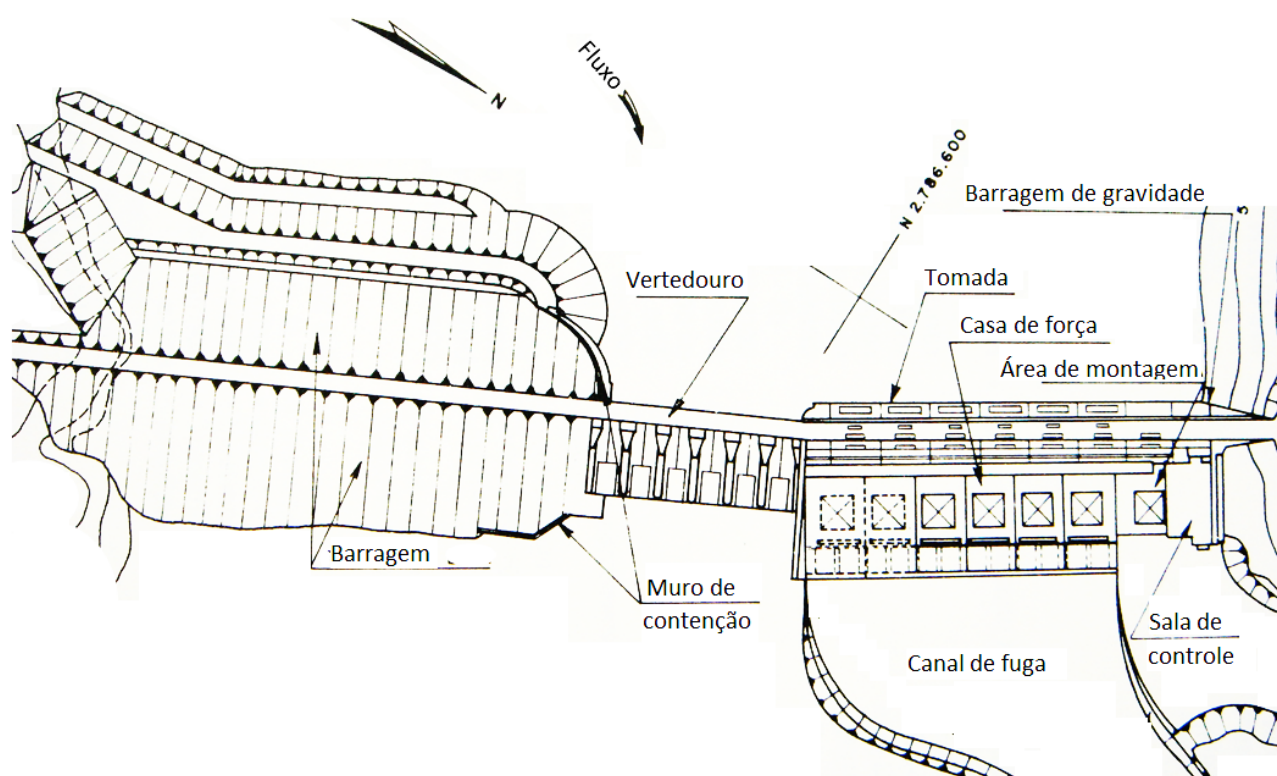


FIGURA 4.10 – Arranjo geral da UHE Jaguará

Fonte: Adaptado de CBDB, 1982, p. 554.

A barragem de terra-enrocamento na margem direita consiste de um núcleo argiloso compactado e estreito, central ao corpo da barragem. Como as áreas de contato do núcleo com a ombreira, fundação e vertedouro foram consideradas críticas no projeto, o núcleo da barragem foi alargado, por meio de uma extensão para montante, com o intuito de aumentar o caminho de percolação nessas zonas (CBDB, 1982).



A FIG. 4.11 apresenta uma seção transversal típica da barragem. O barramento está assente sobre fundação constituída de rocha sã e rocha fraturada com tratamento.

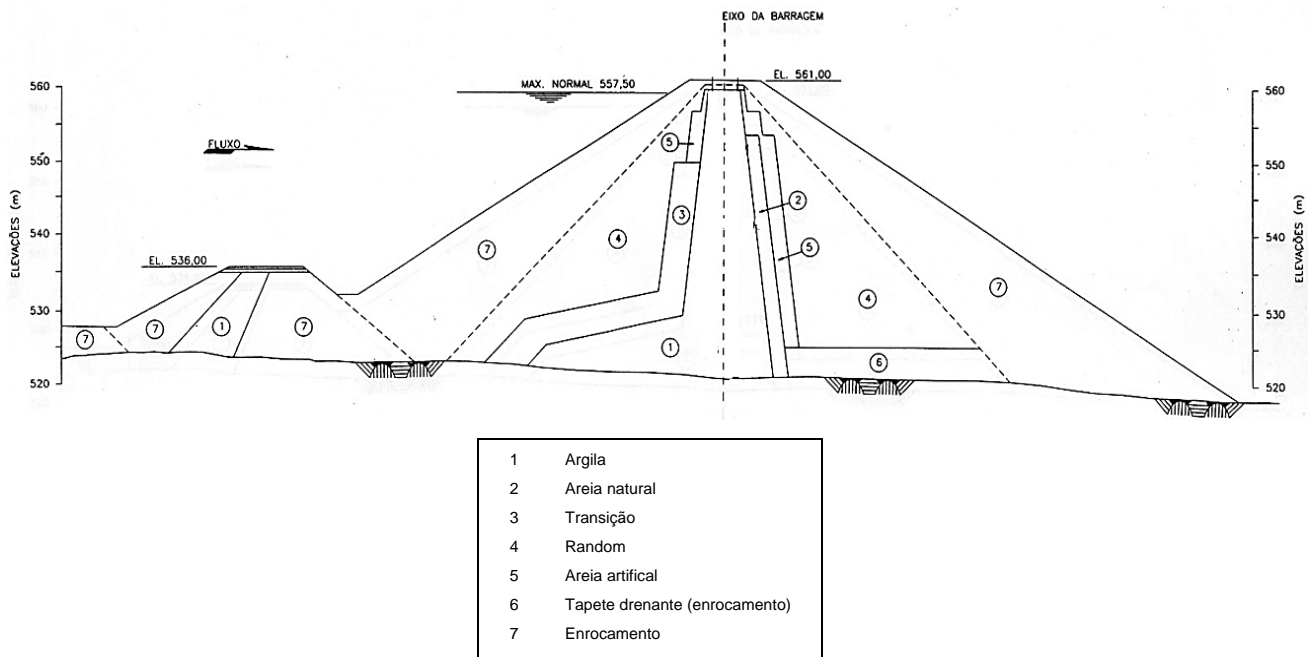


FIGURA 4.11 – Seção da barragem de Jaguará

Fonte: Arquivo Cemig

#### 4.3.4 UHE Miranda

A Usina Hidrelétrica Miranda (FIG. 4.12) está situada no rio Araguari, bacia do Paranaíba, no Triângulo Mineiro.

O potencial hidráulico do rio Araguari também foi estudado inicialmente pelo projeto Canambra, em 1964, quando os consultores do projeto e técnicos da Cemig realizaram estudos energéticos abrangendo o inventário dos recursos hidráulicos do rio Paranaíba e seus afluentes. A construção da usina de Miranda ficou condicionada à viabilização do aproveitamento de Nova Ponte, empreendimento considerado, em 1970, prioritário no rio Araguari (CACHAPUZ, 2006).

A construção do aproveitamento de Miranda foi iniciada em 1990 e concluída em 1997. Os projetos básico e executivo, sob a coordenação da Cemig, foram de autoria da empresa Internacional de Engenharia (IESA) e sua construção por um consórcio formado pela Construtora Queiroz Galvão e Tratex.

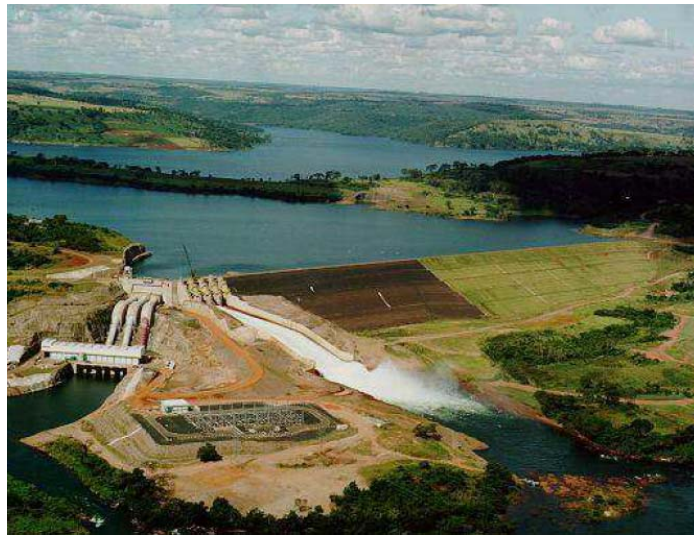


FIGURA 4.12 – Usina Hidrelétrica de Miranda

Fonte: Arquivo Cemig

O barramento é constituído, da margem esquerda para direita, por uma barragem de terra, barragem de terra-enrocamento, vertedouro, muro de ligação, tomada de água e muro de fechamento, conforme FIG. 4.13.

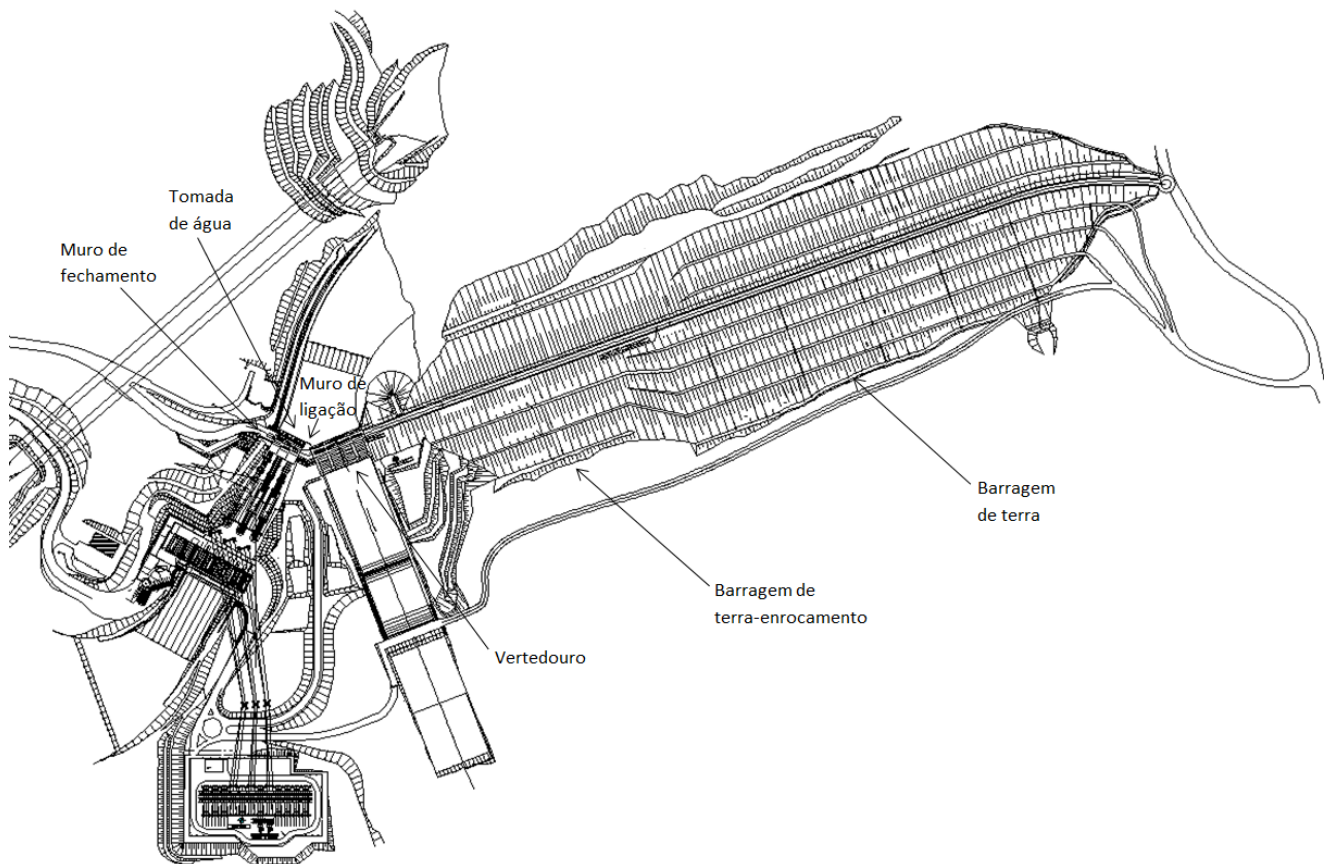


FIGURA 4.13 – Arranjo geral da UHE Miranda

Fonte: Arquivo Cemig

O maciço do barramento de Miranda é constituído por dois trechos com seções transversais geotécnicamente distintas. O primeiro deles, com aproximadamente 375m de extensão, implantado no antigo leito do rio Araguari e na sua margem direita, é composto por um maciço de terra-enrocamento, com cerca de 85m de altura máxima, apoiado sobre fundação rochosa (gnaisse), FIG. 4.14. Já o segundo trecho, com 645m de comprimento, é constituído por uma barragem de terra de seção zoneada com cerca de 75m de altura máxima, fundada sobre horizonte de saprolito de gnaisse. Esse trecho, FIG. 4.15, fecha a margem esquerda do rio Araguari.

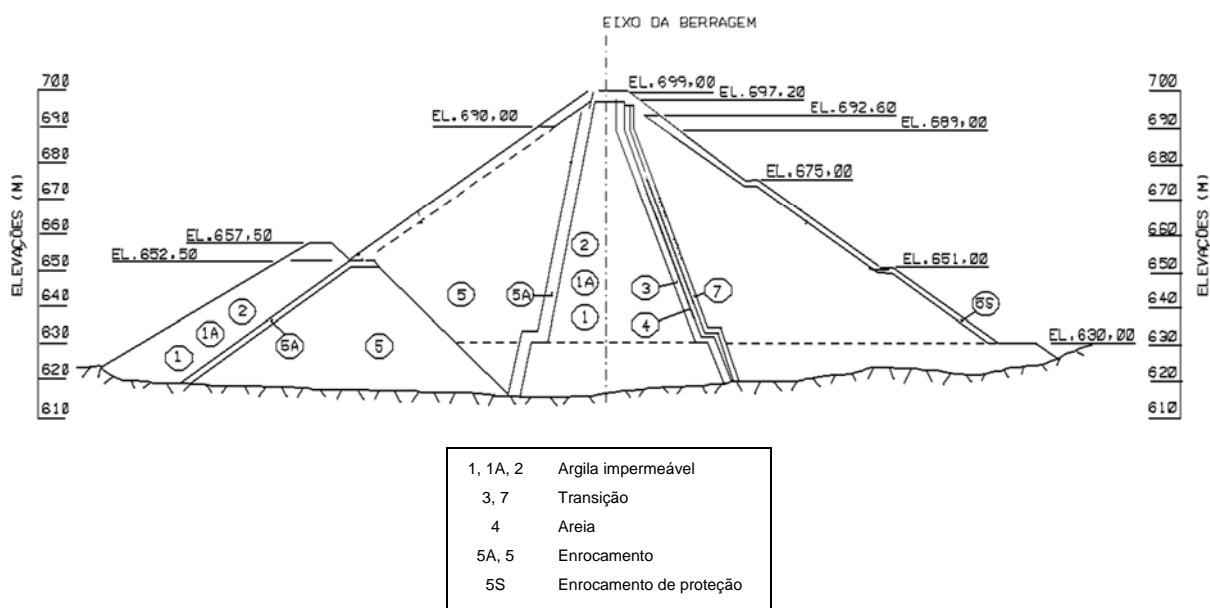


FIGURA 4.14 – Seção da barragem de terra-enrocamento de Miranda

Fonte: Arquivo Cemig

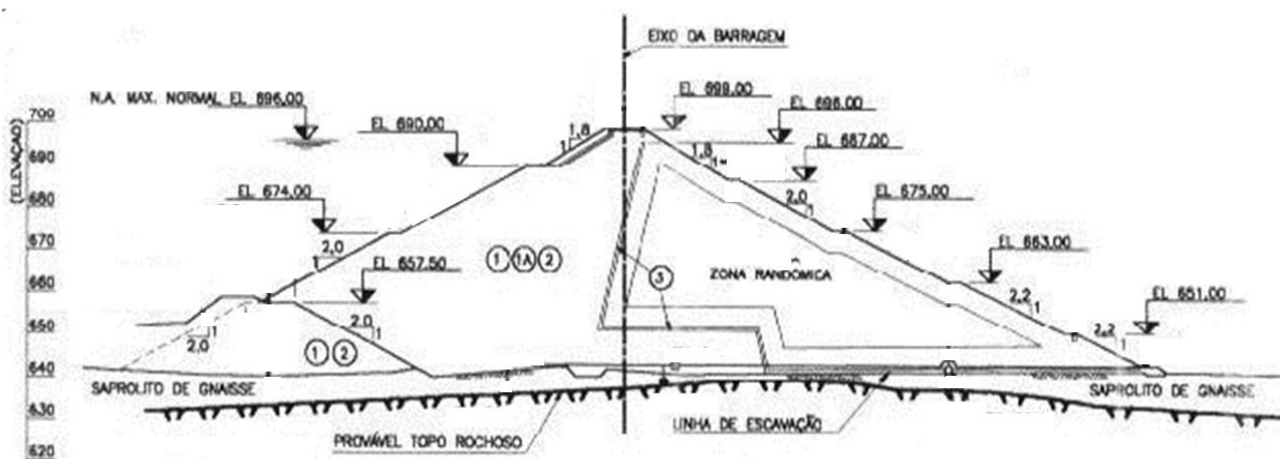


FIGURA 4.15 – Seção da barragem de terra de Miranda

Fonte: Arquivo Cemig

#### 4.3.5 UHE Nova Ponte

O Aproveitamento Hidrelétrico de Nova Ponte, FIG. 4.16, está localizado no rio Araguari, afluente do rio Paranaíba. Com 510 MW de potência instalada, é a terceira maior usina em potência instalada da Cemig GT e propiciou significativo ganho de energia para o sistema interligado da região Sudeste, tendo em vista sua localização privilegiada e a grande capacidade de regularização de seu reservatório (CACHAPUZ, 2006).

O projeto da barragem é da empresa Leme Engenharia. A usina foi construída no período de 1987 a 1994 por um consórcio formado pelas empreiteiras Andrade Gutierrez e Camargo Corrêa. Tem como destaques a relocação total da cidade de Nova Ponte, assim como o fato de ser a primeira usina brasileira construída de forma a cumprir todos os requisitos de proteção ambiental previstos na legislação.



FIGURA 4.16 – Usina Hidrelétrica de Nova Ponte

Fonte: Arquivo Cemig

O arranjo geral do empreendimento (FIG. 4.17) é composto por uma barragem de terra-enrocamento, com 1.600m de comprimento e altura máxima de 142m, fechando praticamente todo o vale principal. No alto da ombreira direita se encontra o vertedouro que, segundo Cachapuz (2006), foi o primeiro no Brasil composto por calha longa sem revestimento de concreto em toda a sua extensão, o que gerou uma grande economia de recursos. Na margem esquerda, localizam-se ainda a casa de força e a estrutura da tomada de água, do tipo torre, com três condutos forçados (túneis) escavados na rocha. Destaca-se que a crista do barramento é utilizada como tráfego público para a rodovia MG-190.

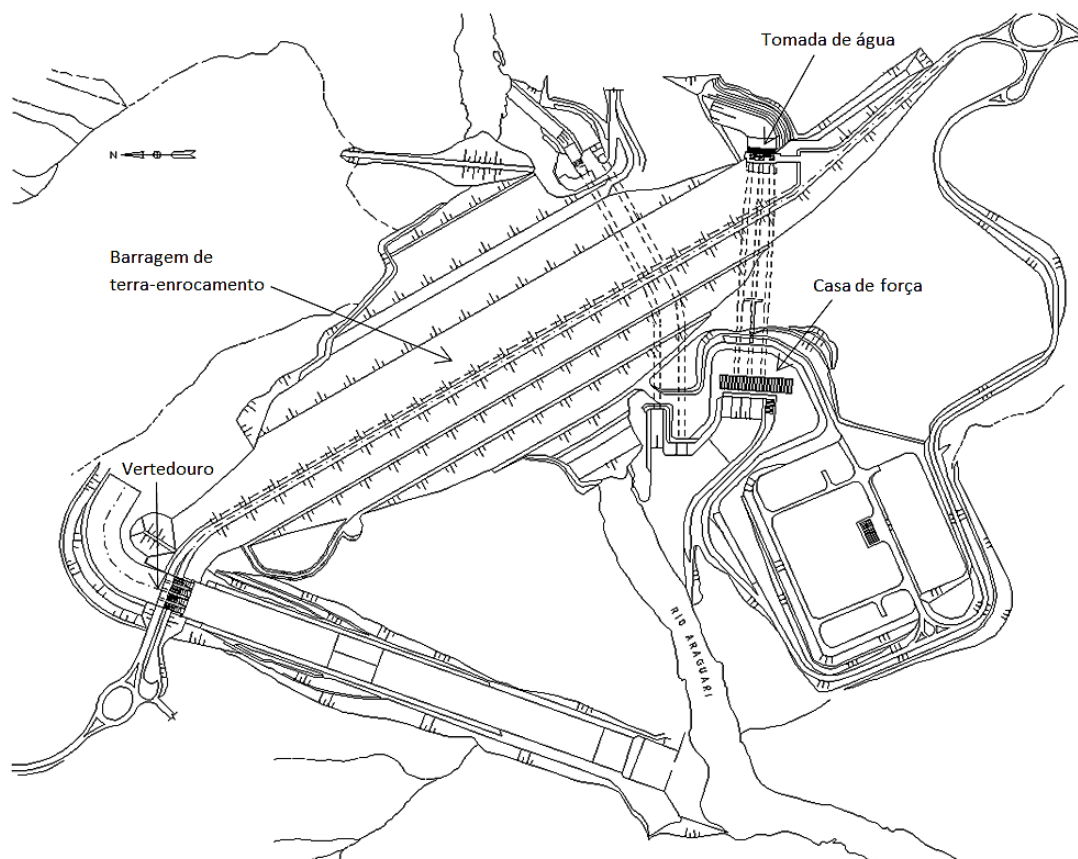


FIGURA 4.17 – Arranjo geral da UHE Nova Ponte

Fonte: Arquivo Cemig

A seção transversal da barragem é apresentada na FIG. 4.18. Como pode ser visto, a barragem é constituída de terra-enrocamento, mas também poderia ser considerada como uma barragem de terra zoneada, já que existe a predominância de material impermeável com pedregulho (denominado “cascalho” – material nº2) e sistema de drenagem convencional com filtro vertical e tapete horizontal no núcleo.

A seção típica de Nova Ponte foi projetada com o objetivo de se obter uma barragem que, além de estável, apresentasse baixa compressibilidade e recalques diferenciais mínimos. Por isso se deu preferência à utilização do “cascalho” no espaldar de montante, para reduzir os recalques esperados com o enchimento do reservatório, um efeito severo e frequentemente observado quando da saturação dos enrocamentos (CEMIG, 2011). O “cascalho” possui boas propriedades geotécnicas, com alta resistência ao cisalhamento, baixa compressibilidade e reduzida permeabilidade.

Além disso, com o intuito de reduzir a percolação através da barragem, também foi adotado o conceito de tapete impermeável interno, como um prolongamento do núcleo para jusante. A fundação é de rocha sã tratada.

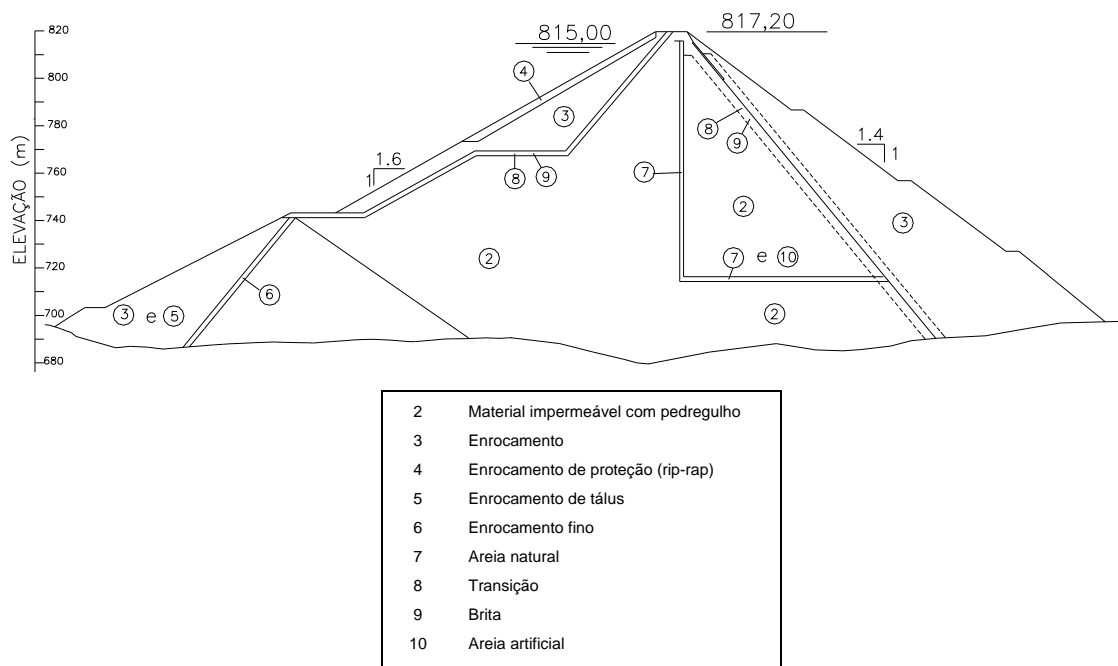


FIGURA 4.18 – Seção da barragem de Nova Ponte

Fonte: Arquivo Cemig

#### 4.3.6 UHE São Simão

A Usina Hidrelétrica de São Simão (FIG. 4.19) faz parte do sistema de aproveitamento hidrelétrico do rio Paranaíba, localizada a montante de sua confluência com o rio Grande, formando o rio Paraná. A usina está situada na fronteira entre os estados de Minas Gerais e Goiás. Com 1.710 MW de potência instalada, São Simão é a usina mais importante em geração da Cemig GT.



FIGURA 4.19 – Usina Hidrelétrica de São Simão

Fonte: Arquivo Cemig

A história da usina começou em 1960, quando foram realizados os primeiros estudos no canal de São Simão, posteriormente reavaliados pelo grupo Cemig-Canambra. Sua construção ocorreu entre 1973 e 1977 pelo consórcio formado pela empresa italiana Impregilo e pela brasileira C.R. Almeida. O projeto executivo foi elaborado pelas empresas Geotécnica Engenheiros Consultores e Companhia Internacional de Engenharia (CIE). São Simão é considerada um marco para o desenvolvimento da engenharia de barragens no estado de Minas Gerais.

O arranjo geral (FIG.4.20) consta, basicamente, de barragens de terra nas ombreiras direita e esquerda, barragem de terra-enrocamento na seção do leito do rio, barragem de gravidade em concreto nos encontros com as barragens em aterro (transições n° 1 e 2), estruturas hidráulicas (vertedouro e tomada de água) e casa de força. As estruturas de concreto estão situadas na antiga margem direita do rio, alocadas lado a lado em um conjunto único, e apoiadas na fundação em rocha. A disponibilidade de materiais terrosos na região e as condições da fundação justificaram a adoção de estruturas de terra na maior parte do barramento. Dos aproximadamente 3.635 m de extensão na crista, 3.072 m correspondem às estruturas de terra e 563 às estruturas de concreto.

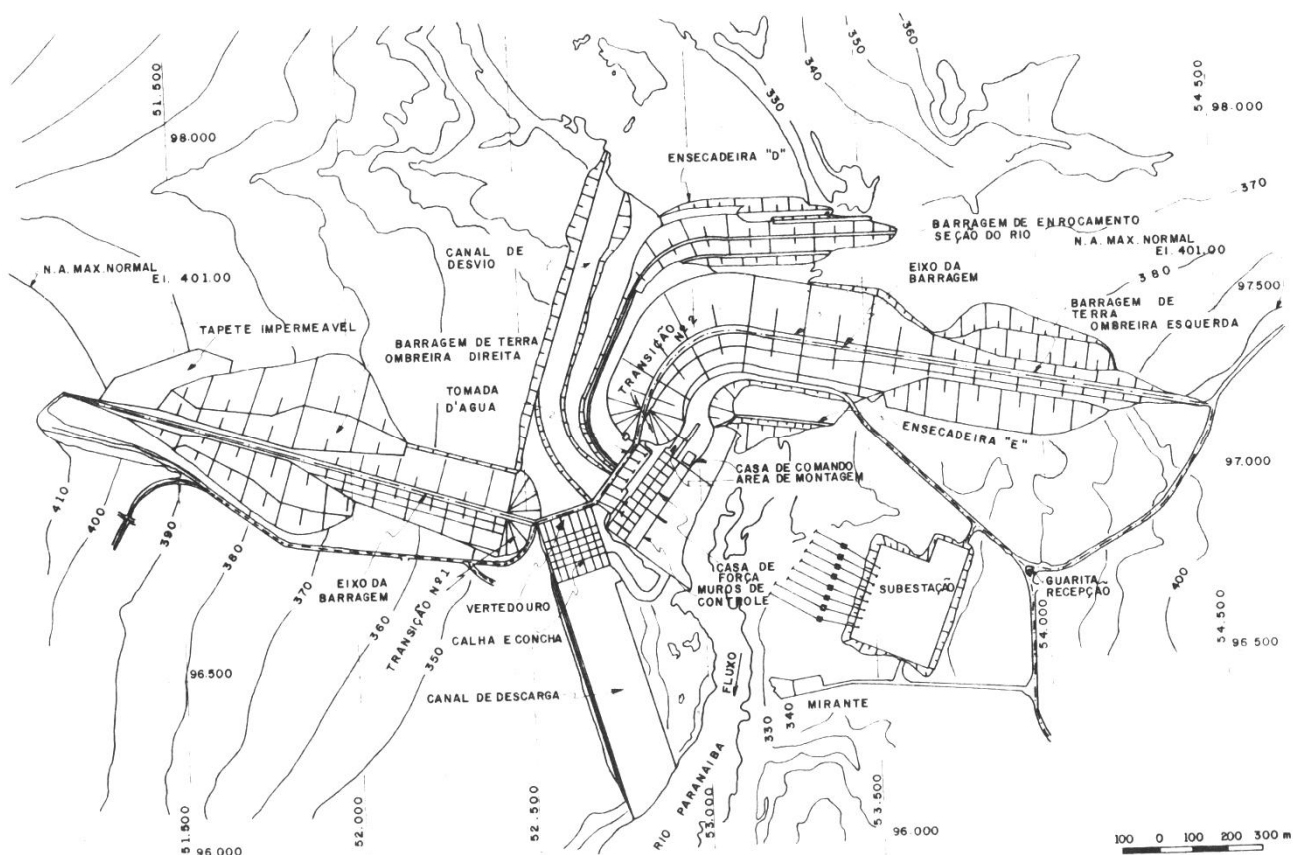


FIGURA 4.20 – Arranjo geral da UHE São Simão

Fonte: FONSECA, 2003, p. 61.

A barragem de terra da margem direita, apresentada na FIG. 4.21, tem 1.315 m de comprimento e altura máxima de 71 m. Na ombreira direita havia uma camada espessa de solo poroso e colapsível que condicionou o projeto da barragem. Nesse trecho da barragem foi necessária, portanto, uma extensa escavação da fundação para retirada do solo poroso e outros materiais terrosos. Com isso, uma parte do material escavado foi lançado a montante e a jusante, sem compactação, para posteriormente fazer parte de bermas com taludes bem abatidos tipo *beach slope*, sugestão na época do consultor Arthur Casagrande (CEMIG, 2007).

Em função da disponibilidade de materiais, o maciço da barragem é zoneado. Em todo o comprimento da barragem há um núcleo de argila (para garantir a vedação) e espaldares de cascalho de terraço (para garantir a estabilidade). Importantes depósitos de cascalho de terraço foram descobertos próximos à barragem. Por esse motivo, segundo Fonseca (2003), esse material foi amplamente utilizado devido às suas excelentes características, tais como elevada resistência, baixa deformabilidade e reduzida permeabilidade depois de compactado.

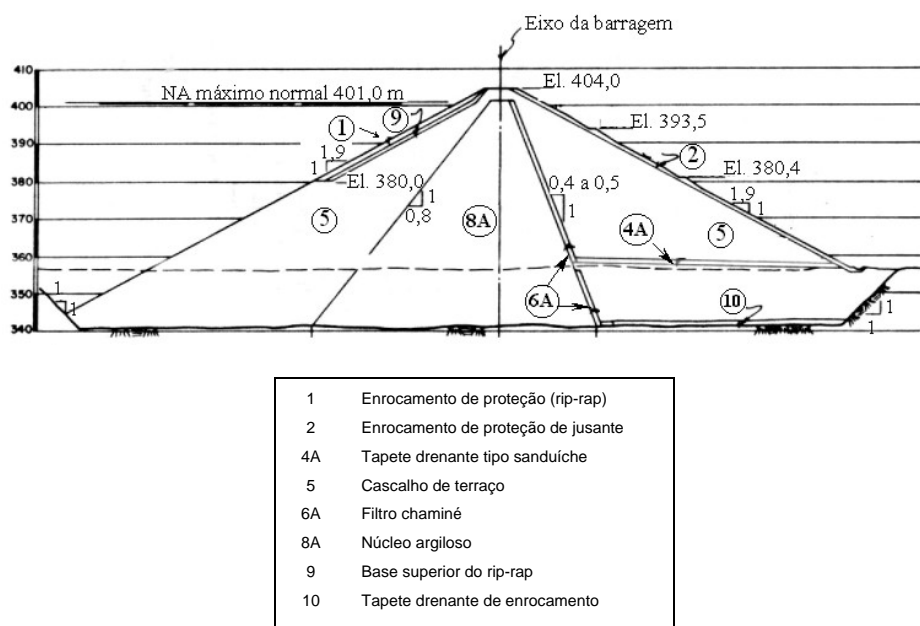


FIGURA 4.21 – Seção da barragem da margem direita de São Simão

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

Já a barragem de terra da margem esquerda tem aproximadamente 952 m de comprimento e 64 m de altura máxima. A seção típica (FIG. 4.22) é semelhante à da barragem direita, com núcleo de argila e espaldares de cascalho. Também nesse trecho da barragem foi feita uma extensa escavação de materiais terrosos na fundação e lançadas bermas a montante e jusante.



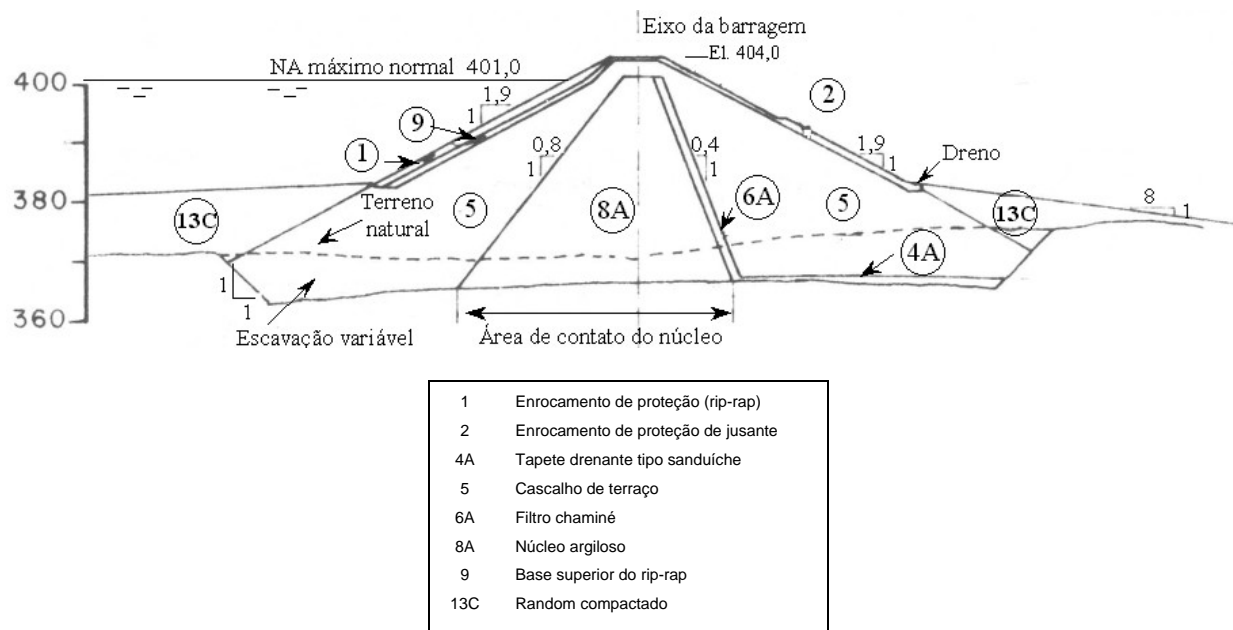


FIGURA 4.22 – Seção da barragem da margem esquerda de São Simão

Fonte: Adaptado de FONSECA, 2003, p. 68.

A barragem do leito do rio (FIG. 4.23), com comprimento de 805 m e altura máxima de 127 m, é uma barragem de terra-enrocamento composta de um núcleo central em argila, envolto por cascalho de terraço a montante e jusante e enrocamento nos espaldares. A seção nesse trecho foi condicionada pelo canal profundo do rio, preenchido com o cascalho de terraço. As rochas das escavações obrigatórias viabilizaram a utilização de enrocamento nas estruturas de terra.

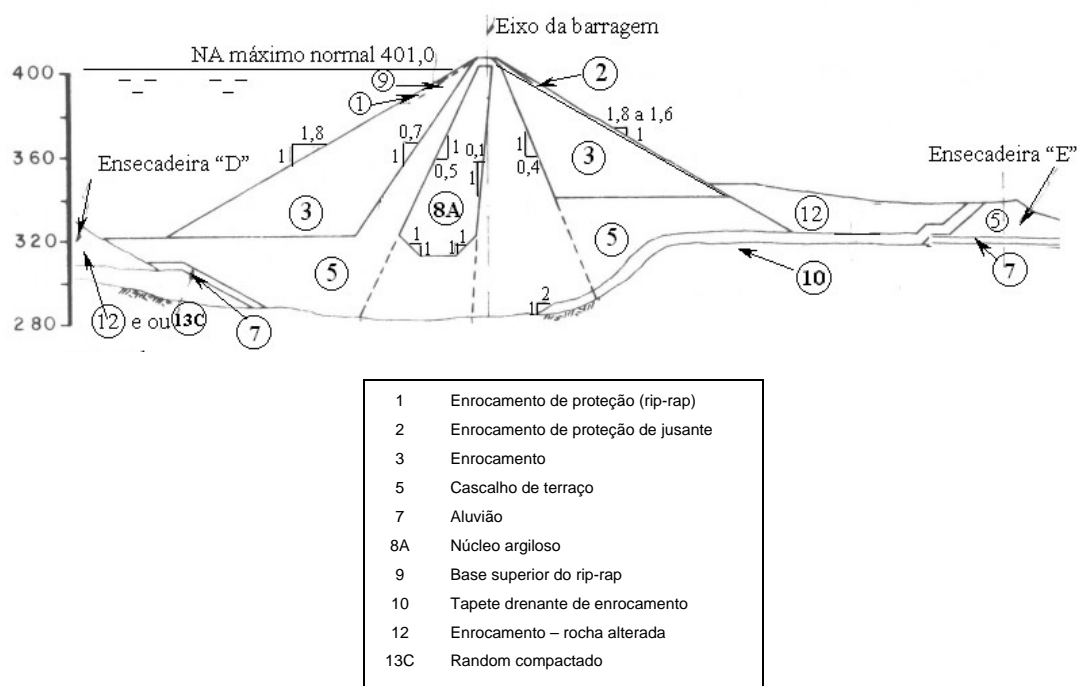


FIGURA 4.23 – Seção da barragem do leito do rio de São Simão

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

Mais informações sobre os aspectos construtivos, de projeto e desempenho da barragem São Simão podem ser encontrados em CBDB (1982), Fonseca (2003) e Ladeira (2007).

#### 4.3.7 UHE Três Marias

A Usina Hidrelétrica de Três Marias (FIG. 24) está situada no rio São Francisco, na região central de Minas Gerais. Cachapuz (2006) assinala que a usina de Três Marias foi a primeira obra de grande porte da Cemig e também o primeiro grande empreendimento hidráulico de usos múltiplos realizado no Brasil.



FIGURA 4.24 – Usina Hidrelétrica de Três Marias

Fonte: Arquivo Cemig

A história de Três Marias remonta à criação da Comissão do Vale do São Francisco, órgão subordinado à Presidência da República que, em 1950, elaborou o Plano Geral para o Aproveitamento Econômico do Vale do São Francisco. Esse plano definia a regularização do rio São Francisco como uma questão fundamental para o desenvolvimento regional, tendo a barragem de Três Marias como a mais importante obra dentre as recomendadas (CACHAPUZ, 2006).

O anteprojeto da barragem foi elaborado pela empresa Servix Engenharia e seu projeto definitivo, sob a responsabilidade da Cemig, foi complementado pela empresa norte-americana *International Engineering Co.* (Ieco). A construção do empreendimento ocorreu de 1957 a 1961 e coube a consórcios formados por empresas norte-americanas (CACHAPUZ, 2006). Importante ressaltar que o professor Arthur Casagrande, renomado especialista em mecânica dos solos, foi consultor para o projeto das fundações e aterro da barragem (CARIM, 2007).

O barramento da usina de Três Marias contempla um vertedouro na ombreira direita e uma barragem de terra que se estende da ombreira direita à ombreira esquerda, possuindo um comprimento de 2.700 m e altura máxima de 70 m. As estruturas da tomada de água, tubulações forçadas (sob o corpo da barragem de terra) e casa de força foram inseridas na ombreira direita e parte do leito do rio. O arranjo geral é apresentado na FIG. 4.25.

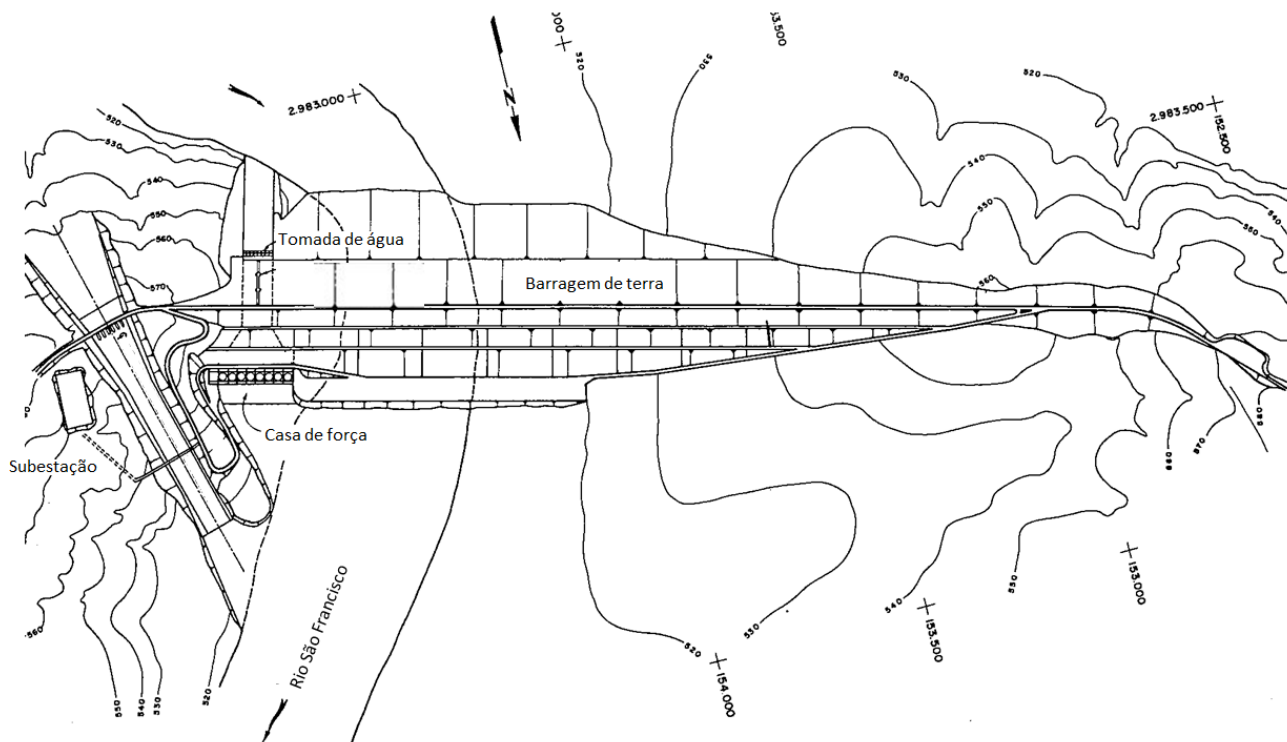


FIGURA 4.25 – Arranjo geral da UHE Três Marias

Fonte: Adaptado de CBDB, 1982, p. 570.

De acordo com Cachapuz (2006), a barragem de Três Marias era a quarta maior estrutura de terra do mundo na época. Destaca-se também que sua construção ocorreu em um prazo de 3,5 anos, considerado excepcional para o porte da obra e condições da época (CARIM, 2007).

Apesar de poder ser genericamente classificada como homogênea, Carim (2007) salienta que a barragem de terra é, a rigor, uma estrutura zoneada, pois incorpora diferentes materiais disponíveis das áreas de empréstimo. O material que foi empregado no núcleo (Zona 1) é constituído por uma argila laterítica vermelha, diferenciando-se dos materiais menos plásticos empregados nos espaldares de montante e jusante. A Zona 2 (siltes arenosos ou argilosos) foi construída de forma mais homogênea que a Zona 3, onde foram utilizados vários tipos de solo contendo quantidades apreciáveis de pedregulho. Já na zona 4 foram utilizados materiais mais úmidos ou secos ou até

mesmo contendo material orgânico. As FIG. 4.26 e 4.27 mostram o projeto definitivo com as seções típicas da barragem de Três Marias no leito do rio e na região dos condutos.

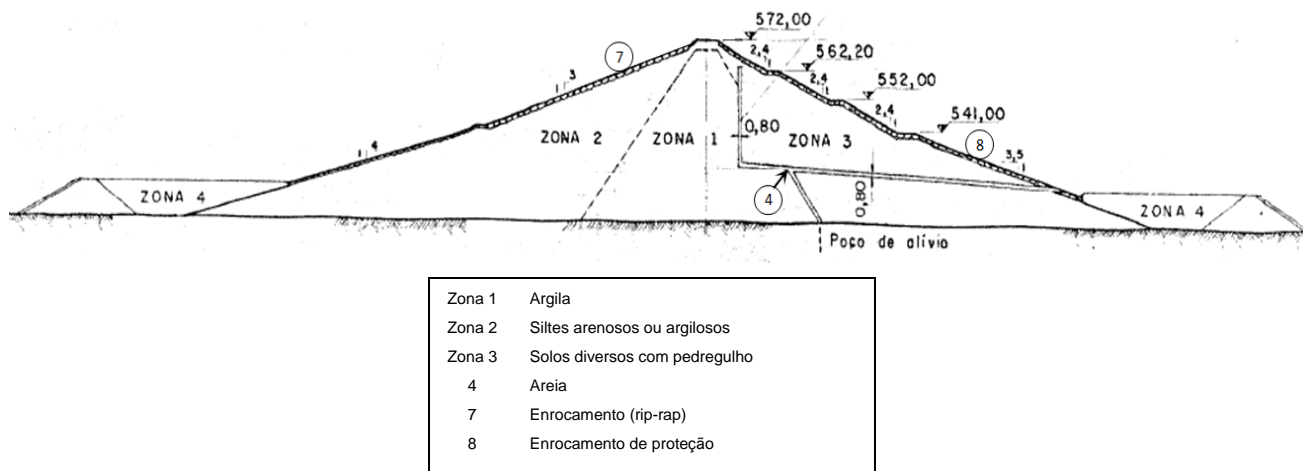


FIGURA 4.26 – Seção da barragem do leito do rio de Três Marias

Fonte: Adaptado de CARIM, 2007, p. 76.

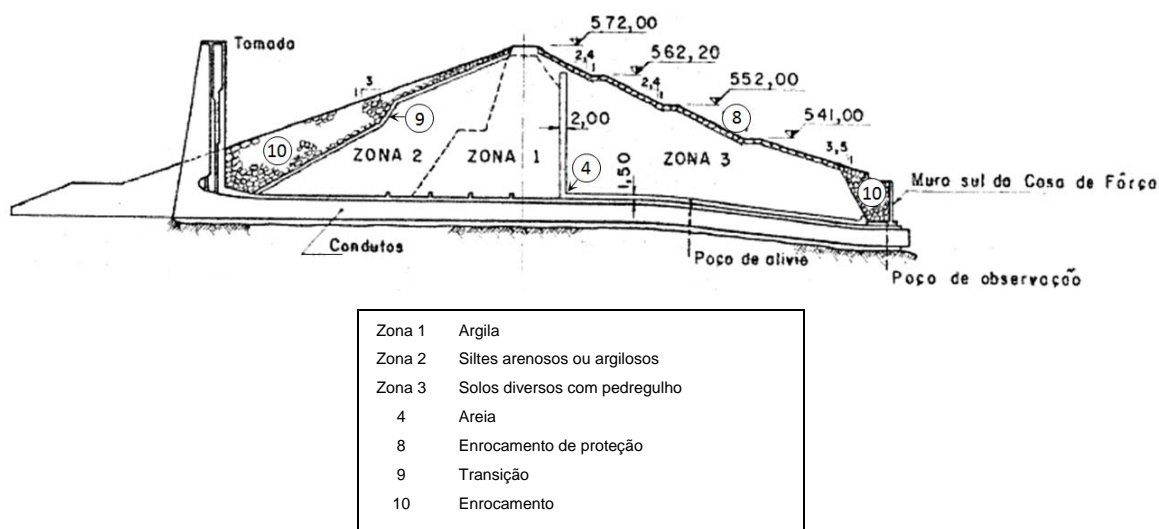


FIGURA 4.27 – Seção da barragem sobre os condutos de Três Marias

Fonte: Adaptado de CARIM, 2007, p. 76.

A fundação da barragem de Três Marias é de natureza complexa, permitindo decompô-la, segundo Carim (2007), em quatro trechos geologicamente distintos: ombreira direita (rocha decomposta), leito do rio (rocha sã), planície de inundação da margem esquerda (camada de argila orgânica) e o restante da ombreira esquerda (camadas de areia e cascalho, argila porosa e material residual). Foram executados diferentes tratamentos de fundação, de acordo com as condicionantes geotécnicas específicas de cada trecho.

#### 4.3.8 UHE Volta Grande

A Usina Hidrelétrica de Volta Grande (FIG. 4.28) está localizada no rio Grande, Triângulo Mineiro, na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo. É a nona usina da cascata de aproveitamentos hidrelétricos do rio Grande.



FIGURA 4.28 – Usina Hidrelétrica de Volta Grande

Fonte: Arquivo Cemig

As primeiras investigações sobre a barragem de Volta Grande foram desenvolvidas no estudo amplo sobre o potencial hidrelétrico do rio Grande pela Cemig, entre 1954 e 1955. Tal estudo revelou o grande potencial do rio na altura das corredeiras de Furnas, indicando também a possibilidade de construção de outras usinas a jusante, dentre as quais Volta Grande (CACHAPUZ, 2006).

O projeto executivo foi desenvolvido pelo consórcio das empresas Tams e Engevix. A construção ficou a cargo da Construtora Mendes Júnior. As obras civis foram iniciadas em 1970 e concluídas em 1974.

O barramento de Volta Grande, com um comprimento total de 2.329 m, é formado por diversas estruturas de concreto e terra relacionadas a seguir, da ombreira esquerda para direita:

- Barragem de terra esquerda;
- Barragem de transição nº 1;
- Barragem de gravidade nº 1;
- Tomada de água e, a jusante a casa de força;

- Barragem de gravidade n° 2;
- Vertedouro;
- Barragem de transição n° 2;
- Barragem de terra direita.

A FIG. 4.29 ilustra o arranjo geral de Volta Grande.

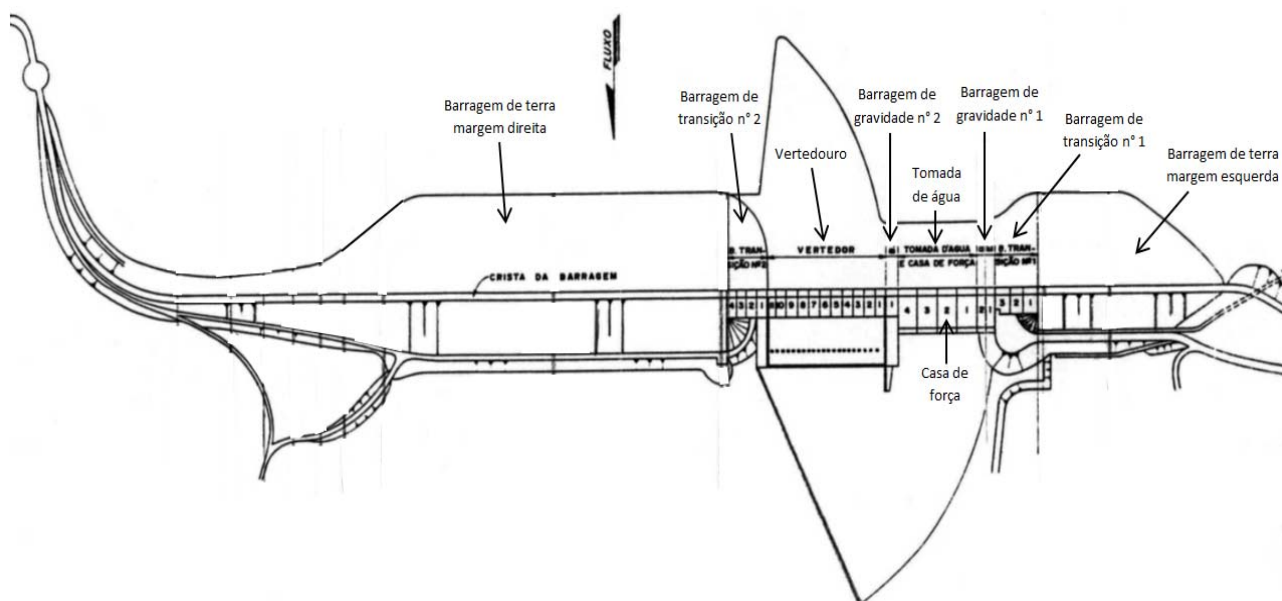


FIGURA 4.29 – Arranjo geral da UHE Volta Grande

Fonte: Arquivo Cemig.

Volta Grande foi o primeiro projeto da Cemig em região basáltica. Várias barragens brasileiras estavam sendo construídas nos basaltos do sul-sudeste do Brasil, mas a experiência com esses materiais ainda estava sendo desenvolvida. Assim sendo, a equipe da obra, assim como a projetista, não possuía experiência específica com essa geologia e seus materiais, o que gerou certo conservadorismo nas soluções adotadas na fundação e taludes externos da barragem (CEMIG, 2009b).

A barragem da margem esquerda consta de um maciço em terra homogênea, assente em rocha sã e rocha levemente intemperizada (e tratada), possuindo um comprimento de 300 m e altura máxima de 36 m. A barragem da margem direita é constituída também por um aterro compactado homogêneo, com filtros vertical e horizontal de areia, comprimento total de 1.212 m e altura máxima de 40 m. Os taludes de ambas as barragens são protegidos por enrocamento na face de montante e terra vegetal com grama na face de jusante (na zona acima do NA de jusante). A

fundação da barragem no leito do rio é assente sobre rocha, enquanto na ombreira é sobre solo residual e saprolito de basalto. No pé da barragem, em ambas as ombreiras, foram instalados poços de alívio com a finalidade de captar possíveis fluxos de água e aliviar a subpressão possível de se desenvolver na camada de brecha existente na fundação.

A FIG. 4.30 apresenta a seção típica da barragem de terra homogênea de Volta Grande.

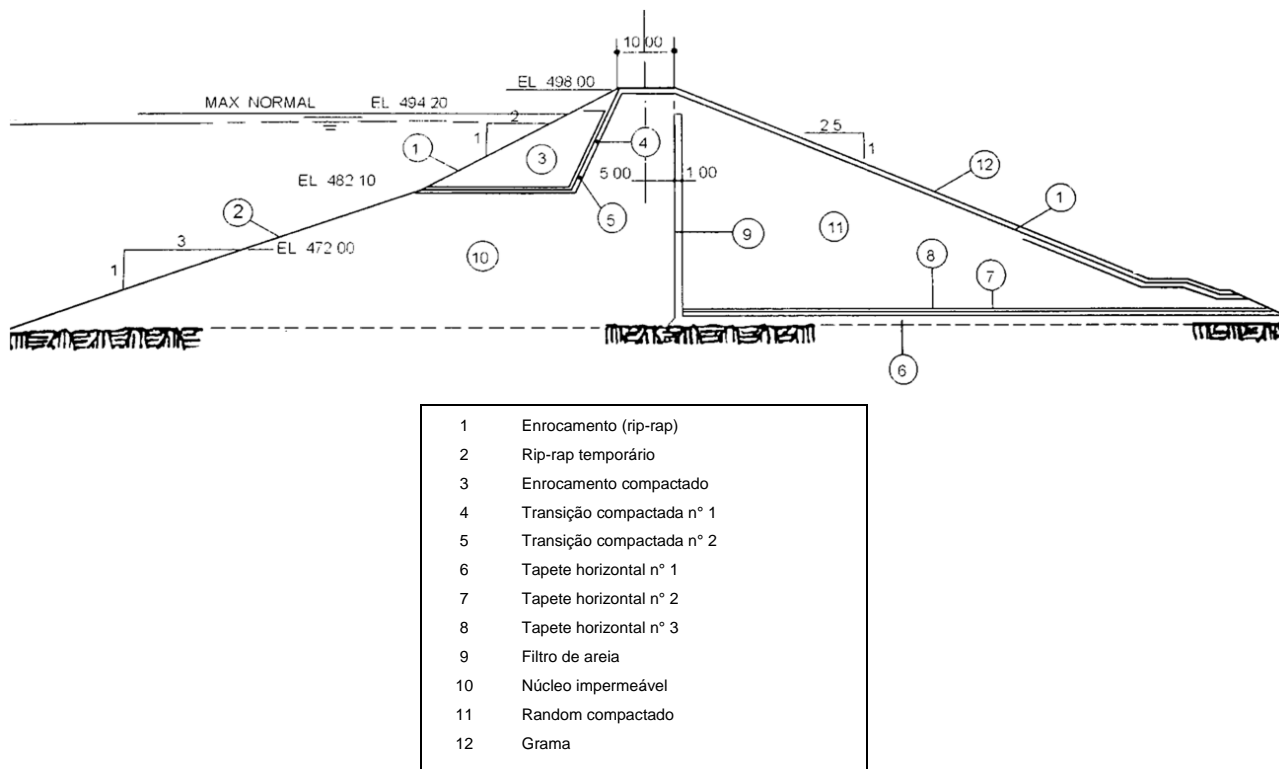


FIGURA 4.30 – Seção da barragem de Volta Grande

Fonte: Adaptado de CBDB, 2000, p. 467.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados as análises e resultados referentes à aplicação dos métodos propostos para o grupo de barragens selecionado no capítulo anterior. A análise é realizada em duas fases. Primeiramente, objetiva a classificação das barragens segundo os diversos métodos de análise preliminar e em seguida a aplicação dos métodos formais de análise de risco a duas barragens identificadas com risco elevado. Ainda, ao longo do texto, são feitas discussões acerca da aplicação dos métodos. Suas tabelas e metodologias originais podem ser consultadas regressando-se ao capítulo 2.

### 5.1 Aplicação dos métodos de análise preliminar de risco em portfólio

Os resultados dos métodos de análise preliminar de risco são apresentados nos itens 5.1.1 a 5.1.7. A avaliação tem como referência a condição das barragens na data de abril de 2013.

#### 5.1.1 Aplicação do método índice global de risco

A aplicação do método para o portfólio de barragens selecionado é apresentada na TAB. 5.1. Sua utilização é simples, não exigindo informações muito detalhadas das barragens, característica natural dos métodos baseados em índices de risco. O método aborda somente as fontes de perigo mais comuns (externas), inseridas no fator E. As fontes de perigos internos, de certa forma, são simplificada e contempladas no fator F, relativo à confiabilidade (que também tende a traduzir a parcela de probabilidade). Os descritores não fazem qualquer referência a potenciais modos de falha e suas classificações são descritas de forma bem generalizada.

No Apêndice A.2 são justificadas as classificações atribuídas para cada descritor. A inexistência de diretrizes ou tabelas orientativas para pontuação dos descritores resulta em uma grande subjetividade na sua aplicação, podendo ser bastante afetada pela experiência pessoal do técnico avaliador. Assim sendo, se o método for utilizado com o objetivo de analisar comparativamente barragens avaliadas por diferentes empreendedores, há que se acordar uma padronização dos critérios e julgamentos relativos às classificações dadas aos descritores. Apesar de conduzir a uma análise de risco bastante simplificada, o índice global de risco cumpre os principais objetivos de uma análise preliminar, no sentido de hierarquizar as barragens com base no risco.



TABELA 5.1 – Pontuação do índice global de risco

Descritor ( $\alpha_i$ )	CONDIÇÕES EXTERNAS OU AMBIENTAIS (FATOR E)					CONDIÇÃO DA BARRAGEM / CONFIABILIDADE (FATOR F)				DANOS POTENCIAIS HUMANOS / ECONÔMICOS (FATOR R)	
	Sismicidade	Perigo de escorregamentos de taludes no reservatório	Perigo de cheias superiores às de projeto	Reserv. func. (tipo de operação, gerenciamento)	Ações ambientais agressivas (clima, água)	Dimensionamento estrutural	Fundações	Órgãos de descarga	Condições de manutenção	Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )	Instalações a jusante
UHE	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
EM	Mínima ou nula (1)	Mínimo ou nulo (1)	Probabilidade muito baixa (3)	Regularização, anual ou sazonal (1)	Muito fracas (1)	Aceitável (3)	Muito boas (1)	Confiáveis (1)	Boas (2)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Grandes cidades, indústrias (5)
IR	Baixa (2)	Mínimo ou nulo (1)	Probabilidade muito baixa (3)	Regularização, anual ou sazonal (1)	Fortes (4)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Confiáveis (1)	Boas (2)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Grandes cidades, indústrias (5)
JG	Mínima ou nula (1)	Mínimo ou nulo (1)	Probabilidade muito baixa (3)	Regularização, anual ou sazonal (1)	Muito fracas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Confiáveis (1)	Muito boas (1)	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>9</sup> (4)	Grandes cidades, indústrias (5)
MR	Mínima ou nula (1)	Mínimo ou nulo (1)	Probabilidade muito baixa (3)	Regularização, anual ou sazonal (1)	Muito fracas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Confiáveis (1)	Muito boas (1)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Grandes cidades, indústrias (5)
NP	Baixa (2)	Mínimo ou nulo (1)	Probabilidade muito baixa (3)	Regularização, anual ou sazonal (1)	Muito fracas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Confiáveis (1)	Muito boas (1)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Grandes cidades, indústrias (5)
SS	Mínima ou nula (1)	Mínimo ou nulo (1)	Probabilidade muito baixa (3)	Regularização, anual ou sazonal (1)	Muito fracas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Confiáveis (1)	Muito boas (1)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Grandes cidades, indústrias (5)
TM	Mínima ou nula (1)	Mínimo ou nulo (1)	Probabilidade muito baixa (3)	Regularização, anual ou sazonal (1)	Muito fracas (1)	Adequado (1)	Aceitáveis (3)	Confiáveis (1)	Boas (2)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Grandes cidades, indústrias (5)
VG	Mínima ou nula (1)	Mínimo ou nulo (1)	Probabilidade muito baixa (3)	Regularização, anual ou sazonal (1)	Muito fracas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Confiáveis (1)	Boas (2)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Grandes cidades, indústrias (5)

Legenda:

EM - Emborcação ; IR - Irapé ; JG - Jaguará ; MR - Miranda ; NP - Nova Ponte ; SS - São Simão ; TM - Três Marias ; VG - Volta Grande

A TAB. 5.2 resume a pontuação dos índices do método e a respectiva hierarquização das barragens baseada no risco ( $\alpha_g$ ). Com maior utilização do método e comparação de resultados entre diversas barragens, pode-se definir valores limites de aceitabilidade e tolerabilidade (apreciação do risco) do índice de risco ( $\alpha_g$ ).

TABELA 5.2 – Classificação do índice global de risco

BARRAGEM	E	F	R	$\alpha_g$
Irapé	2,2	1,25	5	13,75
Emborcação	1,4	1,75	5	12,25
Três Marias	1,4	1,75	5	12,25
Volta Grande	1,4	1,25	5	8,75
Nova Ponte	1,6	1	5	8
Miranda	1,4	1	5	7
São Simão	1,4	1	5	7
Jaguara	1,4	1	4,5	6,3

Em que:

E = índice parcial relativo aos fatores externos ou ambientais;

F = índice parcial relativo à confiabilidade;

R = índice parcial relativo aos danos potenciais humanos e econômicos;

$\alpha_g$  = índice global de risco.

### 5.1.2 Aplicação do método índice global de risco modificado

O índice global de risco modificado adotado por Portugal veio preencher algumas lacunas do método original, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de diretrizes para as condições de aplicação de cada descritor, facilitando e homogeneizando o julgamento por parte dos diferentes avaliadores.

Algumas modificações também foram introduzidas nos descritores para adequá-los ao portfólio de barragens portuguesas, mas mantendo a essência do método original. A utilização efetiva do índice modificado em um grande número de barragens portuguesas, indisponível no método original da ICOLD, justifica aqui sua aplicação, reproduzida na TAB. 5.3.

Como os descritores são praticamente os mesmos do método original, as justificativas e os critérios discutidos no Apêndice A.2 (índice global de risco) são também válidos para a aplicação presente.

TABELA 5.3 – Pontuação do índice global de risco modificado

Descr. $\alpha_i$	CLASSE ASSOCIADA A FATORES EXTERNOS OU AMBIENTAIS (E)					CLASSE ASSOCIADA À CONFIABILIDADE DA OBRA (F)				CLASSE ASSOCIADA A FATORES HUMANOS E ECONÔMICOS ( R )	
	Sismicidade (período de retorno de 1.000 anos)	Escorregamento de taludes (probabilidade)	Cheias superiores à do projeto (probabilidade)	Gestão do reservatório	Ações agressivas (clima, água, etc)	Dimensionamento estrutural	Fundações	Órgãos de descarga	Manutenção	Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )	Instalações a jusante (associada à prob. de ocorrência de pessoas e instalações nas áreas potencialmente inundáveis)
UHE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
EM	Muito baixa (2)	Mínima ou nula (1)	Baixa (2)	Muito boa (1)	Mínimas (1)	Aceitável (4)	Muito boas (1)	Elevada confiabilidade (1)	Boa (2)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Elevada (5)
IR	Baixa (3)	Mínima ou nula (1)	Baixa (2)	Muito boa (1)	Fortes (4)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Elevada confiabilidade (1)	Boa (2)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Elevada (5)
JG	Muito baixa (2)	Mínima ou nula (1)	Baixa (2)	Muito boa (1)	Mínimas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Elevada confiabilidade (1)	Muito boa (1)	10 <sup>7</sup> – 10 <sup>9</sup> (4)	Elevada (5)
MR	Muito baixa (2)	Mínima ou nula (1)	Baixa (2)	Muito boa (1)	Mínimas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Elevada confiabilidade (1)	Muito boa (1)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Elevada (5)
NP	Baixa (3)	Mínima ou nula (1)	Baixa (2)	Muito boa (1)	Mínimas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Elevada confiabilidade (1)	Muito boa (1)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Elevada (5)
SS	Muito baixa (2)	Mínima ou nula (1)	Baixa (2)	Muito boa (1)	Mínimas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Elevada confiabilidade (1)	Muito boa (1)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Elevada (5)
TM	Muito baixa (2)	Mínima ou nula (1)	Baixa (2)	Muito boa (1)	Mínimas (1)	Adequado (1)	Aceitáveis (4)	Elevada confiabilidade (1)	Boa (2)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Elevada (5)
VG	Muito baixa (2)	Mínima ou nula (1)	Baixa (2)	Muito boa (1)	Mínimas (1)	Adequado (1)	Muito boas (1)	Elevada confiabilidade (1)	Boa (2)	> 10 <sup>9</sup> (5)	Elevada (5)

Legenda:

EM - Emborcação ; IR - Irapé ; JG - Jaguará ; MR - Miranda ; NP - Nova Ponte ; SS - São Simão ; TM - Três Marias ; VG - Volta Grande

A TAB. 5.4 sintetiza a pontuação dos índices do método modificado e mostra a classificação das barragens.

TABELA 5.4 – Classificação do índice global de risco modificado

BARRAGEM	E	F	R	$\alpha_g$
Emborcação	1,4	2	5	14
Três Marias	1,4	2	5	14
Irapé	2,2	1,25	5	13,75
Volta Grande	1,4	1,25	5	8,75
Nova Ponte	1,6	1	5	8
Miranda	1,4	1	5	7
São Simão	1,4	1	5	7
Jaguara	1,4	1	4,5	6,3

Em que:

E = índice parcial relativo aos fatores externos ou ambientais;

F = índice parcial relativo à confiabilidade;

R = índice parcial relativo a fatores humanos e econômicos;

$\alpha_g$  = índice global de risco modificado.

Com relação à apreciação de risco, os resultados indicam que, seguindo o enquadramento adotado nas NOIB portuguesas, as barragens em estudo seriam classificadas na Classe C (entre A, B e C). Caldeira (2008) mostra que a média do índice de risco ( $\alpha_g$ ), obtida pela análise em 327 barragens de aterro portuguesas, era da ordem de 30 pontos. Pode-se inferir, portanto, que os valores encontrados para o grupo de barragens da Cemig são muito baixos, o que é esperado no contexto do setor elétrico brasileiro.

### 5.1.3 Aplicação do método índice de Lafitte

O índice de Lafitte, apresentado no item 2.6.3, apresenta a mesma filosofia de aplicação e de cálculo dos métodos anteriores, com o diferencial da utilização de pesos em cada descritor, de acordo com a importância relativa considerada pelo autor. As limitações citadas no índice global de risco também são válidas para o método atual.

A TAB. 5.5 mostra os resultados da aplicação para o grupo de barragens estudado e no Apêndice A.3 a discussão acerca de seus descritores. Já a TAB. 5.6 mostra a classificação final das barragens segundo o índice de risco.

TABELA 5.5 – Pontuação do Índice de Lafitte

Descr	CLASSE ASSOCIADA ÀS CONDICIONANTES LOCAIS (CL)						CLASSE ASSOCIADA À CONFIABILIDADE DA OBRA (FO)						CLASSE ASSOCIADA AOS IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS NO VALE JUSANTE (ISE)			
	Sismicidade (intensidade)	Hidrologia (conhecimento disponível)	Aporte de sedimentos (quantidade)	Clima (condições climáticas)	Geologia (condições geológicas)	Estabilidade dos taludes do reservatório (probabilidade de escorregamentos)	Qualidade do corpo da barragem	Qualidade das fundações	Varição do nível da água no reservatório	Órgãos de descarga	Descarregador de fundo	Monitoramento, operação e manutenção	Conseq. na população a jusante	Conseq. no meio ambiente, estruturas e infraestruturas interferidas	Importância da infraestruturas em estudo	Sistemas de aviso e alerta
	peso 3	peso 4	peso 1	peso 2	peso 3	peso 3	peso 4	peso 4	peso 1	peso 3	peso 2	peso 4	peso 3	peso 1	peso 1	peso 2
UHE	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	$\alpha 4$	$\alpha 5$	$\alpha 6$	$\alpha 7$	$\alpha 8$	$\alpha 9$	$\alpha 10$	$\alpha 11$	$\alpha 12$	$\alpha 13$	$\alpha 14$	$\alpha 15$	$\alpha 16$
EM	$MSK \leq VI$ (1)	Bom (1)	Baixo (1)	Amenas (1)	Boas (1)	Muito reduzida (1)	Aceitável (3)	Boa (1)	Anual ou interanual (1)	Superdimensionado (1)	..	Bons (2)	Mais de 10 fatalidades (6)	Grandes cidades...(5)	Elevada (4)	Existente (3)
IR	$MSK \leq VI$ (1)	Bom (1)	Baixo (1)	Extremas (5)	Boas (1)	Muito reduzida (1)	Boa (1)	Boa (1)	Anual ou interanual (1)	Superdimensionado (1)	..	Bons (2)	Mais de 10 fatalidades (6)	Grandes cidades...(5)	Elevada (4)	Existente (3)
JG	$MSK \leq VI$ (1)	Bom (1)	Baixo (1)	Amenas (1)	Boas (1)	Muito reduzida (1)	Boa (1)	Boa (1)	Anual ou interanual (1)	Superdimensionado (1)	..	Muito bons (1)	Mais de 10 fatalidades (6)	Grandes cidades...(5)	Elevada (4)	Existente (3)
MR	$MSK \leq VI$ (1)	Bom (1)	Baixo (1)	Amenas (1)	Boas (1)	Muito reduzida (1)	Boa (1)	Boa (1)	Anual ou interanual (1)	Superdimensionado (1)	..	Muito bons (1)	Mais de 10 fatalidades (6)	Grandes cidades...(5)	Elevada (4)	Existente (3)
NP	$MSK \leq VI$ (1)	Bom (1)	Baixo (1)	Amenas (1)	Boas (1)	Muito reduzida (1)	Boa (1)	Boa (1)	Anual ou interanual (1)	Superdimensionado (1)	..	Muito bons (1)	Mais de 10 fatalidades (6)	Grandes cidades...(5)	Elevada (4)	Existente (3)
SS	$MSK \leq VI$ (1)	Bom (1)	Baixo (1)	Amenas (1)	Boas (1)	Muito reduzida (1)	Boa (1)	Boa (1)	Anual ou interanual (1)	Superdimensionado (1)	..	Muito bons (1)	Mais de 10 fatalidades (6)	Grandes cidades...(5)	Elevada (4)	Existente (3)
TM	$MSK \leq VI$ (1)	Bom (1)	Baixo (1)	Amenas (1)	Boas (1)	Muito reduzida (1)	Boa (1)	Aceitável (3)	Anual ou interanual (1)	Superdimensionado (1)	..	Bons (2)	Mais de 10 fatalidades (6)	Grandes cidades...(5)	Elevada (4)	Existente (3)
VG	$MSK \leq VI$ (1)	Bom (1)	Baixo (1)	Amenas (1)	Boas (1)	Muito reduzida (1)	Boa (1)	Boa (1)	Anual ou interanual (1)	Superdimensionado (1)	..	Bons (2)	Mais de 10 fatalidades (6)	Grandes cidades...(5)	Elevada (4)	Existente (3)

Legenda:

EM - Emborcação ; IR - Irapé ; JG - Jaguará ; MR - Miranda ; NP - Nova Ponte ; SS - São Simão ; TM - Três Marias ; VG - Volta Grande

TABELA 5.6 – Classificação do índice de Lafitte

BARRAGEM	CL	FO	ISE	IG
Três Marias	1	1,75	4,29	3,09
Emborcação	1	1,75	4,29	3,09
Irapé	1,5	1,25	4,29	3,02
Volta Grande	1	1,25	4,29	2,95
Nova Ponte	1	1	4,29	2,88
Jaguara	1	1	4,29	2,88
São Simão	1	1	4,29	2,88
Miranda	1	1	4,29	2,88

Em que:

CL = índice parcial relativo às condicionantes locais;

FO = índice parcial relativo à confiabilidade da obra;

ISE = índice parcial relativo aos impactos socioeconômicos no vale a jusante;

IG = índice de risco de Lafitte.

#### 5.1.4 Aplicação da metodologia Sabesp

A metodologia de classificação foi desenvolvida para barragens de abastecimento de água, de acordo com características próprias do portfólio de barragens da empresa Sabesp, refletindo por vezes algumas particularidades nos descritores. O método considera somente duas classes.

As fontes de perigo, consideradas em métodos anteriores, não são tratadas na metodologia em questão. A classe de periculosidade potencial tende a retratar a parcela da consequência, mas embute também alguns descritores relativos ao projeto, considerados influentes para os autores e que, na realidade, contribuem com maior ou menor probabilidade de falha. Com relação aos descritores relativos ao projeto, é de se estranhar o fato que o tipo de fundação, geralmente determinante nas incertezas associadas à probabilidade de falha, não seja considerado. Na segunda classe, de estado real da barragem, o método tem a vantagem de trazer uma classificação menos generalista e mais objetiva do que os anteriores, com descritores parcialmente correlacionados com modos de falha. Por exemplo, quando se avalia a percolação, pode-se inferir a relação com a erosão interna, as deformações, com movimentos de massa e a deterioração de taludes com erosão externa e instabilidade. A classe ainda é completada com descritores concernentes ao nível de conhecimento (informações de projeto) e à qualidade do monitoramento (frequência na avaliação do comportamento). A TAB. 5.7 apresenta a aplicação do método, com seus descritores sendo comentados no Apêndice A.4.

TABELA 5.7 – Pontuação da metodologia Sabesp

UHE	PERICULOSIDADE POTENCIAL (PP)							ESTADO REAL DA BARRAGEM (ER)								
	IMPOR- TÂNCIA <sup>1</sup>	DIMEN- SÃO DA BARRA- GEM <sup>2</sup>	VOLUME DE ÁGUA ARMA- ZENADA <sup>3</sup>	IMPACTOS A JUSANTE			TIPO DE BARRA- GEM <sup>7</sup>	ÓRGÃO VER- TENTE <sup>8</sup>	VAZÃO DE PROJETO <sup>9</sup>	INFORMA- ÇÕES DE PROJETO <sup>10</sup>	FREQUEN- CIA AVALLI- ÇÃO DO COMPORTA- MENTO <sup>11</sup>	PERCOLA- ÇÃO <sup>12</sup>	DEFORMA- ÇÕES <sup>13</sup>	NÍVEL DE DETERIO- RAÇÃO DE PARAMEN- TOS OU TALUDES <sup>14</sup>	EROSÕES A JUSANTE <sup>15</sup>	CONDIÇÕES DOS EQUIP. DOS DESCARRE- GADORES <sup>16</sup>
				Social <sup>4</sup>	Ambi- ental <sup>5</sup>	Econô- mico <sup>6</sup>										
EM	Elevada (2)	Grande (2)	Elevado (1)	Grande (0)	Grande (0)	Grande (0)	Enroca- mento (12)	Com controle (10)	VMP ou 10.000 (20)	Completas (5)	Adequada (10)	Fora do previsto, mas não crítica (15)	Críticas (5)	Mínimo ou inexistente (15)	Mínimas ou inexistentes (15)	Boa (15)
IR	Elevada (2)	Grande (2)	Elevado (1)	Grande (0)	Grande (0)	Grande (0)	Enroca- mento (12)	Com controle (10)	VMP ou 10.000 (20)	Completas (5)	Adequada (10)	Fora do previsto, mas não crítica (15)	Fora do previsto, mas não críticas (15)	Mínimo ou inexistente (15)	Mínimas ou inexistentes (15)	Boa (15)
JG	Elevada (2)	Grande (2)	Elevado (1)	Grande (0)	Grande (0)	Grande (0)	Enroca- mento (12)	Com controle (10)	VMP ou 10.000 (20)	Completas (5)	Adequada (10)	Fora do previsto, mas não crítica (15)	Conforme previstas em projeto ou inexistentes (20)	Mínimo ou inexistente (15)	Mínimas ou inexistentes (15)	Boa (15)
MR	Elevada (2)	Grande (2)	Elevado (1)	Grande (0)	Grande (0)	Grande (0)	Terra (8)	Com controle (10)	VMP ou 10.000 (20)	Completas (5)	Adequada (10)	Fora do previsto, mas não crítica (15)	Conforme previstas em projeto ou inexistentes (20)	Mínimo ou inexistente (15)	Mínimas ou inexistentes (15)	Boa (15)
NP	Elevada (2)	Grande (2)	Elevado (1)	Grande (0)	Grande (0)	Grande (0)	Enroca- mento (12)	Com controle (10)	VMP ou 10.000 (20)	Completas (5)	Adequada (10)	Fora do previsto, mas não crítica (15)	Conforme previstas em projeto ou inexistentes (20)	Baixo (12)	Mínimas ou inexistentes (15)	Boa (15)
SS	Elevada (2)	Grande (2)	Elevado (1)	Grande (0)	Grande (0)	Grande (0)	Terra (8)	Com controle (10)	VMP ou 10.000 (20)	Completas (5)	Adequada (10)	Fora do previsto, mas não crítica (15)	Conforme previstas em projeto ou inexistentes (20)	Baixo (12)	Mínimas ou inexistentes (15)	Boa (15)
TM	Elevada (2)	Grande (2)	Elevado (1)	Grande (0)	Grande (0)	Grande (0)	Terra (8)	Com controle (10)	VMP ou 10.000 (20)	Completas (5)	Adequada (10)	Crítica (5)	Conforme previstas em projeto ou inexistentes (20)	Mínimo ou inexistente (15)	Mínimas ou inexistentes (15)	Boa (15)
VG	Elevada (2)	Grande (2)	Elevado (1)	Grande (0)	Grande (0)	Grande (0)	Terra (8)	Com controle (10)	VMP ou 10.000 (20)	Completas (5)	Adequada (10)	Fora do previsto, mas não crítica (15)	Conforme previstas em projeto ou inexistentes (20)	Baixo (12)	Mínimas ou inexistentes (15)	Boa (15)

Legenda:

EM - Emborcação ; IR - Irapé ; JG - Jaguará ; MR - Miranda ; NP - Nova Ponte ; SS - São Simão ; TM - Três Marias ; VG - Volta Grande

O índice de risco da metodologia é consolidado pelo índice de comportamento (IC) e, diferentemente de todos os outros métodos apresentados, quanto menor a pontuação, maior é o risco da barragem. A TAB. 5.8 resume a classificação final das barragens com base no índice de comportamento (IC).

TABELA 5.8 – Classificação da metodologia Sabesp

BARRAGEM	PP	ER	IC
Emborcação	47	80	66,8
Três Marias	43	85	68,8
Volta Grande	43	95	72,4
São Simão	43	95	72,4
Irapé	47	90	72,8
Nova Ponte	47	95	74,0
Miranda	43	95	74,2
Jaguara	47	95	75,8

Em que:

PP = periculosidade potencial;

ER = estado real da barragem;

IC = índice de comportamento.

De acordo com a apreciação de risco proposto por Kuperman *et al.* (2001), os valores de índice de comportamento das barragens são enquadrados nas categorias transcritas a seguir, confirmando, de modo geral, o bom desempenho das estruturas:

- Volta Grande, São Simão, Irapé, Nova Ponte, Miranda e Jaguara:

$IC > 70$  = Normalidade: não há defeitos reportáveis; caracteriza a barragem ou situação que não possui qualquer restrição à operação ou que comprometa a segurança da estrutura. Não requer quaisquer ações imediatas.

- Emborcação e Três Marias:

$60 < IC \leq 70$  = Atenção: existem alguns defeitos que não comprometem seu desempenho; as anomalias ou restrições não apresentam risco à segurança da barragem a curto prazo, porém devem ser controladas e monitoradas. Levantamentos e estudos devem ser realizados para confirmar ou alterar seu índice de comportamento. Não há, ainda, necessidade de priorizar eventuais intervenções corretivas.



### 5.1.5 Aplicação da metodologia Cemig

A metodologia de classificação de barragens da Cemig, baseada em índices, traz algumas inovações em relação aos métodos anteriores. O método apresenta mais dinamismo por estar integrado diretamente com o banco de dados de deteriorações das barragens, alimentado majoritariamente pela avaliação realizada durante inspeções visuais periódicas. Com isso, é possível não só classificar as barragens, como também hierarquizar cada problema individualmente, contribuindo na priorização específica das ações de segurança e, posteriormente, verificando o efeito dos reparos na redução do risco. A metodologia também explicita melhor o referencial teórico e conceito fundamental do risco, pontuando índices que, de forma agregada, refletem as componentes de probabilidade e consequência. A visualização dos riscos é facilmente realizada por meio da representação em matriz de risco própria.

Como deficiências da metodologia, verifica-se a inexistência de descritores que pontuem as fontes de perigo, bem como as deteriorações não estarem correlacionadas automaticamente com os modos de falha. O valor da parcela da probabilidade de falha, por conseguinte do risco (R), também é aberto (sem limite ou valor máximo), gerando a tendência de que estruturas de maior porte expressem maiores valores de probabilidade em função de uma maior quantidade de registros de campo (lista de deteriorações). No entanto, o critério de seleção da amostra, representada somente por grandes barragens, minimiza esse problema na aplicação atual.

Os descritores relativos ao potencial de risco (P) retratam características intrínsecas do projeto e, com exceção da idade, são imutáveis. Já a vulnerabilidade é subdividida em duas parcelas: a primeira delas ( $V_p$ ), associada ao atendimento a critérios de projeto, é mais estática, embora possa ser alterada com a execução de estudos, investigações, alteração em regras operativas e obras de melhorias; e a segunda,  $V_m$ , índice ligado às condições de manutenção, é a parcela mais dinâmica do método, afetada pelas deteriorações identificadas atualmente nas barragens e que compõem o banco de dados do sistema informatizado. A consequência, a não ser que haja uma repotenciação da usina ou alterações de ocupação no vale a jusante, é praticamente fixa.

A TAB. 5.9 apresenta a pontuação da metodologia para o grupo de barragens e seus índices são discutidos no Apêndice A.5. A TAB. 5.10 representa a classificação das barragens, ordenadas pelo risco estimado.

TABELA 5.9 – Pontuação da metodologia Cemig

UHE	POTENCIAL DE RISCO (P)			VULNERABILIDADE (V)											CONSEQUÊNCIA (C)			
	TIPO BARRAGEM Pb	TIPO FUNDAÇÃO Pf	IDADE Pi	ESTRUTURAS DE TERRA (Vp)				ESTRUTURAS DE CONCRETO (Vp)			EXTRAVASORES (Vp)				(Vm)	Cg	Cr	Cj
				Borda livre peso 5	Estabilidade peso 5	Dimensionamento drenagem transições peso 5	Tratamento fundações peso 5	Borda livre peso 5	Estabilidade peso 5	Tratamento fundações peso 5	Vazão de projeto peso 50	Estabilidade peso 5	Tratamento fundação peso 5	Regras operativas peso 5	Deteriorações existentes G x U	Potência instalada (MW) Cg	Volume do reservatório Cr	Danos a jusante Cj
EM	Enrocamento (80)	Rocha tratada (30)	32 (10)	Atende (0)	Atende (0)	Não atende (4)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	151,5	> 500 (3)	x > 5000 (4)	Elevados (3)
IR	Enrocamento (80)	Rocha tratada (30)	8 (100)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	..	..	..	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	157	250 < x < 500 (2)	x ≥ 5000 (4)	Elevados (3)
JG	Enrocamento (80)	Rocha tratada (30)	43 (6)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	140,5	250 < x < 500 (2)	50 < x < 500 (2)	Elevados (3)
MR	Terra (100)	Solo /aluvião tratado (80)	16 (40)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	39,5	250 < x < 500 (2)	500 ≤ x < 5000 (3)	Elevados (3)
NP	Enrocamento (80)	Rocha sã (10)	20 (26)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	101,5	> 500 (3)	x ≥ 5000 (4)	Elevados (3)
SS	Terra (100)	Solo /aluvião tratado (80)	35 (9)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	35	> 500 (3)	x ≥ 5000 (4)	Elevados (3)
TM	Terra (100)	Solo /aluvião (100)	52 (4)	Atende (0)	Atende (0)	Não atende (4)	Não atende (4)	..	..	..	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	151	250 < x < 500 (2)	x ≥ 5000 (4)	Elevados (3)
VG	Terra (100)	Solo /aluvião tratado (80)	39 (7)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	Atende (0)	175	250 < x < 500 (2)	500 ≤ x < 5000 (3)	Elevados (3)

Legenda: EM - Emborcação ; IR - Irapé ; JG - Jaguará ; MR - Miranda ; NP – Nova Ponte ; SS - São Simão ; TM - Três Marias ; VG - Volta Grande

TABELA 5.10 – Classificação da metodologia CEMIG

BARRAGEM	P	V <sub>p</sub>	V <sub>m</sub>	Prob. (P+V)	C	R
Três Marias	204	40	151	395	9	3555
Irapé	210	0	157	367	9	3303
Emborcação	120	20	151,5	291,5	10	2915
Volta Grande	187	0	175	362	8	2896
São Simão	189	0	35	224	10	2240
Nova Ponte	116	0	101,5	217,5	10	2175
Miranda	220	0	39,5	259,5	8	2076
Jaguara	133	0	140,5	273,5	7	1914,5

Em que:

P = potencial de risco;

V<sub>p</sub> = índice de adequação aos critérios de projeto atuais (Vulnerabilidade dos aspectos de projeto);

V<sub>m</sub> = índice da condição atual das estruturas (Vulnerabilidade quanto aos aspectos de manutenção);

(P+V) = probabilidade;

C = consequência;

R = risco estimado.

Considerando os 11 anos de monitoramento dos descritores e seu desempenho histórico, pode-se extrapolar uma proposta de apreciação de riscos das barragens por meio de uma correlação entre a curva F-N sugerida por ANCOLD (2003), FIG. 5.1, e a matriz de risco qualitativa da Cemig, FIG. 2.17. O resultado é apresentado na FIG. 5.2.

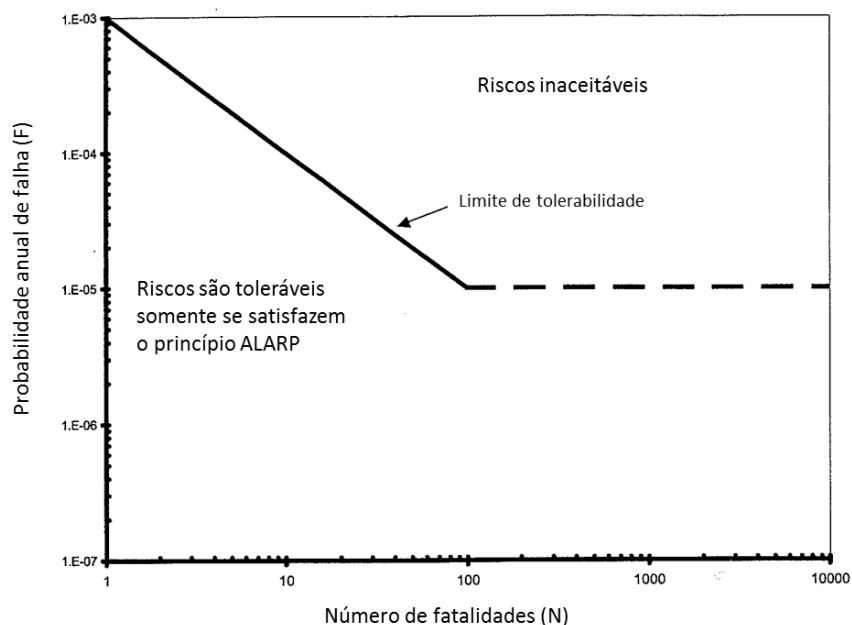


FIGURA 5.1 – Curva F-N - Diretriz de risco societal para barragens existentes

Fonte: ANCOLD, 2003, p. 47.

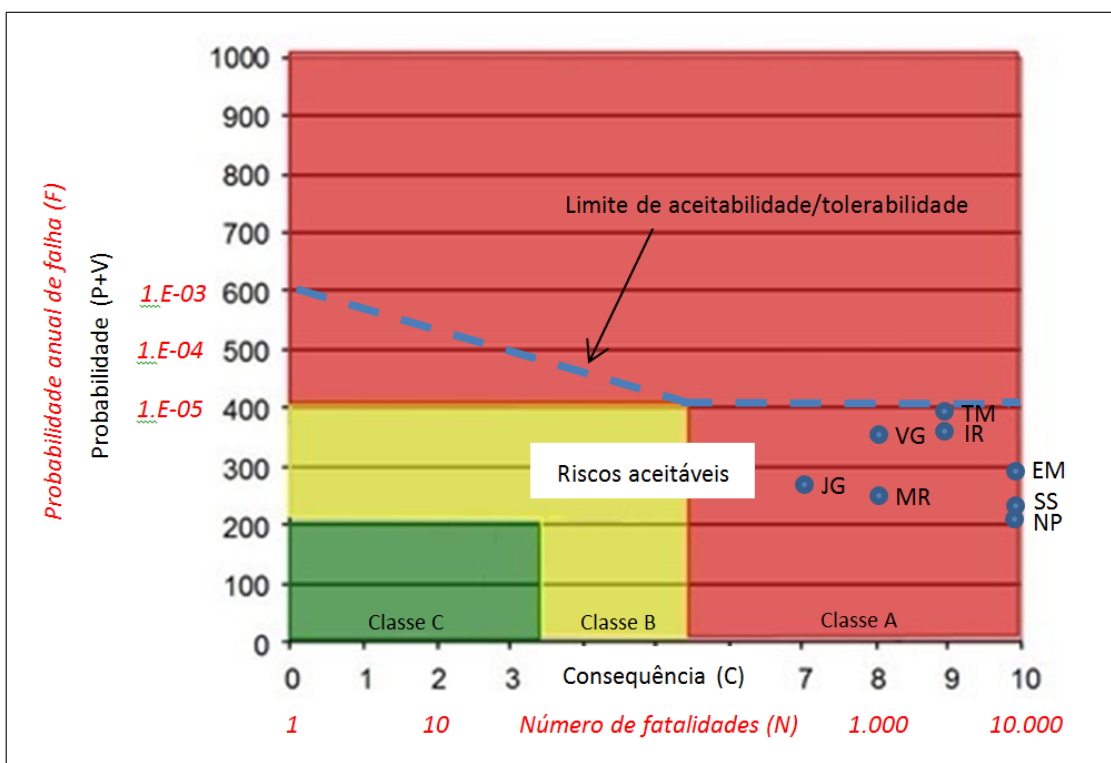


FIGURA 5.2 – Proposta de apreciação de riscos conjugando matriz de risco e curva F-N

Ressalva-se que as associações dos valores quantitativos e qualitativos são aproximações baseadas na percepção adquirida pela Cemig ao longo dos vários anos de utilização do método. A estimativa da consequência também não representa valores reais, mas sim uma adequação com o eixo das abcissas da curva F-N. Valores fidedignos devem ser calculados com base em métodos quantitativos de risco.

### 5.1.6 Aplicação do método potencial de risco

De forma bem similar à metodologia Cemig, o método potencial de risco busca traduzir o conceito fundamental do risco, expresso pelas parcelas de probabilidade e consequência. A periculosidade, associada aos dados de projeto, é equivalente ao índice potencial de risco da metodologia Cemig. Já a parcela de vulnerabilidade, tal qual o método antecessor, está ligada à avaliação da segurança das barragens, por meio das atividades de coleta e análise da instrumentação, inspeções periódicas e banco de dados de deteriorações. A importância, obviamente, é equivalente à consequência.

As deficiências também recaem nas fontes de perigo, contempladas parcialmente no método, assim como no fato das deteriorações estarem parcialmente correlacionadas com os modos de falha. A TAB. 5.11 indica a pontuação das barragens de acordo com o método. Os descritores são justificados no Apêndice A.6.

TABELA 5.11 – Pontuação do potencial de risco

UHE	PERICULOSIDADE (P)					VULNERABILIDADE (V)							IMPORTÂNCIA (I)		
	DIMENSÃO DA BARRAGEM <sup>1</sup>	VOL. TOTAL DO RESERVATÓRIO <sup>2</sup>	TIPO DE BARRAGEM <sup>3</sup>	TIPO DE FUNDAÇÃO <sup>4</sup>	VAZÃO DE PROJETO <sup>5</sup>	TEMPO DE OPERAÇÃO <sup>6</sup>	EXISTÊNCIA DE PROJETO (AS BUILT) <sup>7</sup>	CONFIABILIDADE ESTRUTURAS VERTEICOURAS. <sup>8</sup>	TOMADA DE ÁGUA <sup>9</sup>	PERCOLAÇÃO <sup>10</sup>	DEFORMAÇÕES AFUNDAMENTO ASSENTAMENTOS <sup>11</sup>	DETRIOARAÇÃO DOS TALUDES / PARAMENTOS <sup>12</sup>	VOL. ÚTIL (hm <sup>3</sup> ) <sup>13</sup>	POPULAÇÃO A JUSANTE <sup>14</sup>	CUSTO DA BARRAGEM <sup>15</sup>
EM	Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)	Muito grande > 800hm <sup>3</sup> (10)	Terra Enrocamento (8)	Rocha (1)	Decamilar (1)	> 30 anos (0)	Existe <i>as built</i> (1)	Muito satisfatória (2)	Satisfatória (1)	Sinais de umedecimento (4)	Depressão na crista, afundamentos nos taludes, trincas (10)	Falhas no rip-rap e na proteção de jusante (3)	Grande > 800 (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
IR	Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)	Muito grande > 800hm <sup>3</sup> (10)	Terra Enrocamento (8)	Rocha (1)	Decamilar (1)	de 5 a 10 anos (2)	Existe <i>as built</i> (1)	Muito satisfatória (2)	Satisfatória (1)	Sinais de umedecimento (4)	Ondulações pronunciadas, fissuras (6)	Inexistente (1)	Grande > 800 (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
JG	20 ≤ Altura ≤ 50m ou Comprimento 200m a 3000m (6)	Regular 200 a 800hm <sup>3</sup> (7)	Terra Enrocamento (8)	Rocha alterada Saprolito (4)	Decamilar (1)	> 30 anos (0)	Existe <i>as built</i> (1)	Muito satisfatória (2)	Satisfatória (1)	Sinais de umedecimento (4)	Pequenos abatimentos da crista (2)	Falhas no rip-rap e na proteção de jusante (3)	Médio 200 a 800 (1,5)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
MR	Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)	Muito grande > 800hm <sup>3</sup> (10)	Terra (10)	Rocha alterada Saprolito (4)	Decamilar (1)	de 10 a 30 anos (1)	Existe <i>as built</i> (1)	Muito satisfatória (2)	Satisfatória (1)	Sinais de umedecimento (4)	Pequenos abatimentos da crista (2)	Falhas no rip-rap e na proteção de jusante (3)	Grande > 800 (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
NP	Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)	Muito grande > 800hm <sup>3</sup> (10)	Terra Enrocamento (8)	Rocha (1)	Decamilar (1)	de 10 a 30 anos (1)	Existe <i>as built</i> (1)	Muito satisfatória (2)	Satisfatória (1)	Sinais de umedecimento (4)	Inexistente (0)	Falhas no rip-rap e na proteção de jusante (3)	Grande > 800 (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
SS	Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)	Muito grande > 800hm <sup>3</sup> (10)	Terra (10)	Solo residual / Aluvião até 4m (5)	Decamilar (1)	> 30 anos (0)	Existe <i>as built</i> (1)	Muito satisfatória (2)	Satisfatória (1)	Sinais de umedecimento (4)	Pequenos abatimentos da crista (2)	Falhas no rip-rap e na proteção de jusante (3)	Grande > 800 (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
TM	Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)	Muito grande > 800hm <sup>3</sup> (10)	Terra (10)	Solo residual / Aluvião até 4m (5)	Decamilar (1)	> 30 anos (0)	Existe <i>as built</i> (1)	Muito satisfatória (2)	Satisfatória (1)	Zonas úmidas (6)	Pequenos abatimentos da crista (2)	Falhas no rip-rap e na proteção de jusante (3)	Grande > 800 (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
VG	Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)	Muito grande > 800hm <sup>3</sup> (10)	Terra (10)	Solo residual / Aluvião até 4m (5)	Decamilar (1)	> 30 anos (0)	Existe <i>as built</i> (1)	Muito satisfatória (2)	Satisfatória (1)	Sinais de umedecimento (4)	Inexistente (0)	Falhas no rip-rap e na proteção de jusante (3)	Grande > 800 (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)

Legenda:

EM - Emborcação ; IR - Irapé ; JG - Jaguará ; MR - Miranda ; NP - Nova Ponte ; SS - São Simão ; TM - Três Marias ; VG - Volta Grande

A TAB. 5.12 mostra a classificação do método para o grupo de barragens, ordenadas pelo potencial de risco (PR).

TABELA 5.12 – Classificação da metodologia Potencial de Risco

BARRAGEM	P	V	I	PR
Emborcação	30	21	2	51
Três Marias	36	15	2	51
Miranda	35	14	2	49
São Simão	36	13	2	49
Volta Grande	36	13	2	49
Irapé	30	17	2	47
Nova Ponte	30	12	2	42
Jaguara	26	13	1,83	35,7

Em que:

P = periculosidade;

V = vulnerabilidade;

I = importância;

PR = potencial de risco.

Importante salientar que a fórmula referente ao potencial de risco (PR) contida na publicação oficial do Ministério da Integração Nacional (MIN, 2002) está errada, pois a importância (I) encontra-se presente no denominador da equação. O índice deveria constar no numerador, já que o risco é equivalente à probabilidade (P+V) multiplicada pela consequência. O cálculo correto pode ser confirmado em Menescal *et al.* (2001b), em conformidade com a EQ. 2.27 apresentada no capítulo 2.

Quando à apreciação de riscos, de acordo com MIN (2002), as barragens selecionadas se enquadram na classe B, equivalente a um potencial de risco médio. As exceções ocorrem para a barragem de Emborcação, inserida na classe A, pelos motivos justificados no descritor relativo às deformações (Apêndice A.6) e para a barragem de Jaguara, classe C, devido ao volume inferior do seu reservatório, característica essa duplamente pontuada nas classes de periculosidade e importância.

A metodologia, por retratar o referencial do risco, também poderia apresentar uma matriz de risco a fim de melhor orientar a etapa de apreciação de riscos.

### 5.1.7 Aplicação das matrizes de classificação da Lei 12.334

A Resolução nº 143 de julho de 2012 do CNRH estabelece critérios gerais de classificação de barragens, em atendimento à Lei 12.334. Para essa finalidade utiliza matrizes de classificação de barragens.

As matrizes referentes às barragens de acumulação de água, com respectivas pontuações para o grupo de barragens, estão dispostas de forma agrupada na TAB. 5.13 (características técnicas e plano de segurança da barragem) e TAB. 5.14 (estado de conservação e dano potencial associado). As justificativas dos descritores estão contidas no Apêndice A.7.

Novamente destaca-se que o sistema de classificação está em fase de regulamentação pela Aneel, portanto suas matrizes estão sujeitas a alterações no que se refere às barragens hidrelétricas, podendo afetar diretamente os resultados de classificação apresentados. No entanto, como as diretrizes de classificação são impostas pelo CNRH, estima-se que as modificações sejam mínimas, mantendo a estrutura atual da metodologia.

A metodologia absorve classes e descritores de todos os métodos antecessores, mostrando que é uma evolução do conhecimento anterior sobre esse assunto. A matriz de características técnicas está relacionada aos dados básicos do projeto, sendo equivalente à classe de periculosidade do método potencial de risco. A matriz de estado de conservação também tem bastante similaridade com as classes de vulnerabilidade (do método potencial de risco) e estado real da barragem (da metodologia Sabesp). Já o dano potencial associado, como em vários dos métodos, reflete as consequências que decorrem de uma eventual ruptura da barragem.

A novidade é observada na classe relativa ao plano de segurança de barragens, buscando com isso auditar a gestão de risco mantida pelos proprietários de barragens, um ponto que impacta diretamente a segurança de barragens. Vale lembrar que o plano de segurança de barragens também é um dos instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Diante da classificação de barragens estar sob responsabilidade de cada empreendedor e da importância do método para a segurança de barragens no Brasil, é fundamental que também sejam definidas orientações e critérios de classificação dos descritores utilizados no método, visando dirimir quaisquer dúvidas na aplicação. Uma proposta de avaliação que pode ser utilizada com esse objetivo é aquela apresentada por Carim *et al.* (2010).

TABELA 5.13 – Pontuação matrizes de classificação Lei 12.334 – CT e PS

UHE	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT)						PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM (PS)				
	ALTURA (a)	COMPRI-MENTO (b)	TIPO DE BARRAGEM (c)	TIPO DE FUNDAÇÃO (d)	IDADE (e)	VAZÃO DE PROJETO (f)	EXISTÊNCIA DE DOCUMENTAÇÃO (n)	ESTRUTURA ORGANIZACIONAL E QUALIFICAÇÃO TÉCNICA DA EQUIPE DE SEGURANÇA (o)	PROCEDIMENTOS DE ROTEIROS DE INSPEÇÕES DE SEGURANÇA E DE MONITORAMENTO (p)	REGRA OPERACIONAL DOS DISPOSITIVOS DE DESCARGA DA BARRAGEM (q)	RELATÓRIOS DE INSPEÇÃO DE SEGURANÇA COM ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO (r)
EM	H > 60m (3)	Comprimento > 200m (3)	Terra homogênea /Enrocamento / Terra Enrocamento (3)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	Entre 30 e 50 anos (1)	Decamilenar ou CMP - TR=10.000 anos (3)	Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura org. com responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
IR	H > 60m (3)	Comprimento > 200m (3)	Terra homogênea /Enrocamento / Terra enrocamento (3)	Rocha alterada sem tratamento / Rocha alterada fraturada com tratamento (3)	Entre 5 e 10 anos (3)	Decamilenar ou CMP - TR=10.000 anos (3)	Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura org. com responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
JG	30m ≤ H ≤ 60m (2)	Comprimento > 200m (3)	Terra homogênea /Enrocamento / Terra enrocamento (3)	Rocha alterada sem tratamento / Rocha alterada fraturada com tratamento (3)	Entre 30 e 50 anos (1)	Decamilenar ou CMP - TR=10.000 anos (3)	Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura org. com responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
MR	H > 60m (3)	Comprimento > 200m (3)	Terra homogênea /Enrocamento / Terra enrocamento (3)	Rocha alterada mole / Saprolito / Solo compacto (4)	Entre 10 e 30 anos (2)	Decamilenar ou CMP - TR=10.000 anos (3)	Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura org. com responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
NP	H > 60m (3)	Comprimento > 200m (3)	Terra homogênea /Enrocamento / Terra enrocamento (3)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	Entre 10 e 30 anos (2)	Decamilenar ou CMP - TR=10.000 anos (3)	Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura org. com responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
SS	H > 60m (3)	Comprimento > 200m (3)	Terra homogênea /Enrocamento / Terra enrocamento (3)	Rocha alterada mole / Saprolito / Solo compacto (4)	Entre 30 e 50 anos (1)	Decamilenar ou CMP - TR=10.000 anos (3)	Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura org. com responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
TM	H > 60m (3)	Comprimento > 200m (3)	Terra homogênea /Enrocamento / Terra enrocamento (3)	Solo residual / aluvião (5)	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4)	Decamilenar ou CMP - TR=10.000 anos (3)	Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura org. com responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
VG	30m ≤ H ≤ 60m (2)	Comprimento > 200m (3)	Terra homogênea /Enrocamento / Terra enrocamento (3)	Rocha alterada mole / Saprolito / Solo compacto (4)	Entre 30 e 50 anos (1)	Decamilenar ou CMP - TR=10.000 anos (3)	Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura org. com responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)

Legenda: EM - Emborcação ; IR - Irapé ; JG - Jaguará ; MR - Miranda ; NP - Nova Ponte ; SS - São Simão ; TM - Três Marias ; VG - Volta Grande



TABELA 5.14 – Pontuação matrizes de classificação Lei 12.334 – EC e DPA

UHE	ESTADO DE CONSERVAÇÃO (EC)						DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)				
	CONFIABILIDADE DAS ESTRUTURAS EXTRAVASORAS (g)	CONFIABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE ADUÇÃO (h)	PERCOLAÇÃO (i)	DEFORMAÇÕES E RECALQUES (j)	DETERIORAÇÃO DOS TALUDES / PARAMENTOS (l)	ECLUSA (m)	VOLUME TOTAL DO RESERVATÓRIO (s)	POTENCIAL PERDAS DE VIDAS HUMANAS (t)	IMPACTO AMBIENTAL (u)	IMPACTO SOCIOECONÔMICO (v)	
EM	Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizada e/ou monitorada (3)	Trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Não possui eclusa (0)	Muito grande > 200hm <sup>3</sup> (5)	Existente (12)	Significativo (3)	Alto (8)	
IR	Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizada e/ou monitorada (3)	Trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Inexistente (0)	Não possui eclusa (0)	Muito grande > 200hm <sup>3</sup> (5)	Existente (12)	Muito significativo (5)	Alto (8)	
JG	Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizada e/ou monitorada (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Não possui eclusa (0)	Muito grande > 200hm <sup>3</sup> (5)	Existente (12)	Significativo (3)	Alto (8)	
MR	Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizada e/ou monitorada (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Não possui eclusa (0)	Muito grande > 200hm <sup>3</sup> (5)	Existente (12)	Muito significativo (5)	Alto (8)	
NP	Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizada e/ou monitorada (3)	Inexistente (0)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Não possui eclusa (0)	Muito grande > 200hm <sup>3</sup> (5)	Existente (12)	Muito significativo (5)	Alto (8)	
SS	Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizada e/ou monitorada (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Não possui eclusa (0)	Muito grande > 200hm <sup>3</sup> (5)	Existente (12)	Significativo (3)	Alto (8)	
TM	Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Não possui eclusa (0)	Muito grande > 200hm <sup>3</sup> (5)	Existente (12)	Muito significativo (5)	Alto (8)	
VG	Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Inexistente (0)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Não possui eclusa (0)	Muito grande > 200hm <sup>3</sup> (5)	Existente (12)	Muito significativo (5)	Alto (8)	

Legenda: EM - Emborcação ; IR - Irapé ; JG - Jaguará ; MR - Miranda ; NP - Nova Ponte ; SS - São Simão ; TM - Três Marias ; VG - Volta Grande

A TAB. 5.15 resume a classificação de barragens segundo a Lei 12.334.

TABELA 5.15 – Classificação com base na Lei 12.334

BARRAGEM	CT	EC	PS	CRI	DPA	R
Três Marias	21	7	0	28	30	840
Irapé	18	8	0	26	30	780
Emborcação	15	9	0	24	28	672
Volta Grande	16	6	0	22	30	660
Miranda	18	5	0	23	28	644
São Simão	17	5	0	22	28	616
Nova Ponte	16	4	0	20	30	600
Jaguara	15	5	0	20	28	560

Em que:

CT = características técnicas;

EC = estado de conservação;

PS = plano de segurança da barragem;

CRI = categoria de risco;

DPA = dano potencial associado;

R = risco.

Ressalta-se que não há valores de referência para apreciação do risco, porque seu cálculo foi extrapolado pela composição dos valores de CRI e DPA, não explícito na lei. Acrescenta-se que o relatório de segurança de barragens emitido pela ANA ainda encontra-se em fase de consolidação de dados, impossibilitando visualizar o panorama dos índices das barragens brasileiras - o primeiro relatório da ANA foi emitido em 2013 (ANA, 2013), referente à situação de 2011. Por outro lado, a Resolução nº 143 do CNRH apresenta faixas de apreciação para CRI e DPA, mostrando que as barragens da Cemig encontram-se todas classificadas em categoria de risco baixo ( $\leq 35$ ) e dano potencial alto ( $\geq 16$ ).

## 5.2 Classificação final dos métodos de análise preliminar de risco em portfólio

Tendo por base as aplicações realizadas no item 5.1 relativas aos métodos de análise preliminar de risco em portfólio, a TAB. 5.16 sintetiza a posição de classificação das barragens de acordo com os diversos índices de risco calculados.

TABELA 5.16 – Classificação das barragens em variados métodos

BARRAGEM	5.1.1 $\alpha_g$	5.1.2 $\alpha_g$	5.1.3 IG	5.1.4 IC	5.1.5 R	5.1.6 PR	5.1.7 R
Emborcação	2°	1°	1°	1°	3°	1°	3°
Irapé	1°	3°	3°	3°	2°	6°	2°
Jaguara	8°	8°	5°	8°	8°	8°	8°
Miranda	6°	6°	5°	7°	7°	3°	5°
Nova Ponte	5°	5°	5°	6°	6°	7°	7°
São Simão	7°	6°	5°	3°	5°	3°	6°
Três Marias	2°	1°	1°	2°	1°	1°	1°
Volta Grande	4°	4°	4°	3°	4°	3°	4°

Em que:

$\alpha_g$  = índice global de risco (métodos índice global de risco e índice global de risco modificado);

IG = índice de risco (método índice de Lafitte);

IC = índice de comportamento (metodologia Sabesp);

R = risco estimado (metodologia Cemig);

PR = potencial de risco (metodologia potencial de risco);

R = risco (metodologia Lei 12.334).

Importante observar que dentro de um mesmo método existem barragens com posição equivalente. Essa lógica de classificação foi considerada quando valores de índice de risco de diferentes barragens são iguais.

Da TAB. 5.16 depreende-se que as barragens de Emborcação, Irapé e Três Marias se revezam nas classificações entre as primeiras posições. A barragem de Volta Grande segue uma classificação intermediária bem definida. Um terceiro grupo de barragens - Miranda, Nova Ponte e São Simão - também se alterna nas posições da parte final das classificações, enquanto que Jaguara, recorrentemente, assume a última posição.

Com relação ao primeiro grupo de barragens constituído pelas três estruturas de maior risco, nota-se que a barragem de Emborcação é muito afetada pelos descritores que pontuam a falta de confiabilidade no dimensionamento estrutural relativo à incompatibilidade das deformações dos diferentes materiais que compõem o corpo do aterro (deficiência no projeto). Já a barragem de Irapé se destaca, de modo geral, nas fontes de perigo e nos descritores que pontuam a ocorrência de trincas e deformações na barragem. A classificação de Três Marias reflete o problema de percolações indevidas através do aterro e fundações que ocorrem desde o início da operação, além de seu maior potencial de risco em função de características do barramento (barragem de terra e

fundação em aluvião) quando comparada às duas primeiras barragens citadas, de terra-enrocamento e assentes em rocha. A única anomalia na classificação desse primeiro grupo ocorre na metodologia do potencial de risco, onde Irapé encontra-se na sexta posição. Isso decorre do desequilíbrio nas pontuações do método, com peso excessivo na classe de periculosidade (características técnicas do projeto) quando comparado à classe de vulnerabilidade (condição atual da barragem), o que faz com que barragens de terra assentes em solo sejam classificadas como de maior risco, ainda que as condições de manutenção sejam favoráveis e não haja indícios de problemas, seja pelas inspeções visuais ou pelas informações advindas da instrumentação.

Da parte de baixo da tabela, destaca-se a barragem de Jaguará, que pelo seu reservatório de volume consideravelmente inferior aos demais, tem sua classe de consequência favoravelmente afetada quando se computa o risco da barragem.

Buscando-se facilitar a compreensão da TAB. 5.16 e ainda obter uma classificação final consolidada, atribui-se uma escala de notas de um a oito às respectivas posições (1° a 8°). Desse modo, as barragens classificadas com maiores riscos receberão menores pontuações e vice-versa, tendo como resultado a TAB. 5.17.

TABELA 5.17 – Classificação consolidada baseada nos sete métodos

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°

Em virtude dos resultados apresentados na TAB. 5.17, a segunda fase de aplicação dos métodos de análise de risco em barragens individuais se dará para as estruturas de Três Marias e Emborcação, identificadas com maiores riscos dentre as barragens selecionadas da Cemig GT.

É importante ressaltar que, embora as duas barragens estejam classificadas com os maiores riscos, pelas referências de apreciações de riscos mostradas em vários dos métodos, essas estruturas

certamente não representam riscos elevados, devido às probabilidades de rupturas extremamente baixas. As barragens do setor elétrico são reconhecidamente bem construídas, operadas e mantidas.

### **5.3 Aplicação dos métodos de análise de risco em barragens individuais**

Os resultados dos métodos de análise de risco em barragens individuais, para as duas estruturas selecionadas no item 5.2 (Três Marias e Emborcação), são apresentados nos itens 5.3.1 (diagrama LCI) e 5.3.2 (FMEA).

#### **5.3.1 Aplicação do método LCI**

O diagrama LCI, descrito no item 2.6.9, tem a vantagem de ser um método criado especificamente para aplicação em barragens, baseado em registros históricos de incidentes em barragens. No entanto, os dados históricos são relativos às barragens do Reino Unido, o que pode gerar distorções quando generalizados para outras amostras de barragens, especialmente barragens de terra brasileiras, constituídas por solos tropicais.

O primeiro estágio, relativo à avaliação de impacto, tem como finalidade o cálculo do índice global de impacto (IGI). Como já discutido, a avaliação da consequência, embora seja uma parcela fundamental para obtenção do risco, é tratada de forma qualitativa e global neste estudo, por não ter correlação com o caráter geotécnico do presente programa.

Considerando que as barragens de Emborcação e Três Marias possuem reservatórios da mesma ordem de grandeza em uma eventual liberação do volume armazenado (17.724 hm<sup>3</sup> e 19.528 hm<sup>3</sup>, respectivamente) e que os vales a jusante são densamente habitados, a estimativa para a consequência foi avaliada de forma equivalente para ambas as barragens.

As pontuações, realizadas de acordo com a TAB. 2.23 do capítulo 2, são mostradas nas TAB. 5.18 e 5.19. As estimativas das pessoas em risco (PAR) foram adotadas como sendo os maiores valores disponíveis em cada categoria de impacto da tabela 2.23. Para o vale entre 5 e 30 km foi adotado, especificamente na categoria de impacto tipo 1, um valor que, somado ao do vale próximo, gera um PPV total (perda potencial de vidas humanas) equivalente ao fornecido pelas curvas F-N (eixo das ordenadas = 10.000) das FIG. 2.13 e 5.1, mesmo reconhecendo as limitações dessa abordagem. Essas simplificações não implicaram em distorções importantes no resultado, tendo em vista a alta

magnitude dos impactos para as barragens em análise e pelo fato do método LCI não estar sendo empregado, neste momento, para análise comparativa de um portfólio de barragens.

TABELA 5.18 – Avaliação do índice global de impacto para o vale inferior a 5 km

IMPACTO	PONTUAÇÃO DE IMPACTO	PESO	PONTUAÇÃO FINAL	PAR	PPV
1	4	0,15	0,60	1000	500
2	4	0,15	0,60	1000	500
3	3	0,10	0,30	100	50
4	4	0,05	0,20	100	50
5	2	0,25	0,50	..	..
6	3	0,25	0,75	..	..
7	3	0,05	0,15	..	..
Total	..	..	<b>3,10</b>	..	<b>1100</b>

TABELA 5.19 – Avaliação do índice global de impacto para o vale de 5 km a 30 km

IMPACTO	PONTUAÇÃO DE IMPACTO	PESO	PONTUAÇÃO FINAL	PAR	PPV
1	4	0,15	0,60	...	9500
2	4	0,15	0,60	1000	500
3	4	0,10	0,40	100	50
4	4	0,05	0,20	100	50
5	4	0,25	1,00	..	..
6	4	0,25	1,00	..	..
7	4	0,05	0,20	..	..
Total	..	..	<b>4,00</b>	..	<b>9595</b>

O índice global de impacto para as barragens de Emborcação e Três Marias é estimado com base na EQ. 2.36, cujo resultado é mostrado na EQ. 5.1.

$$IGI = 100 \times 3,1 + 1.100 + 30 \times 4 + 9.595 = 11.125 \quad (5.1)$$

O segundo estágio define os estudos subsequentes. Como esperado, as barragens de Três Marias e Emborcação são classificadas com impacto alto ( $IGI > 750$ ), exigindo a avaliação por meio do diagrama LCI (etapa 3). Segundo o método, o impacto alto também exige a reanálise da etapa 1 com o uso de modelos numéricos de propagação da onda de cheia de ruptura, fora do escopo deste estudo.

Os diagramas LCI das barragens de Três Marias e Emborcação são apresentados em forma tabular nas TAB. 5.20 e 5.21, respectivamente. O diagrama LCI utilizado é o original de barragens de aterro com altura superior a 30m e construção pós 1960, desenvolvido por Hughes *et al.* (2000).

TABELA 5.20 – Diagrama LCI Três Marias

LOCALIZAÇÃO		CAUSA	INDICADOR	CONS	PROB.	CONF.	IND <sub>ord</sub>	IND <sub>crit</sub>	IND <sub>conf</sub>	IND <sub>risco</sub>	
Maciço da barragem, fundação e ombreiras	Recalque	Trincas / fissuras na barragem e estruturas anexas		2	2	1	4	4	1	44.499	
		Danos nas interfaces barragem/estruturas anexas e/ou ombreiras		2	1	1	2	2	1	22.250	
		Percolação / infiltração		4	4	2	16	32	2	355.993	
		Erosão interna		5	2	3	10	30	3	333.744	
		Redução da borda livre		3	1	1	3	3	1	33.374	
		Galgamento / brecha		5	1	1	5	5	1	55.624	
	Instabilidade	Deformações e trincas		2	2	2	4	8	2	88.998	
		Redução da borda livre		3	1	1	3	3	1	33.374	
		Galgamento		5	1	1	5	5	1	55.624	
	Erosão interna	Zonas úmidas, surgências, subsidências, crescimento excessivo de vegetação		4	4	2	16	32	2	355.993	
		<i>Piping</i>		5	2	3	10	30	3	333.744	
		Instabilidade de talude / solapamento		4	1	1	4	4	1	44.499	
	Erosão externa	Solapamento do pé da barragem		3	1	1	3	3	1	33.374	
		Deterioração no talude de montante, espaldar		3	3	1	9	9	1	100.123	
		Erosão em sulcos no talude de jusante		2	2	1	4	4	1	44.499	
		Galgamento / carreamento		5	1	1	5	5	1	55.624	
Órgãos extravasores e seus componentes	..	Percolação / infiltração		3	1	2	3	6	2	66.749	
	..	Deterioração de materiais estruturais		3	1	1	3	3	1	33.374	
	Obstrução de fluxo (por detritos ou vegetação)	Danos às estruturas		2	1	1	2	2	1	22.250	
		Galgamento		5	1	1	5	5	1	55.624	
	Falhas nas comportas	Rebaixamento rápido		1	1	1	1	1	1	11.125	
		Galgamento		5	1	1	5	5	1	55.624	
	Capacidade inadequada	Galgamento		5	1	1	5	5	1	55.624	
		Dano localizado		1	1	1	1	1	1	11.125	
	Estruturas de adução e descarga (restituição)	Tubulações / válvulas	Deslocamento de tubulações		4	1	2	4	8	2	88.998
			Percolação / infiltração		5	1	2	5	10	2	111.248
Movimento superficial				4	1	2	4	8	2	88.998	
Corrosão				1	1	1	1	1	1	11.125	
Falhas de comportas / válvulas		Rebaixamento rápido		1	1	1	1	1	1	11.125	
		Elevação de nível de água		1	1	1	1	1	1	11.125	
Obstrução de fluxo		Sem fluxo		1	1	1	1	1	1	11.125	
Estruturas auxiliares		..	Dano estrutural		1	1	1	1	1	1	11.125
		..	Infiltração / percolação		1	1	1	1	1	1	11.125
	..	Movimento superficial		1	1	1	1	1	1	11.125	

TABELA 5.21 – Diagrama LCI Emborcação

LOCALIZAÇÃO	CAUSA	INDICADOR	CONS	PROB.	CONF.	IND <sub>ord</sub>	IND <sub>crit</sub>	IND <sub>conf</sub>	IND <sub>risco</sub>	
Maciço da barragem, fundação e ombreiras	Recalque	Trincas / fissuras na barragem e estruturas anexas	2	5	2	10	20	2	222.496	
		Danos nas interfaces barragem/estruturas anexas e/ou ombreiras	2	1	1	2	2	1	22.250	
		Percolação / infiltração	4	1	1	4	4	1	44.499	
		Erosão interna	5	1	2	5	10	2	111.248	
		Redução da borda livre	3	5	1	15	15	1	166.872	
		Galgamento / brecha	5	1	1	5	5	1	55.624	
	Instabilidade	Deformações e trincas	3	3	3	9	27	3	300.369	
		Redução da borda livre	3	2	1	6	6	1	66.749	
		Galgamento	5	1	1	5	5	1	55.624	
	Erosão interna	Zonas úmidas, surgências, subsidências, crescimento excessivo de vegetação	3	2	1	6	6	1	66.749	
		<i>Piping</i>	5	1	2	5	10	2	111.248	
		Instabilidade de talude / solapamento	2	1	1	2	2	1	22.250	
	Erosão externa	Solapamento do pé da barragem	1	1	1	1	1	1	11.125	
		Deterioração no talude de montante, espaldar	1	3	1	3	3	1	33.374	
		Erosão em sulcos no talude de jusante	1	1	1	1	1	1	11.125	
		Galgamento / carreamento	5	1	1	5	5	1	55.624	
Órgãos extravasores e seus componentes	..	Percolação / infiltração	2	1	1	2	2	1	22.250	
	..	Deterioração de materiais estruturais	3	1	1	3	3	1	33.374	
	Obstrução de fluxo (por detritos ou vegetação)	Danos às estruturas	1	1	1	1	1	1	11.125	
		Galgamento	5	1	1	5	5	1	55.624	
	Falhas nas comportas	Rebaixamento rápido	1	1	1	1	1	1	11.125	
		Galgamento	5	1	1	5	5	1	55.624	
	Capacidade inadequada	Galgamento	5	1	1	5	5	1	55.624	
		Dano localizado	1	1	1	1	1	1	11.125	
	Estruturas de adução e descarga (restituição)	Tubulações / válvulas	Deslocamento de tubulações	2	1	1	2	2	1	22.250
			Percolação / infiltração	2	1	1	2	2	1	22.250
Movimento superficial			1	1	1	1	1	1	11.125	
Corrosão			1	1	1	1	1	1	11.125	
Falhas de comportas / válvulas		Rebaixamento rápido	1	1	1	1	1	1	11.125	
		Elevação de nível de água	2	1	1	2	2	1	22.250	
Obstrução de fluxo		Sem fluxo	1	1	1	1	1	1	11.125	
Estruturas auxiliares		..	Dano estrutural	1	1	1	1	1	1	11.125
		..	Infiltração / percolação	1	1	1	1	1	1	11.125
	..	Movimento superficial	1	1	1	1	1	1	11.125	



As justificativas para os itens dos diagramas das TAB. 5.20 e 5.21 encontram-se no Apêndice A.8 e A.9, respectivamente. Considerando o interesse geotécnico da dissertação, somente os indicadores contidos na localização “maciço de barragem, fundação e ombreiras” foram justificados detalhadamente. Os demais sistemas (ex: órgãos extravasores e estruturas de adução) foram pontuados somente em caráter demonstrativo.

Da aplicação das TAB. 5.20 e 5.21, verifica-se que a atribuição das notas de consequência, probabilidade e grau de confiança é realizada de uma forma bastante subjetiva (julgamento de engenharia), o que reforça a necessidade de que essas pontuações sejam bem justificadas e documentadas. Apenas os números em negrito na pontuação da consequência representam as orientações pré-estabelecidas pelo método (em alto, médio ou baixo), baseadas na análise de incidentes passados.

Algumas deficiências também podem ser observadas durante a utilização dos diagramas:

- Os sistemas (localização) são considerados de forma muito global. O maciço da barragem e a fundação, por exemplo, merecem uma avaliação de forma segregada;
- Além da divisão dos diagramas pelos dois tipos de barragens (concreto e terra), deveriam existir subdivisões. No que tange às estruturas de terra, as barragens de terra e terra-enrocamento apresentam desempenho e respostas bastante distintos frente aos indicadores fornecidos pelos diagramas;
- O atributo de consequência tem uma terminologia não adequada, já que se confunde com a consequência propriamente dita, avaliada na etapa de cálculo do índice global de impacto. O termo “efeito” parece ser mais apropriado, já que o que se pontua é a relação entre o elemento e o resultado final (ruptura parcial ou total da barragem);
- As causas, embora pertinente sua consideração no diagrama, geram certa confusão no entendimento, já que podem estar associadas aos eventos iniciadores, aos modos de falha ou indicadores. Julga-se que seria mais adequado sua substituição pelos modos de falha “clássicos” dos sistemas, o que facilitaria a atribuição das notas;
- Os indicadores, às vezes, estão contidos na própria causa. Além disso, em alguns casos, os indicadores não são totalmente independentes um dos outros.

Com relação aos resultados apresentados, como foi atribuído o mesmo índice global de impacto (IGI) para ambas as barragens, o índice de criticalidade ( $Ind_{crit}$ ) pode ser diretamente comparado.

Para as barragens de Três Marias e Emborcação, os riscos que mais se destacam na localização “Maciço da barragem, fundação e ombreiras” são listados na TAB. 5.22 e 5.23. As colunas “ID” das tabelas representam apenas uma identificação sugerida para os elementos.

TABELA 5.22 – Elementos críticos na barragem de Três Marias

ID	ELEMENTO	IND <sub>risco</sub>	IND <sub>crit</sub>	IND <sub>ord</sub>	IND <sub>conf</sub>
TM1	Recalque - percolação / infiltração	355.993	32	16	2
TM2	Erosão interna - zonas úmidas, surgências, subsidências, crescimento excessivo de vegetação	355.993	32	16	2
TM3	Recalque - Erosão interna	333.744	30	10	3
TM4	Erosão interna - <i>piping</i>	333.744	30	10	3

TABELA 5.23 – Elementos críticos na barragem de Emborcação

ID	ELEMENTO	IND <sub>risco</sub>	IND <sub>crit</sub>	IND <sub>ord</sub>	IND <sub>conf</sub>
EM1	Instabilidade - deformações e trincas	300.369	27	9	3
EM2	Recalque - trincas/fissuras na barragem	222.496	20	10	2
EM3	Recalque - redução da borda livre	166.872	15	15	1

No caso de Três Marias, todos os elementos estão relacionados à percolação observada através da barragem e fundações (camadas de cascalho e argila da fundação), estando inter-relacionados. A classificação dos elementos é bem homogênea. As criticalidades (e os índices de risco e ordenação) superiores dos dois primeiros elementos refletem a probabilidade de ocorrência mais elevada das anomalias (indicadores atualmente observados em campo). Por outro lado, o índice de confiança inferior (= melhor) traduz o maior conhecimento das questões em análise e, portanto, maior facilidade na estimativa dos indicadores, com base em estudos já realizados, dados existentes, inspeções visuais e análise da instrumentação, em detrimento ao indicador de erosão interna.

Já sobre a barragem de Emborcação, os indicadores, também inter-relacionados, apontam a deficiência de projeto relativo à incompatibilidade das deformações. As probabilidades de falha dos elementos associados à causa “recalque” são superiores à do elemento de causa “instabilidade”, já que nos primeiros as ocorrências de recalques são reais e mais facilmente detectadas. O índice de confiança superior (= pior) do elemento “instabilidade – deformações e trincas” indica a deficiência da instrumentação (danificada ao longo do tempo) e a necessidade de trabalhos de investigação por meio da reinstrumentação da barragem. O índice de ordenação expõe as prioridades de serviços de manutenção em ordem decrescente de importância.

Quando se compara o índice de risco das duas barragens (ou os índices complementares) conclui-se que a barragem de Três Marias impõe maior risco do que a barragem de Emborcação. Isso se deve aos números superiores dados no atributo “consequência” para os indicadores relacionados à percolação/*piping*, valores esses especificamente pré-estabelecidos no método. Isso é razoável considerando que esses indicadores (percolação, surgências e *piping*), segundo estatísticas de ruptura de barragens, são mais danosos para a segurança das barragens do que a manifestação de deformações e trincas nas estruturas.

A matriz de risco com a descrição qualitativa da probabilidade e consequência é apresentada na FIG. 5.3, já com os elementos críticos das barragens representados. Os elementos mais críticos na matriz (T1, T2 e E3) são, no entanto, os que possuem melhores graus de confiança, possibilitando detecção e controle mais ágeis.

Importante notar que a classificação da matriz de risco se alinha com o índice de ordenação, e não com o índice de criticalidade. Ressalta-se também que, apesar do LCI ser considerado uma variante do FMECA, a “criticalidade” do método de origem não leva em conta a detecção (somente ocorrência/probabilidade e severidade/consequência), sendo equivalente ao índice de ordenação do LCI. O índice de criticalidade do diagrama LCI é equivalente, na realidade, ao NPR (número de prioridade de risco) da metodologia FMEA, ressalvando o fato de que eles tratam o atributo “consequência” (ou severidade) de forma diferente.

		PROBABILIDADE				
		5	4	3	2	1
CONSEQUÊNCIA	5				TM3 TM4	
	4		TM1 TM2			
	3	EM3		EM1		
	2	EM2				
	1					

Alto	Médio	Baixo
------	-------	-------

FIGURA 5.3 – Matriz de risco do método LCI

Hughes *et al.* (2000) esclarecem que, enquanto as pontuações da consequência relacionam a falha do elemento particular à falha da barragem, a pontuação de probabilidade reflete a probabilidade de falha do elemento, não da barragem. A faixa de valores sugerida tem a finalidade de representar limites reais. Por exemplo, uma pontuação equivalente a cinco significa que existe alta probabilidade de falha. Em termos probabilísticos, pode se referir a um valor de 0,001 ou até 0,01. No caso da matriz de risco da FIG. 5.3 se deduz, portanto, que os valores estariam abaixo desse limite para os elementos mais críticos (TM1 e TM2).

Apesar da aplicação presente utilizar o diagrama original do método, Hughes *et al.* (2000) deixam evidente que novos indicadores podem ser incorporados aos diagramas. Essa expansão tem a finalidade de adequar o diagrama LCI às particularidades da obra. Segundo os autores, os fatores utilizados na pontuação também não têm a intenção de impor uma metodologia ou calibração definitivas, mas sim apenas um ponto de partida para que a avaliação de risco seja desenvolvida e evoluída.

Infelizmente, dada a aplicação incipiente do método, não existem valores de referência de índice de risco ( $Ind_{risco}$ ) que permitam apreciar os riscos das barragens estudadas. Espósito e Palmier (2013) apresentaram o diagrama LCI modificado para barragens de contenção de rejeitos. Nesse caso, adotaram como referência valores de alerta equivalente a 40.000 pontos para o índice de risco. No entanto, considerando que a aplicação se deu também em apenas duas barragens e as estruturas são bem diferentes das barragens aqui estudadas, entende-se que a comparação não seja adequada.

### 5.3.2 Aplicação do método FMEA

A estruturação dos sistemas das barragens é o primeiro passo para aplicação das análises dos modos de falha e seus efeitos – FMEAs. A escolha do sistema é realizada considerando a importância dos elementos para as definições subsequentes dos modos de falha e efeitos.

Pela análise dos desenhos de projeto, os subsistemas e componentes foram definidos conforme as FIG. 5.4 (barragem de Três Marias) e 5.5 (barragem de Emborcação). Evidentemente existem outros subsistemas, como o reservatório e os associados às estruturas de concreto do barramento (vertedouro e tomada de água), mas como o foco do estudo é a geotecnia, somente as estruturas de terra e enrocamento são analisadas.

## SISTEMA: BARRAGEM DE TRÊS MARIAS

### 1 – BARRAGEM DE TERRA

- 1.1 Crista
- 1.2 Espaldar de jusante - zona 3
  - 1.2.1 Enrocamento de proteção
- 1.3 Espaldar de montante - zona 2
  - 1.3.1 Rip-rap
- 1.4 Maciço argiloso - zona 1
- 1.5 Sistema de drenagem superficial
- 1.6 Sistema de drenagem interna
  - 1.6.1 Filtro vertical
  - 1.6.2 Filtro vertical / inclinado (inferior)
  - 1.6.3 Tapete horizontal
  - 1.6.4 Saída do tapete horizontal

### 2 – FUNDAÇÃO

- 2.1 Margem direita
- 2.2 Leito do rio
- 2.3 Planície de inundação
- 2.4 Margem esquerda

### 3 – OMBREIRAS

- 3.1 Ombreira direita
- 3.2 Ombreira esquerda

FIGURA 5.4 – Sistema da Barragem de Três Marias

## SISTEMA: BARRAGEM DE EMBORCAÇÃO

### 1 – BARRAGEM DE TERRA-ENROCAMENTO

- 1.1 Crista
- 1.2 Enrocamento de jusante – zonas 1, 2A e 2B
  - 1.2.1 Enrocamento de proteção – zonas de grandes blocos
- 1.3 Enrocamento de montante – zonas 1, 2A e 2B
  - 1.3.1 Rip-rap
- 1.4 Núcleo argiloso
- 1.5 Random impermeável
- 1.6 Transições
- 1.7 Sistema de drenagem interna - dreno

### 2 – FUNDAÇÃO

### 3 – OMBREIRAS

- 3.1 Ombreira direita
- 3.2 Ombreira esquerda

FIGURA 5.5 – Sistema da Barragem de Emborcação

A aplicação do FMEA considerou o estágio atual de operação das barragens. A metodologia também pode ser desenvolvida para outras fases de obras, como projeto e construção.

Nas tabelas da metodologia apresentadas nos Apêndices A.10 e A.11, buscou-se explicitar a “função” de cada item de forma exata e concisa, já que ela é referência para a determinação do “modo de falha” (disfunção). Para o “efeito”, foi considerado neste estudo somente o efeito final, ou seja, a consequência. Na metodologia FMEA é possível incluir também outros efeitos, por exemplo, “efeito local” e “efeito em outros subsistemas/componentes”. Com relação à “causa”, ela tem como propósito descrever a origem do modo de falha, enquanto o “controle” relaciona as medidas possíveis a serem tomadas.

As classificações dos índices de severidade, ocorrência e detecção foram referenciadas à TAB. 2.25 apresentada no capítulo 2, reproduzida abaixo na TAB. 5.24. Nessa tabela foi incluída a numeração de classes (algarismos romanos) para a severidade e ocorrência:

TABELA 5.24 – Classes e índices utilizados no FMEA

ÍNDICE DE SEVERIDADE (S)			ÍNDICE DE OCORRÊNCIA (O)			ÍNDICE DE DETECÇÃO (D)	
S <sub>i</sub>	Classe S	Efeito	O <sub>i</sub>	Classe O	Probabilidade	D <sub>i</sub>	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: Adaptado de ESPÓSITO e PALMIER, 2013, p. 108.

Complementarmente, a análise da severidade também foi avaliada com o auxílio da TAB. 2.26, considerando que a pior situação de escala descritiva, sob diferentes aspectos, condiciona a pontuação. Para as pontuações de ocorrência e detecção foi adotada a abordagem que as relaciona com as causas da falha, mas também levando em consideração o modo de falha associado.

Tendo em vista a variedade de tabelas existentes na literatura para aplicação do método, foi adotado o leiaute de tabela baseado nos trabalhos recentes de Espósito e Palmier (2013) e Portes (2013), que

engloba os itens usualmente adotados na metodologia. Na TAB. 5.25 é apresentado um extrato referente ao subsistema principal “barragem” das tabelas contidas no Apêndice A.10 e A.11.

TABELA 5.25 – Leiaute de formulário para aplicação do FMEA

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1 Barragem de terra											
Conter o reservatório	1 (1) Galgamento (falhas hidráulicas)	Erosão externa e formação de brecha	10	VI	Níveis de água excepcionais	1	I	Deplecionamento do reservatório e manutenção de borda livre	Prevenção	1	10
								Monitoramento dos níveis por sistema de telemetria	Deteção		
	1 (2) Movimento de massa	Instabilidade global e liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	1	I	Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção	2	20
								Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
					Propriedades inadequadas dos materiais	1	I	Inspeção visual e instrumentação	Deteção	3	30
								Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção		
								Recompactação	Prevenção		
								Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
	1 (3) Erosão interna	Piping e formação de brecha	9	V	Falha de projeto ou construção	1	I	Diminuição da carga hidráulica (deplecionamento do reservatório)	Prevenção	4	36
								Lançamento de materiais de filtro/dreno	Prevenção		
								Inspeção visual e instrumentação	Deteção		

Durante a aplicação do método, cada item relacionado aos componentes/modo de falha/causa foi justificado, isoladamente, com informações consolidadas e detalhadas (quando existentes) contidas em documentos de projeto, construção ou estudos realizados das barragens. A TAB. 5.26 apresenta um exemplo para as componentes filtro vertical e tapete horizontal (sistema de drenagem interna) com o modo de falha ligado à incapacidade de coletar e conduzir a água percolada, tendo como efeito final a saturação do espaldar de jusante com instabilidade global da barragem de Três Marias.

TABELA 5.26 –Registros para justificativa e avaliação/pontuação do FMEA – Três Marias

CAUSA	FILTRO VERTICAL	TAPETE HORIZONTAL
Colmatação (contaminação) por material argiloso (falha construtiva)	Investigações detectaram falta de continuidade (estreitamento, desalinhamento ou interrupção) do filtro devido à presença de camadas de silte argiloso/argila siltosa, intercaladas com areia.	Investigações geotécnicas no tapete drenante identificaram contaminação com torrões de argila, apesar da matriz (areia fina) se encontrar limpa.
Espessura ou dimensões insuficientes	Localizado cerca de dois metros abaixo do NA normal do reservatório, prática em desuso na atualidade. Sua espessura típica, em grande parte da barragem, é de 80cm.	Em alguns trechos da barragem (leito do rio) ele não foi apoiado diretamente sobre a fundação (tapete suspenso), prática em desuso na atualidade. Sua espessura típica é de 80cm, e eventualmente até 60cm, dimensões menores que as usualmente utilizadas.
Inadequação de granulometria ou critérios de dreno (falha de projeto)	Constituído por camadas de areias finas com baixa permeabilidade, mas atende aos critérios de dimensionamento de dreno e filtro.	Constituído por areia fina, mas a análise de ensaios de caracterização confirma que atende aos critérios atuais de filtro/dreno.
Recalques diferenciais	Sua constituição de camadas de areias finas com pequenas espessuras pode ter favorecido o processo de propagação das trincas oriundas da fundação. Isso ainda pode gerar caminhos preferenciais de fluxo e condução (saturação) para a zona 3.	Sua constituição de camadas de areias finas com pequenas espessuras pode ter favorecido o processo de propagação das trincas oriundas da fundação. Isso ainda pode gerar caminhos preferenciais de fluxo e condução (saturação) para a zona 3.

Devido à extensão das tabelas e o volume de informações associadas, somente a discussão referentes aos aspectos de maior criticalidade (e NPR) são apresentados nos resultados a seguir.

- Sistema Barragem de Três Marias

Os valores encontrados para o NPR (Número de Prioridade de risco) variam de 1 a 120 (referência no Apêndice A.10). Os itens mais importantes (NPRs 108 e 120) localizam-se nos componentes do sistema de drenagem interna da barragem de terra e no subsistema da fundação, em especial no trecho correspondente à margem esquerda.

No primeiro caso, os elementos de drenagem (filtro vertical, filtro inclinado inferior e tapete horizontal) têm como modo de falha (disfunção) basicamente a incapacidade de coletar e conduzir devidamente a água percolada (modos de falhas 1.6 (1), 1.6.1 (1), 1.6.2 (1) e 1.6.3 (1)). O alto valor de severidade está relacionado à instabilidade global da barragem com a eventual saturação do espaldar de jusante (zona 3) e as consequências resultantes da ruptura, conforme TAB. 2.26. As causas estão relacionadas às colmatações dos elementos drenantes (identificada a contaminação com material argiloso em alguns pontos dos elementos por meio de sondagens realizadas – falha construtiva) ou aos recalques diferenciais ocorridos na fundação com eventual propagação de trincas internas nos elementos, resultando por sua vez em percolações indevidas para a zona 3 da barragem (disfunção). Ambas as causas foram julgadas como sendo de ocorrência remota, de acordo com indícios de campo, instrumentação e investigações executadas. A detecção foi considerada moderadamente alta, pois, ainda que os mecanismos de falha sejam internos, eles podem ser identificados indiretamente pelas inspeções visuais mensais e, principalmente, pela vasta instrumentação (piezometria) instalada no maciço da barragem. Como os itens discutidos apresentam alta severidade e estão inseridos no subsistema principal “barragem de terra”, esse último tende a refletir (1 (2)) as pontuações mais críticas de ocorrência dadas nos componentes internos.

No segundo caso, as falhas estão relacionadas à fundação, notadamente na margem esquerda, tendo como modos de falha o movimento de massa (2 (1) e 2.4 (1)) e a erosão interna (2 (3), 2 (5), 2.4 (3) e 2.4 (5)). As severidades para os efeitos finais instabilidade global (movimento de massa) e *piping* (erosão interna) são ligeiramente diferentes. Foi considerado que as consequências do *piping*, como sendo um fenômeno progressivo (gradual), podem ser minimamente mitigadas devido ao fator tempo (ex: deplecionando o reservatório), diferentemente de uma ruptura por colapso da fundação



(instabilidade global). As causas, de ocorrência remota, estão relacionadas a tratamentos de fundação deficientes ou inadequados, propriedades inadequadas dos materiais (ex: permeabilidade dos cascalhos de fundação) e remoção insuficiente de materiais de baixa resistência (ex: argila porosa), ou seja, diretamente associadas às condicionantes geotécnicas da fundação da margem esquerda. A detecção foi considerada moderadamente alta, pois, assim como no caso anterior, apesar dos mecanismos de falha serem internos, eles podem ser indiretamente identificados pelas inspeções visuais e instrumentação instalada na fundação e áreas a jusante.

A criticalidade, pela homogeneidade da pontuação da detecção, tende a convergir com os valores mais críticos de NPR. A exceção ocorre para os modos de falha 1.2 (1) (instabilidade do espaldar de jusante) e 1.2.1 (1) (falha de proteção no enrocamento de proteção), que apresentam maiores facilidades de detecção ou severidades inferiores (no caso das instabilidades locais). A matriz de risco sugerida na FIG. 5.6 apresenta as criticalidades dos modos de falha mais importantes supracitados.

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 5.6 – Matriz de risco para os elementos críticos da barragem de Três Marias

- Sistema Barragem de Emborcação

A barragem de Emborcação apresenta um sistema bem menos complexo do que o caso de Três Marias, haja vista que não existem variações relevantes na fundação e na seção típica ao longo do barramento.

De modo geral, o sistema de Emborcação apresenta seus elementos com NPRs mais elevados (referência do Apendice A.11), fruto da deficiência de instrumentação para monitoramento dos recalques e deformações nos espaldares de enrocamento (maiores índices de detecção = pior).

O ponto de destaque no sistema FMEA (NPR 180) refere-se ao enrocamento de montante com o modo de falha de deformação excessiva 1.3(2). O valor elevado de severidade reflete o efeito final de fissuração com instabilidade global, associado às diferenças de rigidez dos materiais contidos em subsistemas adjacentes (núcleo e transições). As consequências são referenciadas à TAB. 2.26. A causa principal é devido ao fenômeno de colapso dos enrocamentos (quebras e rearranjos dos blocos) decorrente dos ciclos de carga e descarga do reservatório (regularização anual) com secagem e umedecimento dos materiais (aceleração do intemperismo e perda de resistência nos contatos dos blocos). Como já mencionado, o elemento também é afetado pela instrumentação deficiente, a qual não fornece informações suficientes para uma análise adequada do comportamento tensão-deformação da barragem. Além disso, o subsistema “enrocamento de montante” fica parcialmente submerso, o que dificulta a detecção do mecanismo de falha por meio de inspeções visuais. Como o item apresenta alta severidade e está incluso no subsistema principal “barragem de terra-enrocamento”, esse último tende a refletir a pontuação crítica.

Com relação à criticalidade, também ganha destaque o modo de falha 1.1(2) associado ao galgamento na crista da barragem, decorrente de uma eventual redução da borda livre tendo como causa os recalques. Esse modo de falha não é relevante na análise pelo NPR, pois sua detecção por meio de controle topográfico na crista é simples, podendo-se antecipar os controles (ex: alteamento da crista).

Os modos de falhas de deformação excessiva nos subsistemas “enrocamento de jusante” (1.2 (2)) e “random impermeável” (1.5 (2)) também são relevantes na análise pela criticalidade, mas ambos apresentam índices de ocorrência ou detecção ligeiramente mais favoráveis do que os considerados no NPR do enrocamento de montante. Os processos de instabilidade local nos espaldares de montante e jusante, com maior índice de ocorrência e menor severidade, também aparecem na matriz de risco.

A FIG. 5.7 apresenta a matriz de risco para o sistema da barragem de Emborcação, com os modos de falhas mais importantes da análise.

Ocorrência	V					
	IV					
	III			1.2 (2) 1.3 (2)		1.1 (2)
	II					1 (2) 1.2 (2) 1.3 (2) 1.5 (2)
	I					
		I	II	III	IV	V
		Severidade				

FIGURA 5.7 – Matriz de risco para os elementos críticos da barragem de Emborcação

Os resultados, baseados na discussão dos métodos anteriores, confirmam e detalham os modos de ruptura mais críticos nas barragens de Três Marias e Emborcação, demonstrando, assim, a eficácia do método aplicado. A metodologia do FMEA também confirma o alinhamento com os resultados do método anterior LCI. A matriz de risco, no entanto, apresenta diferenças em relação à do LCI, tendo em vista os conceitos distintos utilizados na componente de consequência e as diferentes faixas (ou classes) consideradas no índice de ocorrência/probabilidade.

Importante ressaltar que a faixa de valores da ocorrência (em %) referenciada na TAB. 5.24, fundamentalmente associada à causa, não representa uma correlação direta com as probabilidades de ruptura consideradas em barragens. Em termos probabilísticos, as probabilidades de ruptura reais de barragens, como as analisadas, certamente são inferiores ao que seria considerado “improvável” (= classe I < 0,1%).

Depreende-se da aplicação prática do FMEA nas barragens que ele se trata de um método com caráter preventivo e lógico, além de se constituir em uma referência rápida para resolução de problemas. A metodologia permite um conhecimento estruturado do sistema das barragens, com a consideração das funcionalidades, modos de falha, causas e consequências de cada subsistema ou componente, antecipando as medidas de prevenção e detecção.

Contudo, assim como ocorre em quaisquer outros métodos, o FMEA também tem suas limitações. A primeira delas é o tratamento isolado dos modos de falha de cada item, não considerando efeitos eventualmente combinados. Da mesma forma, existe uma dificuldade na análise de redundâncias, quando um subsistema ou componente pode compensar a ruptura de outra. Outra questão igualmente importante é a incapacidade de modelar corretamente rupturas (ou disfunções) progressivas (ex: *piping*), já que a variável “tempo” não é considerada, ou seja, existem somente dois estados no método: funcional (ruptura) ou não funcional (não ruptura). Não há a possibilidade de considerar a mudança gradual do estado.

Com relação à pontuação dos índices numéricos, a amplitude da escala, de 0 a 10, pode-se constituir em uma dificuldade na avaliação, distorcendo o julgamento de engenharia. Embora o índice de detecção não tenha classes associadas, o julgamento por elas simplifica e facilita a análise.

Como o FMEA é um método bastante difundido em vários campos de conhecimento, existem propostas de apreciação de riscos em relação à criticalidade ou ao NPR, mas, considerando que o universo de barragens do setor elétrico é bem singular (com probabilidade de falha reduzidas e consequências associadas extremamente elevadas), há carência de valores de referência para apreciação de riscos.

#### **5.4 Avaliação em fases: análise preliminar de risco e análise individual**

Das aplicações e explicações contidas nos itens 5.1 a 5.3, julga-se ter sido demonstrada a viabilidade e utilidade da avaliação em fases, abrangendo o método de análise para portfólio seguido pela análise em barragens individuais.

As análises preliminares de risco para portfólio de barragens por meio de índices de risco e matrizes de classificação, embora simples e subjetivas, permitem uma classificação expedita das estruturas com base no risco. Apesar de alguns métodos terem claramente influenciado a origem de outros, as metodologias, no geral, apresentam muitas diferenças importantes. Por exemplo, é manifesto que os métodos do Índice Global de Risco e Índice de Lafitte consideram as fontes de perigo externas, não contempladas nos demais. Por outro lado, métodos como as metodologias Cemig, Potencial de Risco e Matrizes de Classificação da Lei consideram características técnicas do projeto que não estão inclusas nas primeiras metodologias. As diferenças são extensivas às classes, descritores, bem

como às regras de agregação, pesos e cálculo do risco. No entanto, apesar de todos esses fatores, verifica-se que há uma clara convergência nos variados sistemas de classificação para o caso da amostra de barragens selecionada. Evidentemente, não há necessidade de aplicação de todos os métodos de análise preliminar discutidos, podendo ser aplicado aquele que seja mais adequado, tendo em vista as particularidades técnicas do universo de barragens a serem analisadas.

O estágio inicial, portanto, identifica as estruturas que merecem estudos complementares e pormenorizados de análise de risco. As metodologias qualitativas que foram aplicadas no estágio seguinte (LCI e FMEA) são úteis e necessárias, pois avaliam cada aspecto ou elemento (local, modo de falha, causa e efeito) de forma individualizada e, concomitantemente, ainda são viáveis para uma análise global da barragem. Por mais que o método LCI seja uma variante da metodologia FMEA/FMECA especificamente desenvolvida para barragens, apoiado em registros de inspeção visual (indicadores) e com resultados indicando pontos vulneráveis alinhados aos do método de origem, ele tem seu sistema muito simplificado e necessita ainda de alguns ajustes. Desse modo, dentre os métodos efetivamente aplicados no segundo estágio (LCI e FMEA), julga-se que a metodologia FMEA, por ser um método mais consolidado, sistemático e lógico, foi mais adequado para aplicação nas barragens. Mesmo que a segunda fase de aplicação ratifique pontos vulneráveis expressos na análise preliminar, o melhor entendimento do desempenho das barragens é um dos grandes benefícios dessa etapa complementar.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 6.1 Conclusões

O estudo desenvolvido nesta dissertação teve como objetivo principal a aplicação de técnicas de análise de risco em barragens de terra e enrocamento, considerando a análise preliminar de risco para portfólio e a análise complementar em barragens individuais. Os estudos permitiram estabelecer, a partir da integração das informações, as seguintes conclusões principais:

#### (i) Quanto à gestão de risco

Os conceitos de gestão de risco apresentados no item 2.3 se alinham com demandas atuais da sociedade, na busca por responsabilidade e transparência nas tomadas de decisões e, por isso, devem ser utilizadas no âmbito das barragens. No entanto, essa abordagem, considerando que ainda está em fase de desenvolvimento e pelas limitações expostas no presente trabalho, deve ser encarada como uma melhoria ou complementação da prática tradicional, e não como uma substituição.

Salienta-se que a gestão de riscos associados a barragens pode ser considerada um grande avanço, em especial nas fases de operação e manutenção, por consistir nas bases de um programa estruturado de monitoramento e priorização das atividades de reparo e reabilitação dessas estruturas por parte dos empreendedores. Além disso, muitas vezes as decisões relativas à alocação de recursos de manutenção são tomadas pelos proprietários de barragens em um ambiente não técnico, e a abordagem de risco é amplamente difundida e geralmente de fácil entendimento e aceitação pelos tomadores de decisão.

#### (ii) Quanto aos métodos de análise preliminar de risco para portfólio de barragens

Os métodos baseados em índices de riscos e matrizes de classificação tendem a uma análise realizada de forma mais global, com os descritores bem generalistas. Por mais que devam ser utilizadas apenas em uma avaliação preliminar, tais técnicas são bastante úteis para classificação de barragens e devem constituir-se parte integrante de qualquer programa de gestão de segurança de barragens.

Em que pesem a variedade, simplicidade e subjetividade na aplicação dos métodos, os resultados na amostra em análise indicam que os sistemas de classificações tratados tendem a convergir quanto à hierarquização das barragens com base no risco. Um fator fundamental na aplicação dos métodos é a existência ou criação de diretrizes para pontuação dos descritores, visando homogeneizar o julgamento que pode ser afetado pela experiência e conhecimento do técnico avaliador. Em todos os casos de aplicação é importante também que as classificações dos descritores sejam bem justificadas e documentadas, permitindo posterior rastreabilidade.

Diante da disponibilidade na literatura de vários bons métodos de análise preliminar de risco, apresentados nos itens 2.6.1 a 2.6.8, julga-se desnecessária a tentativa de criar novas classificações neste momento no Brasil, pois a experiência mostra que elas acabam ficando restritas ao universo de barragens ou ambiente empresarial do empreendedor. Isso decorre do natural ceticismo da comunidade técnica na adoção de novas metodologias. Além disso, a criação de um método singular tem a desvantagem da inexistência de referenciais comparativos externos (apreciação de riscos com um maior número de barragens). Assim sendo, entende-se que as matrizes de classificações da Lei 12.334, por se constituírem em uma evolução natural dos métodos predecessores (com adequadas classes de avaliação e número de descritores) e pela abrangência com que serão utilizadas no país, serão uma ferramenta adequada no intuito de identificar as barragens de maiores riscos. Contudo, alguns ajustes ainda devem ser feitos por meio das regulamentações complementares, visando esclarecer alguns pontos dúbios da classificação, além da elaboração de tabelas orientativas que permitam a pontuação dos descritores de forma homogênea pelos diversos empreendedores. A Lei 12.334 certamente irá consolidar a utilização da análise preliminar de risco para portfólio, fornecendo ainda um panorama geral da segurança de barragens de todo o país.

(iii) Quanto aos métodos de análise de risco aplicados a barragens individuais:

Os métodos de análises de risco aplicado a barragens individuais são técnicas formais já reconhecidas em outros campos de conhecimento, com exceção do LCI, sendo adaptadas para aplicação em barragens. São métodos mais elaborados e consistentes, apoiados em informações mais objetivas, que, todavia, exigem o levantamento de informação detalhada, considerando dados relativos ao projeto, construção e operação das estruturas. Independentemente dos resultados

numéricos obtidos, o simples incremento no conhecimento estruturado do sistema e desempenho da barragem em análise já é extremamente válido e justifica sua aplicação.

Com relação aos métodos especificamente aplicados nesse grupo (LCI e FMEA, itens 5.3.1 e 5.3.2), a metodologia do FMEA mostrou-se superior pelo seu caráter mais sistemático e lógico, conectando de forma mais clara os locais, modos de falha, efeitos, causas e controles. O método LCI, com alguns ajustes nas deficiências expostas, tem grande potencial de aplicação pelo fato da sua metodologia estar baseada em resultados de inspeções visuais, estabelecendo uma conexão com as atividades de campo de monitoramento. Destaca-se que também é possível sua utilização em portfólio, com o uso dos diagramas LCI padrões e comparações dos índices globais de risco.

Mesmo que os métodos de análise de risco individuais aplicados sejam considerados mais elaborados e menos subjetivos que os métodos de portfólio, a atribuição de notas do LCI e FMEA ainda se trata, em última instância, de um julgamento de engenharia, o que realça a necessidade de que as pontuações sejam adequadamente justificadas com embasamento técnico.

Para ambos os métodos, detectou-se a carência de valores de referência para apreciação de riscos de barragens do setor elétrico, necessitando de aplicação em uma programação mais abrangente de casos para a obtenção e calibração de valores.

A aplicação dos métodos formais de análise de risco em barragens de hidrelétricas ainda encontra-se em sua infância no país. As referências existentes estão no nível de academia. No setor de mineração, o FMEA já conta com aplicação difundida nas barragens de contenção de rejeitos.

#### (iv) Quanto à avaliação em fases

Uma metodologia integrada de avaliação de barragens em fases, partindo de métodos mais expeditos para os mais estruturados, pode ser bastante útil, considerando o tempo necessário e os custos envolvidos no desenvolvimento de análises de riscos mais complexas. A fase inicial, com o auxílio do método de análise preliminar mais adequado para o universo de barragens em observação, permite a identificação das estruturas que apresentam maiores riscos dentro do portfólio. A segunda fase de avaliação, aplicada às barragens pré-identificadas, tende a suprir as deficiências da implementação expedita da etapa anterior. Nesse sentido, o FMEA mostrou-se um método bastante adequado para o conhecimento geral das características de ruptura do sistema, obtendo uma análise de risco global, e ainda pormenorizada por sistema.



Visando uma análise ainda mais completa, pode ser de grande valia uma terceira etapa de aplicação com os métodos mais rigorosos, como as Análises por Árvore de Eventos (ETA) ou Árvore de Falhas (FTA). Suas utilizações diretas para uma análise global do risco de um sistema barragem são inviáveis, já que haveria de se considerar inúmeras árvores associadas. Assim, embora o FMEA seja considerado um método independente e formal por si só, ele também pode ser enquadrado como um precursor para uma análise ainda mais detalhada por meio de alguma das duas metodologias citadas. Nesse contexto, considerando o item mais crítico identificado no sistema do FMEA, sua causa poderia ser utilizada como evento iniciador na árvore de eventos (ETA) ou seu modo de falha poderia ser utilizado como evento de topo na árvore de falhas (FTA). Ressalta-se que, considerando a complexidade de mecanismos de falhas em barragens de terra e enrocamento e a dificuldade de quantificação das probabilidades de falha em bases científicas, nem sempre é possível obter uma base teórica consistente para a construção das árvores no tempo presente.

De fato, considerando cada um dos métodos descritos no capítulo 2, com suas vantagens e limitações associadas, pode-se concluir que não existe um método único aplicável a qualquer estudo de riscos em barragens. A análise conjugada (em fases) é muito preciosa nesse sentido.

(v) Quanto à avaliação qualitativa baseada em julgamento de engenharia

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. O risco, nesse caso, é considerado sem caracterizar a incerteza em uma forma matemática. Os métodos quantitativos, estimativa estatística com base em dados históricos e os probabilísticos (como as análises de confiabilidade), são certamente mais consistentes, mas nem sempre de aplicação viável. No primeiro caso (registros históricos) existe a limitação devido ao conhecimento rudimentar geralmente associado aos fenômenos envolvidos nos (poucos) casos de ruptura divulgados, além do aspecto de singularidade de cada barragem. Já no segundo caso (tratamento analítico), o risco é muitas vezes inquantificável de um modo científico devido às incertezas ainda não conhecidas plenamente para certos fenômenos. Além disso, em particular na engenharia geotécnica, é comum não se dispor de uma base de dados probabilísticos que permita tal análise, dada a complexidade dos sistemas, variabilidade dos parâmetros geotécnicos e singularidades locais e construtivas de cada obra. Não obstante, a combinação das três abordagens, cada uma utilizada onde adequada ou possível, pode se constituir em uma compreensão valiosa na análise do risco.

O julgamento de engenharia, pela sua natureza qualitativa, exige que suas estimativas sejam bem justificadas e registradas, de forma a permitir a rastreabilidade, repetibilidade e verificabilidade. O recomendado é que a avaliação seja realizada por uma equipe multidisciplinar, compondo um painel de peritos com experiência nas questões sob análise.

(vi) Quanto à amostra de barragens

As oito barragens analisadas apresentam reduzidas probabilidades de ruptura e elevada consequência, característica intrínseca das grandes barragens do setor elétrico dado o tamanho das estruturas e os grandes volumes de água represada. De modo geral, as estruturas são bem construídas, operadas e, principalmente, mantidas. Nos métodos em que há valores de referências de apreciação de riscos, pode-se inferir que os riscos impostos pelas barragens são aceitáveis. Os pontos mais críticos identificados nas barragens destacadas nas análises individuais de risco, Três Marias e Emborcação, referem-se a questões relacionadas ao estado da arte de projeto e construção em suas respectivas épocas de origem.

No caso de Três Marias, trata-se de uma barragem construída ainda na década de 50, sendo a primeira obra de grande porte da Cemig e a quarta maior estrutura de terra do mundo na época. Sua construção ocorreu quando a engenharia de barragens no país dava os seus primeiros passos e as particularidades existentes na fundação, identificadas ainda na fase de projeto e construção, condicionaram as ocorrências operacionais (percolações e surgências) atualmente observadas em campo.

Já a barragem de Emborcação, uma das mais altas do Brasil, teve seu projeto desenvolvido em um momento em que estava se iniciando a construção de grandes barragens de enrocamento no país. O modelo constitutivo, associado ao princípio de compatibilidade de deformações considerado no projeto, mostrou-se não adequado, conforme evidenciado pelos problemas gerados a partir do enchimento do reservatório (fissurações e recalques).

## **6.2 Sugestões para pesquisas futuras**

A fim de complementar os estudos apresentados nesta dissertação, as seguintes sugestões de pesquisas são aplicáveis:

- Aplicação de técnicas da estatísticas descritiva para padronização e normalização dos índices de riscos obtidos pelos diferentes métodos de análise preliminar apresentados;
- Estudo de um indicador de risco baseado na metodologia de classificação de barragens da Lei 12.334 que permita estabelecer um referencial comparativo (*benchmarking*) entre concessionárias de energia proprietárias de barragens;
- Desenvolvimento e customização de diagramas LCI para o universo de barragens brasileiras, especialmente as barragens de terra e enrocamento do setor elétrico, em evidência neste estudo;
- Desenvolvimento, por meio de aplicações, verificações e calibrações, de tabela específica (FMEA) dos índices de severidade, ocorrência e detecção para as barragens do setor elétrico. Essas barragens tem uma característica peculiar de reduzida probabilidade de falha e elevada consequência. As classes usuais de ocorrência com valores numéricos de probabilidade têm origem em associações com equipamentos/componentes mecânicos e não refletem adequadamente as probabilidade de falha associadas às causas ou modos de falha de barragens;
- Estudo de valores de referência para apreciação de riscos na metodologia FMEA/FMECA, em particular para as barragens do setor elétrico que apresentam uma componente da consequência extremamente elevada;
- Desenvolvimentos de metodologias para estimativa das probabilidades dos fenômenos associados à geotecnia (ex: *piping* e movimentos de massa), viabilizando a evolução natural dos métodos com vistas a uma análise quantitativa;
- Aplicação de Análises por Árvore de Eventos (ETA) e Árvore de Falhas (FTA) para os aspectos críticos das barragens de Três Marias e Emborcação, complementando de modo pormenorizado a avaliação de risco em fases;
- Desenvolvimento das estimativas associadas às consequências de ruptura da barragem, que representam cenários únicos, complexos e pouco conhecidos. A avaliação das consequências foi o ponto tratado em menor profundidade neste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Relatório de segurança de barragens 2011*. Brasília: ANA, 2013. 92 p.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR ISO 31000: Gestão de Riscos: Princípios e Diretrizes*. Rio de Janeiro, 2009. 24 p.
- 3 AIRES, A. D. B. *Estudo tensão-deformação da barragem de Irapé*. 2006. 167 f. Dissertação (Mestrado profissional em Geotecnia de Barragens) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- 4 AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (ANCOLD). *Guidelines on risk assessment*. Sydney: Australian National Committee on Large Dams Inc., 1994. 116 p.
- 5 AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (ANCOLD). *Guidelines on risk assessment*. Sydney: Australian National Committee on Large Dams Inc., 2003. 157 p.
- 6 AUSTRALIAN / NEW ZEALAND STANDARD (AS/NZS). *AS/NZS 4360: Risk Management*. Strathfield: Standards Association of Australia, 1999. 44 p.
- 7 BOWLES, D. S. Advances in the practice and use of portfolio risk assessment. In: ANCOLD 2000 CONFERENCE ON DAMS, Cairns. *Proceedings of the Australian Committee on Large Dams Annual Meeting – Bulletin 117*, ANCOLD, 2001. p. 21-32.
- 8 BOWLES, D. S. Dam safety risk management for hydroelectric projects. *International Conference on Hydropower Projects in Portugal: a New Cycle*, Porto, 29 p. 2010. Disponível em: <<http://uwrl.usu.edu/people/faculty/bowles.html>> Acesso em: 06 mai. 2013.
- 9 BOWLES, D. S.; ANDERSON, L. R.; GLOVER, T. F.; CHAUHAN, S. S. Portfolio risk assessment: a tool for dam safety risk management. In: ANNUAL USCOLD MEETING, 18, 1998, Buffalo. *Eighteenth Annual USCOLD Lecture – Proceedings*. USCOLD, 1998, 13 p.

**10** 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: 01 mar. 2013.

**11** BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução n. 143 de 10 de julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 04 set. 2012. Seção 1. p. 149. Disponível em: <<http://www.in.gov.br>>. Acesso em: 01 mar. 2013.

**12** BUREAU OF RECLAMATION (USBR). *Design of small dams*. 3. ed. Washington: United States Department of Interior, 1987. 860 p.

**13** BUREAU OF RECLAMATION (USBR). Dam safety risk analysis: best practices training manual. v.2.2-abr. 2011. Denver: USBR, 2011. Disponível em: <<http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/training.html>>. Acesso em: 06 mai. 2013.

**14** CACHAPUZ, P. B. B (Coord.). *Usinas da Cemig: A história da eletricidade em Minas e no Brasil 1952-2005*. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2006. 301 p.

**15** CALCINA, A, M; LEITÃO, J. F.; MACHADO, R. A. Stress and strain: numerical previsions and measurement results. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCKFILL DAMS, 1., 2009, Chengdu. *Modern rockfill dams – 2009*. Beijing: Chinese National Committee on Large Dams, 2009.

**16** CALDEIRA, L. M. M. S. *Análises de riscos em geotecnia: aplicação a barragens de aterro*. Lisboa: LNEC, 2008. 248 p.

**17** CALDEIRA, L. M. M. S; GOMES, A. S. Portfolio safety assessment of portuguese fill dams. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 22, 2006, Barcelona. *International congress on large dams – Proceedings*. Paris: ICOLD, 2006. v. 03. p. 271-290 *apud* PIMENTA, M. L. B. *Abordagens de riscos em barragens de aterro*. 2009. Lisboa: LNEC, 2009. 570 p.

**18** CANADIAN DAM ASSOCIATION (CDA). *Dam Safety Guidelines*. Toronto: CDA, 2007. 82p.

**19** CARIM, A. L. C. *Reavaliação da segurança de barragens de terra construídas na década de 50: caso da UHE Três Marias*. 2007. 258 f. Dissertação (Mestrado profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

**20** CARIM, A. L.; DIVINO, P. L.; FUSARO, T, C. Proposta de operacionalização das matrizes de classificação de barragens de acumulação de água regulamentadas pelo CNRH. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 29., 2013, Porto de Galinhas. *XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens - Anais*. Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, 2013. Disponível em: <<http://dataevent.azurewebsites.net/anaisxxixsngb>>. Acesso em 01 jul 2013.

**21** CARVALHO, E.L. *Análise comparativa entre a piezometria medida e resultados numéricos no núcleo da barragem de Emborcação*. 1998. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

**22** CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS (ELETROBRÁS). *Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas*. Brasília: Eletrobrás, 2003, 278 p.

**23** COLLE, G. A. *Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo segurança*. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

**24** COMISSÃO NACIONAL PORTUGUESA DAS GRANDES BARRAGENS (CNPGB). *Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens: 1º Relatório de Progresso*. CNPGB, 2005, 13 p. Disponível em: <<http://cnpgb.inag.pt/imagens/relProgJaneiro05.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2013.

- 25** COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). *Main brazilian dams: design, construction and performance*. São Paulo: Novo Grupo, 1982. 653 p.
- 26** COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. *Main brazilian dams: design, construction and performance volume II*. São Paulo, 2000. 496 p.
- 27** COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. *Main brazilian dams: design, construction and performance volume III*. Santa Catarina: Impressul, 2009. 436 p.
- 28** COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). *UHE Emborcação: Inspeção formal de 2009*. Belo Horizonte: CEMIG, 2009a. 120 p. Relatório.
- 29** COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). *UHE Nova Ponte: Relatório da Inspeção Formal 2011*. Belo Horizonte: CEMIG, 2011. 123 p. Relatório.
- 30** COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). *UHE São Simão: Relatório da Inspeção Formal 2006*. Belo Horizonte: CEMIG, 2007. 130 p. Relatório.
- 31** COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). *UHE Volta Grande: Relatório da Inspeção Formal 2009*. Belo Horizonte: CEMIG, 2009b. 110 p. Relatório.
- 32** CRUZ, P. T. *100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção projeto*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.
- 33** CYGANIEWICZ, J. M.; SMART J. D. U.S. Bureau of Reclamation's use of risk analysis and risk assessment in dam safety decision making. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 20., 2000, Beijing. *Twentieth international congress on large dams – Proceedings*. Paris: ICOLD, 2000. v. 01. p. 351-369.
- 34** DALCHER, D. Aprendendo a conviver com a incerteza: uma visão além do gerenciamento de risco. *Mundo Project Management*, Curitiba, v. 39, ano 7, p. 10-19, jul. 2011.
- 35** DIAS, G. G. *Proposta de metodologia de avaliação qualitativa da segurança de barragens com base no risco*. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

**36** DIVINO, P. L. *Comportamento de enrocamentos em barragens: estudo de caso da barragem de Emborcação*. 2010. 188 f. Dissertação (Mestrado profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

**37** DUARTE, A. P. *Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco*. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

**38** ESPÓSITO, T.; CALDEIRA, L.; NAGHETTINI, M.. Aplicação da metodologia análise por diagramas de localização, causa e indicadores de falhas (LCI) em barragens de contenção de rejeitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL (REGEO 2011), 7., e SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS (GEOSSINTÉTICOS 2011), 6., 2011, Belo Horizonte. *Anais do VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos*. Belo Horizonte: 2011. Disponível em: <<http://www.regeo2011.ufmg.br>>. Acesso em: 22 set. 2013.

**39** 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.

**40** FAHLBUSCH, H. Early dams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering History and Heritage*, London, v. 162, n. 1, p. 13-18, fev. 2009.

**41** FELL, R.; MACGREGOR, P., STAPLEDON, D.; BELL, G. *Geotechnical engineering of dams*. London: Taylor & Francis Group plc, 2005. 905 p.

**42** FONSECA, A. R. *Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica: estudo de caso das barragens da UHE São Simão*. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

**43** FOSTER, M. A.; FELL, R.; SPANNAGLE M. *Analysis of embankment dam incidents*. Sydney: The University of South Wales, 1998. 282 p.



- 44** FUSARO, T. C. Um programa de segurança de barragens no setor elétrico privatizado. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 23., 1999, Belo Horizonte. *XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens – Anais*. Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1999. v. 01. p. 45-56.
- 45** FUSARO, T. C. Metodologia de classificação de barragens baseada no risco. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 25., 2003, Salvador. *XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens – Anais*. Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, 2003. p. 59-71.
- 46** GRAHAM, W. J. Estimating loss of life due to dam failure. In: ANNUAL USCOLD MEETING, 18, 1998, Buffalo. *Eighteenth Annual USCOLD Lecture – Proceedings*. USCOLD, 1998 *apud* HUGHES, A.; HEWLETT, H.; SAMUELS, P. G.; MORRIS, M.; SAYERS, P.; MOFFAT, I.; HARDING, A.; TEDD, P. *Risk Management for U. K. reservoirs*. London: CIRIA, 2000. 213 p.
- 47** HARRALD, J. R.; RENDA-TANALI, I.; SHAW, G. L.; RUBIN, C. B.; YELETAYSI, S. *Review of risk based prioritization / decision making methodologies for dams*. The George Washington University. Institute for Crisis, Disaster and Risk Management (ICDRM), 2004, 42 p. Disponível em: <<http://www.gwu.edu/~icdrm/publications/>> Acesso em: 20 mai. 2013.
- 48** HARTFORD, D. N. D.; STEWARD, R. A. Prep: a lower risk approach to dam safety prioritisation. *ANCOLD Bulletin n. 112*, p. 65-75, 2009 *apud* KREUZER, H. 2000. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 20., 2000, Beijing. *Twentieth international congress on large dams – Proceedings*. Paris: ICOLD, 2000. v. 01. p. 769-834.
- 49** HARTFORD, D. N. D.; BAECHER G. B. *Risk and uncertainty in dam safety*. London: Thomas Telford Publishing, 2004. 391 p.
- 50** HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (HSE). *Reducing risks, protecting people*. Norwich: Her Majesty's Stationery Office, 2001. 74 p.
- 51** HUGHES, A.; HEWLETT, H.; SAMUELS, P. G.; MORRIS, M.; SAYERS, P.; MOFFAT, I.; HARDING, A.; TEDD, P. *Risk Management for U. K. reservoirs*. London: CIRIA, 2000. 213 p.

- 52** INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *80 years: dams for human sustainable development*. Paris: CIGB/ICOLD, 2008a. 23 p.
- 53** INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *As barragens & a água do mundo: um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo*. Paris: CIGB/ICOLD, 2008b. 64 p.
- 54** INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Automated observation for the safety control of dams*. bulletin 41. Paris: ICOLD, 1982, 120 p.
- 55** INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Concrete face rockfill dams: concepts for design and construction*. Bulletin 141. Paris: ICOLD, 2010a, 401 p.
- 56** INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Dam failures: statistical analysis*. bulletin 99. Paris: ICOLD, 1995, 73 p.
- 57** 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.
- 58** INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Role of dams on the development and management of rivers basins*. bulletin 149. Paris: ICOLD, 2010b, 87 p.
- 59** INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Surveillance: basic elements in a “dam safety” process*. bulletin 138. Paris: ICOLD, 2009, 46 p.
- 60** JANSEN, R. B. *Advanced dam engineering: for design, construction, and rehabilitation*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1988, 811 p.
- 61** KREUZER, H. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 20., 2000, Beijing. *Twentieth international congress on large dams – Proceedings*. Paris: ICOLD, 2000. v. 01. p. 769-834.
- 62** KUPERMAN, S. C., RÉ, G., CANHOLI, A .P., FERREIRA, W. V. F., LUIZ, M. W. Segurança de Barragens: Metodologia para Tomada de Decisão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE

GRANDES BARRAGENS (SNGB), 21., 1994, Rio de Janeiro. *XXI Seminário Nacional de Grandes Barragens - Anais*. Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1994. v. 02. p. 165-174.

**63** KUPERMAN, S. C.; RE, G.; FERREIRA, W. V. F.; TUNG, W. S.; VASCONCELOS, S. E.; ZÚÑIGA, J. E. V. Análise de risco e metodologia de tomada de decisões para barragens: evolução do sistema empregado pela Sabesp. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 24., 2001, Fortaleza. *XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens - Anais*. Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, 2001. v. 02. p. 535-548.

**64** KUTZNER, C. *Earth and rockfill dams: principles of design and construction*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. 333 p.

**65** 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.

**66** LAFITTE, R. Classes of risk for dams. *Hydropower and Dams*, p. 59-66. 1996 *apud* PIMENTA, M. L. B. *Abordagens de riscos em barragens de aterro*. 2009. Lisboa: LNEC, 2009. 570 p.

**67** LAFITTE, R. Probabilistic risk analysis of large dams. *International Water Power and Dam Construction*, 45, p. 13-16. 1993 *apud* HARTFORD, D. N. D.; BAECHER G. B. *Risk and uncertainty in dam safety*. London: Thomas Telford Publishing, 2004. 391 p.

**68** MENESCAL, R. A. (Org.). *A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil*. 2. ed. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005. 315 p.

**69** MENESCAL, R. A. *Gestão da segurança de barragens no Brasil: proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo*. 2009. 769 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2009.

**70** MENESCAL, R. A.; VIEIRA, V. P. P. B.; OLIVEIRA, S. K. F. Terminologia para análise de risco e segurança de barragens. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 24.,

2001, Fortaleza. *XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens - Anais*. Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, 2001a. v. 02. p. 31-58.

**71** MENESCAL, R. A.; CRUZ, P. T.; CARVALHO, R. V.; FONTENELLE, A. S.; OLIVEIRA, S. K. F. Uma metodologia para a avaliação do potencial de risco em barragens do semi-árido. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 24., 2001, Fortaleza. *XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens - Anais*. Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, 2001b. v. 02.

**72** MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (MIN). *Manual de segurança e inspeção de barragens*. Brasília, 2002. 148 p.

**73** OLIVEIRA, A. M. S (Ed.); BRITO, S. N. A (Ed.). *Geologia de engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. 586 p.

**74** OPYRCHAL, L.; HRABOWSKI, W.; JANKOWSKI, W. The hazard index of the polish hydro-technical structures. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 20., 2000, Beijing. *Twentieth international congress on large dams – Proceedings*. Paris: ICOLD, 2000. v. 01. p.17-28.

**75** PALADY, P. Análise dos modos de falha e efeitos, prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram. Instituto IMAM, São Paulo, 1997 *apud* SAKURADA, E. Y. *As técnicas de análise dos modos de falhas e seus efeitos e análise da árvore de falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos*. 2001. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

**76** PARDO, J. A. R. *Metodologia para análise e gestão de riscos em projetos de pavimentos ferroviários*. 2009. 187 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

**77** PEREIRA, W. J. L. *Impermeabilização das superfícies de contato para implantação de estruturas de concreto em maciço de rocha sulfetada: o caso da UHE Irapé*. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

- 78** 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.
- 79** 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.
- 80** PIMENTA, M. L. B. *Abordagens de riscos em barragens de aterro*. 2009. Lisboa: LNEC, 2009. 570 p.
- 81** PORTES, A. M. C. *Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta*. 2013, 155 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- 82** PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (guia PMBOK). 4. ed. Pennsylvania: Project Management Institute Inc., 2008, 459 p.
- 83** 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](http://talsperrenkomitee.de/pdf/german_dam_research/rettemeier_2001.pdf)>. Acesso em: 18 mai. 2013.
- 84** RETTEMEIER, K.; FALKENHAGEN, B.; KÖNGETER, J. Risk assessment: new trends in Germany. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 20., 2000, Beijing. *Twentieth international congress on large dams – Proceedings*. Paris: ICOLD, 2000. v. 01. p. 625-641.
- 85** SAKURADA, E. Y. *As técnicas de análise dos modos de falhas e seus efeitos e análise da árvore de falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos*. 2001. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- 86** SALMON G. M.; HARTFORD, D. N. D. Risk analysis for dam safety. *International Water Power & Dam Construction*. Mar. 1995 *apud* KREUZER, H. 2000. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE

DAMS, 20., 2000, Beijing. *Twentieth international congress on large dams – Proceedings*. Paris: ICOLD, 2000. v. 01. p. 769-834.

**87** SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J.; GIZIENSKI, S. F.; CLEVINGER, W. A. *Earth and Earth-Rock Dams*. New York: John Wiley & Sons, 1963, 725 p.

**88** SILVA FILHO, J. F. Barragem de terra e enrocamento I. Universidade Federal de Ouro Preto, Mestrado profissional em geotecnia de barragens, Notas de aula, set 2001. 115 p.

**89** SPANISH NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (SPANCOLD). *Risk analysis applied to management of dam safety*. v4-12/03/2013. SPANCOLD, 2013, 153 p. Disponível em: <[http://www.spancold.es/archivos/monograph\\_risk\\_analysis.pdf](http://www.spancold.es/archivos/monograph_risk_analysis.pdf)>. Acesso em: 05 ago. 2013.

**90** UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UNIB). *Relatório especial: considerações sobre o sismo principal de Nova Ponte do dia 22 de maio de 1998*. Brasília. Observatório Sismológico, 1998. 9 p. Relatório.

**91** VIOTTI, C. B. Longitudinal cracking at Emborcação dam. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 19., 1997, Florence. *Nineteenth international congress on large dams – Proceedings*. Paris: ICOLD, 1997. v. 04. p. 735-747. *apud* COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). *UHE Emborcação: Inspeção formal de 2009*. Belo Horizonte: CEMIG, 2009. 120 p. Relatório.

**92** WHITMAN, R. V. Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 110 (2), 145-188, 1984 *apud* HARTFORD, D. N. D.; BAECHER G. B. *Risk and uncertainty in dam safety*. London: Thomas Telford Publishing, 2004. 391 p.

**93** ZUFFO, M. S. R. *Metodologia para avaliação da segurança de barragens*. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

# APÊNDICE A

## A.1 Glossário

**ALARP** (*As Low As Reasonably Practicable*) - Princípio que estabelece que os riscos, inferiores ao limite de tolerabilidade, são toleráveis somente se a sua redução for impraticável ou se os custos decorrentes dessa redução forem desproporcionais (dependendo do nível do risco) em relação aos benefícios obtidos.

**Análise de risco** - O uso da informação disponível para estimar o risco relativamente a indivíduos ou populações, a propriedades ou ao ambiente, devido aos perigos. As análises de risco geralmente contêm as seguintes etapas: definição do escopo, identificação de perigos e estimativa do risco.

**Análise qualitativa de risco** - Uma análise que usa forma escrita, descritiva ou escalas de ordenação numérica para descrever a magnitude de consequências potenciais e suas probabilidades de ocorrência.

**Análise quantitativa de risco** - Uma análise baseada em valores numéricos das consequências potenciais e suas probabilidades, pretendendo-se que tais valores sejam uma representação válida da magnitude real das consequências e da probabilidade dos vários cenários que são examinados.

**Apreciação do risco** - O processo de exame e julgamento do significado do risco. O estágio de apreciação do risco é aquele em que aspectos (sociais, regulatórios, legais e dos proprietários) e julgamento de valores entram no processo de decisão, explicitamente ou implicitamente, incluindo-se considerações sobre a importância relativa dos riscos estimados e das respectivas consequências sociais, ambientais, econômicas e outras, com o objetivo de identificar e analisar a gama de alternativas para o gerenciamento dos risco.

**Avaliação do risco** - O processo de tomada de uma decisão/recomendação sobre se o risco existente é tolerável e se suas medidas de controle atuais são adequadas, e, em caso negativo, se as medidas alternativas de controle do risco são justificadas ou serão implementadas. A avaliação de risco incorpora as fases de análise de risco e avaliação de risco.

**Avaliação dos riscos em portfólio** - Uma forma particular de apreciação ou de análise, que visa realizar uma estimativa comparativa dos riscos associados a todas ou a várias das barragens de um único proprietário, ou sujeitas à jurisdição de uma só entidade reguladora. Uma metodologia similar pode ser aplicada para comparar os riscos associados aos vários elementos e modos de falha de um sistema único de barragem. Tais estudos podem ser limitados apenas à fase de análise dos riscos (estimativa dos riscos), mas usualmente envolvem pelo menos uma apreciação preliminar da tolerabilidade dos riscos e a identificação preliminar das medidas de redução do risco, como base inicial para o planejamento, dependendo sua finalização de estudos mais detalhados.

**Avaliação qualitativa do risco** - Uma avaliação baseada em uma análise qualitativa de risco.

**Avaliação quantitativa do risco** - Uma avaliação baseada em uma análise quantitativa de risco.

**Cenário** - Uma combinação única de circunstâncias. O cenário define a combinação de circunstâncias com interesse para uma avaliação de risco. Assim, pode-se considerar cenários de carregamentos, cenários de falha e cenários de inundação a jusante.

**Consequências** - No que tange às análises de risco, são os resultados de um risco se concretizar. Representam os impactos a jusante, assim como em outras áreas, resultado da ruptura da barragem ou suas estruturas anexas.

**Controle do risco** - A implementação e a imposição de medidas para controlar o risco e a reavaliação periódica da sua eficácia.

**Curvas F-N** - Curvas que relacionam F (a probabilidade anual de causar N ou mais mortes) com N. Essa é a função de distribuição complementar cumulativa. Tais curvas podem ser utilizadas para expressar critérios de risco societal e para descrever os níveis de segurança de determinadas unidades industriais.

**Falha / Ruptura da barragem** - No caso geral, a inabilidade de um sistema de barragem, ou parte dele, de funcionar como previsto. Assim, em termos de desempenho para cumprir suas finalidades, inclui a incapacidade da barragem em executar funções tais como o abastecimento de água, prevenção de percolação excessiva ou contenção de substâncias perigosas. No contexto da segurança da barragem, a falha é geralmente confinada a aspectos de integridade estrutural, e, em



alguns casos, inclui o caso especial da liberação descontrolada do conteúdo de um reservatório por meio do colapso total ou parcial da barragem. No campo de engenharia de barragens, especialmente quando o sistema considerado é a barragem, o termo “falha” parece inapropriado, sendo melhor substituído pelo vocábulo “ruptura”. No entanto, na tentativa de não ferir os princípios básicos de compatibilidade (ver item 2.5) e a prática já estabelecida na área de análises de risco, o termo “falha” é também bastante utilizado no presente trabalho.

**Efeitos** - No contexto do FMEA (ou FMECA), esse termo refere-se às consequências para o funcionamento de um sistema (ex: barragem) de uma falha em alguns dos seus componentes. Se o sistema em análise é uma barragem, essas consequências devem ser distinguidas das consequências remotas (no vale a jusante), os quais podem também resultar da mesma ruptura, tais como perdas de vida e danos materiais devidos à propagação da onda de inundação do reservatório da barragem.

**Gestão de risco** - Aplicação sistemática de políticas, procedimentos e práticas de gestão às tarefas de identificação, análise, apreciação, avaliação, mitigação e controle do risco.

**Identificação dos riscos** - Processo de determinar o que pode dar errado, por que e como.

**Incerteza** - Previamente usada como referência a situações em que a probabilidade dos resultados potenciais não podia ser descrita por funções densidade de probabilidade objetivamente conhecidas. Presentemente é usada para descrever qualquer situação sem certeza, seja ou não descrita por uma distribuição de probabilidades. No contexto da segurança de uma barragem, incerteza pode ser atribuída à (i) variabilidade inerente às propriedades e aos eventos naturais e (ii) conhecimento incompleto de parâmetros e das relações entre valores de entrada e saída.

**Limite** - Em relação ao nível de risco, é o nível que, quando excedido, é inaceitável. Riscos maiores não podem ser justificados, exceto em circunstâncias extraordinárias (tipicamente quando a continuidade do risco é autorizada pelo Estado ou agência reguladora em prol de um interesse maior da sociedade).

**Mecanismo de falha** - Um mecanismo descrito por estados e processos físicos que devem ocorrer em conformidade com as leis naturais para que o modo de falha evolua da iniciação (causa) até a realização do efeito de falha final de interesse.

**Mitigação do risco** - A aplicação seletiva de técnicas e de princípios de gestão apropriados para reduzir a probabilidade de uma ocorrência ou das suas consequências adversas ou ambas.

**Modo de falha** - O modo como a falha pode ocorrer, descrito pelos meios como as falhas dos elementos ou componentes devem acontecer para provocar a perda de função do subsistema ou sistema. No contexto do FMEA, o modo de falha pode ser expresso como uma negativa da função atribuída ao elemento ou componente.

**Perigo (*hazard*)** - Condição, que pode resultar tanto de uma causa externa (ex: sismo, cheia ou causa humana), como de uma vulnerabilidade interna com o potencial para iniciar o modo de falha. Uma fonte de dano potencial ou uma situação com o potencial para provocar perdas.

**Probabilidade** - Uma medida do grau de confiança em uma previsão, ditada pelas evidências, tendo em conta a natureza de uma quantidade incerta ou a ocorrência de um evento futuro incerto. É uma estimativa da probabilidade da magnitude de uma quantidade incerta ou a probabilidade de ocorrência de um evento futuro incerto. Sua medida tem valores entre 0 (impossibilidade) e 1 (certeza).

Existem duas interpretações principais:

- Estatística - Frequência ou fração. Resultado de um experimento repetitivo, tal como o lançamento de moedas. Inclui também a ideia de variabilidade da população. Esse número é chamado de “probabilidade objetiva”, uma vez que existe no mundo real e é mensurável por meio da realização do experimento.
- Probabilidade subjetiva - Medida quantificada da crença, julgamento ou confiança na probabilidade de um resultado, obtida por meio da consideração de toda a informação disponível, de uma forma honesta, justa e com um mínimo de desvio. A probabilidade subjetiva é afetada pelo estado do conhecimento de um processo, pelo julgamento relativamente à sua avaliação ou pela quantidade e qualidade da informação. Pode variar ao longo do tempo em função das mudanças no estado de conhecimento.

**Resposta do sistema** - Representa como uma barragem responde, expressa como uma probabilidade condicional de falha para um dado cenário de carregamentos aplicados e condições simultâneas.

**Risco** - Medida da probabilidade e da severidade de um efeito adverso para a vida, saúde, bens e ambiente. No caso geral, o risco é estimado pelo impacto combinado do conjunto de três elementos: cenário, probabilidade de ocorrência e consequência associada. No caso especial, o risco médio é estimado pela esperança matemática (valor esperado) das consequências de um evento adverso ocorrer (ou seja, o produto da probabilidade de ocorrência e da consequência, combinado para todos os cenários).

**Risco aceitável** - Risco que todos os indivíduos impactados estão preparados para aceitar, admitindo que não haja alterações nos mecanismos de controle do risco. Tal risco é considerado insignificante e adequadamente controlado.

**Risco individual** - O incremento de risco imposto a um indivíduo pela existência de uma unidade industrial perigosa. Esse incremento de risco é um adicional ao risco de vida, com o qual o indivíduo viveria em uma base diária se a unidade não existisse, ou no contexto da segurança de barragens, se a barragem não rompesse.

**Risco intolerável** - Risco que é maior que o risco tolerável.

**Risco involuntário** - Risco imposto à população por uma entidade de controle e não assumido como uma livre escolha dessa população em risco.

**Risco residual** - O nível de risco remanescente em qualquer instante antes, durante e depois de ter sido implementado um programa de medidas de mitigação do risco.

**Risco societal** - Risco que assume consequências de grande escala e/ou abrangência que implicam em uma resposta do meio social e político, por meio de discussão pública e de mecanismos de regulação. Riscos dessas dimensões estão tipicamente distribuídos de forma desigual, assim como os respectivos benefícios esperados.

**Risco tolerável** - Risco dentro de uma gama com a qual a sociedade pode viver de forma a assegurar determinados benefícios. É uma gama de riscos que não devem ser vistos como negligenciáveis ou ignoráveis, mas que, pelo contrário, devem ser mantidos sob revisão e reduzidos, se e como possível.

**Risco voluntário** - Um risco que o indivíduo assume voluntariamente com o objetivo de obter algum benefício.

**Sistema** - Um sistema é uma entidade definida constituída por elementos discretos identificáveis e inter-relacionáveis. É um arranjo ordenado desses elementos (por exemplo, área limitada espacialmente, estruturas, componentes de equipamentos mecânicos e elétricos e operadores) concebido para mostrar as interações entre os vários elementos no desempenho da função do sistema. Por simplicidade, o termo geral “sistema” é utilizado sem distinção entre os vários níveis dos sistemas.

## A.2 Descritores índice global de risco: justificativa da pontuação do portfólio de barragens

- Sismicidade ( $\alpha_1$ )

O Brasil, por estar situado no interior da placa tectônica da América do Sul, uma região continental estável, apresenta uma sismicidade natural bem inferior, ou praticamente mínima, se comparada a outras regiões do mundo. O estado do Acre é o que apresenta maior nível de atividade sísmica, devido ao processo de subducção da Placa de Nazca em relação à Placa Sul-Americana, que gera uma área de instabilidade na fronteira entre o Peru e Acre. No entanto, a criação de um reservatório artificial também pode, em certas situações, ocasionar o aparecimento de tremores de terra. Prova disso é que existem no Brasil vários casos de sismicidade induzida por reservatórios hidrelétricos. Esse efeito é provocado pelo peso de água do reservatório (aumento das tensões máximas) ou pelo efeito lubrificante e de aumento de poropressão em camadas profundas ou em falhas presentes na crosta terrestre (ELETROBRÁS, 2003).

Aparentemente, o maior número de casos de SIR ocorre na região Sudeste, o qual se deve provavelmente ao maior número de reservatórios existente nessa região, conforme observado na FIG. A.1. Nem todos os reservatórios hidrelétricos são susceptíveis a provocar sismicidade induzida, o que vai depender das características sismotectônicas da região que abrange a área do reservatório.

O registro instrumental da sismologia brasileira está intimamente relacionado ao monitoramento sismográfico de áreas de grandes reservatórios hidrelétricos, cujas construções das barragens se deram, especialmente, a partir da década de 70 do século passado. A Cemig, pioneira nessa atividade, mantém um programa de monitoramento sismológico de seus reservatórios desde 1975. Das barragens estudadas, merecem destaque quanto à ocorrência de sismos as barragens de Irapé e Nova Ponte. Em Irapé, o sistema de monitoramento sismológico da Cemig já registrou evento de magnitude 3 na escala Richter, enquanto em Nova Ponte, 4. Ambos os eventos são considerados sismos desencadeados pelos reservatórios. No entanto, para o caso de Nova Ponte, por exemplo, o Observatório Sismológico de Brasília (UNB, 1998) concluiu que evento dessa magnitude, que produziu uma aceleração horizontal da ordem de 0,07g, não é suficiente para causar danos em construções bem edificadas. Além disso, outro sismo semelhante, no mesmo local, é pouco provável em um futuro próximo.

Diante do exposto, com relação ao descritor relativo à sismicidade, assume-se que o valor seja baixo para Nova Ponte e Irapé e mínimo ou nulo para as demais barragens, muito embora os valores de referência do método (velocidade) sejam desconhecidos.

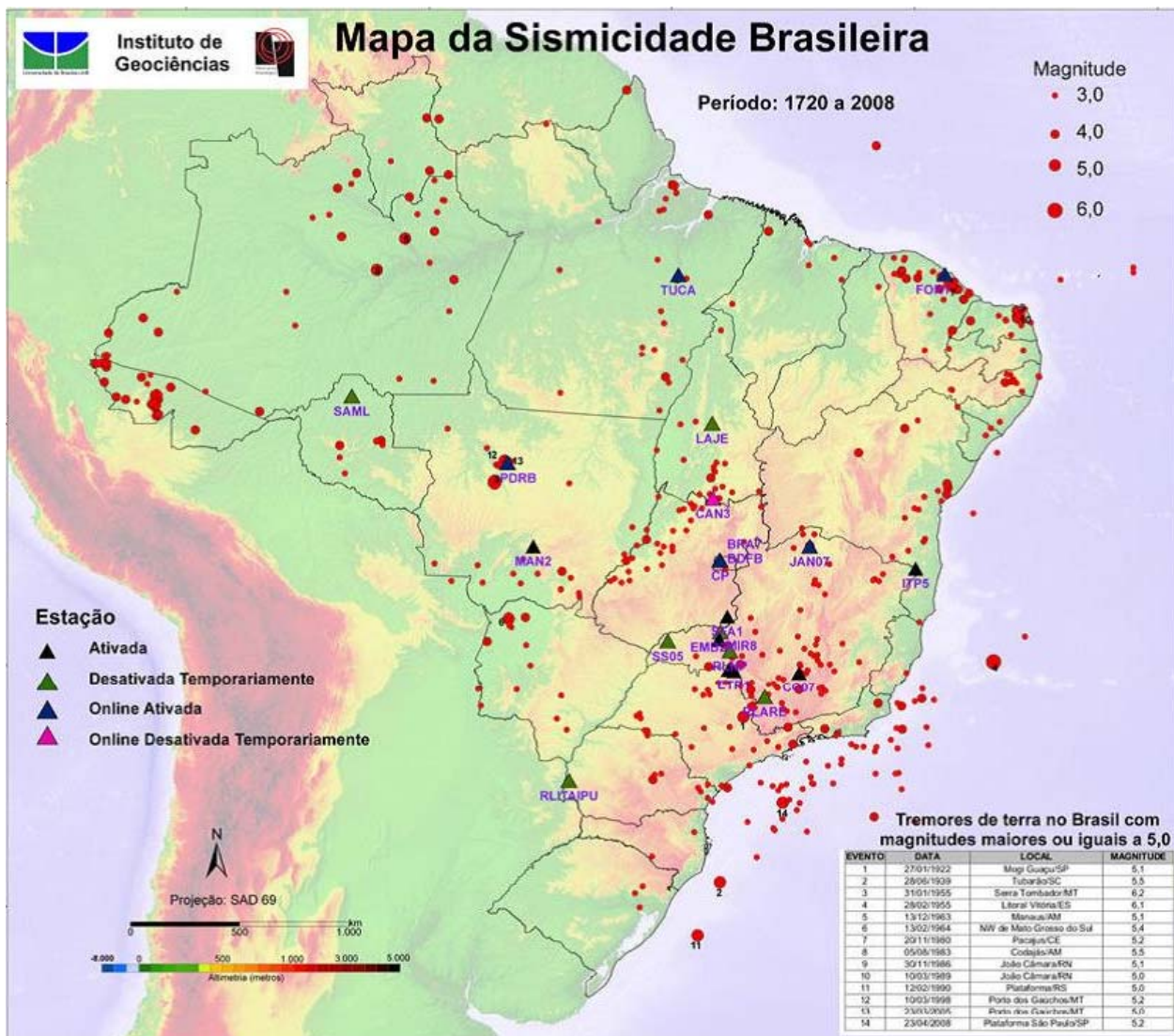


FIGURA A.1 – Mapa da sismicidade brasileira

Fonte: Observatório Sismológico da UnB (arquivo Cemig)

- Perigos de escorregamentos de taludes no reservatório ( $\alpha_2$ )

Esse descritor reflete a preocupação com a instabilidade e deslizamento de grandes massas para o interior do reservatório que possam causar o galgamento da barragem. Um caso bastante conhecido é o acidente ocorrido na barragem de Vajont, em 1963, onde o deslizamento de uma grande massa de solo criou uma onda de cheia que galgou a barragem e destruiu o vale a jusante. No caso do presente estudo, com exceção da barragem de Irapé, todas as demais apresentam vales muito

abertos, caracterizando risco nulo de ocorrência de tais escorregamentos. Já na barragem de Irapé, apesar de se inserir em um vale bastante encaixado, a geologia das encostas é constituída de maciços rochosos de boa qualidade, sem risco de escorregamentos.

- Perigos de cheias superiores às de projeto ( $\alpha_3$ )

Todas as barragens sob análise atendem aos critérios de projeto atuais quanto à capacidade de extravasão (cheia máxima provável ou decamilenar), por isso a probabilidade de cheias superiores às de projeto são praticamente nulas. Interessante destacar que esse descritor apresenta uma distinção em função do tipo de barragem, podendo-se observar como é tratada a questão do potencial de risco intrínseco de cada tipo de estrutura (terra ou concreto), quando considerados os possíveis efeitos resultantes da cheia (galgamento em estrutura de terra é mais danoso do que na de concreto).

- Funcionamento do reservatório ( $\alpha_4$ )

Embora a operação do reservatório não seja claramente caracterizada como um perigo externo, ela é justificada em publicação da ICOLD (ICOLD, 1982), tendo em vista as prejudiciais variações de um carregamento hidrostático imposto à barragem.

Pela característica fundamental das barragens estudadas apresentarem reservatórios importantes, com grandes volumes, seus funcionamentos são pontuados com nota mínima nesse descritor, pois as variações de nível são lentas e geralmente associadas a uma regularização anual. As usinas de Emborcação, Irapé, Nova Ponte, São Simão e Três Marias possuem reservatórios com função de acumulação e regularização plurianual, enquanto as usinas de Miranda, Jaguará e Volta Grande apresentam reservatório a fio d'água, com nível d'água praticamente constante ao longo do ano.

- Ações ambientais agressivas ( $\alpha_5$ )

Considera-se que as ações ambientais da região sudeste do país são amenas (amplitudes térmicas relativamente pequenas, baixas velocidades de vento, chuvas intensas no verão) e não comprometem o desempenho de estruturas civis (classificadas como “muito fracas”). A única exceção entre as barragens em análise desse descritor se faz para Irapé. O local de implantação da barragem é caracterizado por rochas com concentração de sulfetos. Assim, no próprio meio

ambiente, com a presença da água e oxigênio, ocorre uma reação com os sulfetos presentes nas rochas, gerando produtos ácidos nocivos às estruturas, principalmente às de concreto (PEREIRA, 2008). Desse modo, por uma questão de singularidade da geologia local, associada com ações ambientais (água), pontuou-se esse descritor com maior rigor para o caso específico de Irapé.

- Dimensionamento estrutural ( $\alpha_6$ )

Entende-se que, nesse quesito, a única barragem que mereça pontuação relevante é a de Emborcação. Como relatado por Divino (2010), o projeto da barragem teve início numa época em que estava se desenvolvendo a construção de grandes barragens de enrocamento no Brasil. No caso específico de Emborcação, o modelo constitutivo e parâmetros de deformabilidade considerados no projeto não foram adequados, conforme evidenciado, na fase de operação, pelos recalques máximos da ordem de 3,9m e aparecimentos de trincas longitudinais na crista.

- Fundações ( $\alpha_7$ )

A barragem de Três Marias foi assentada em condições muito específicas de fundação, com complexas camadas de cascalho e argila porosa, que influenciam de forma importante o processo de percolação de água. As demais barragens em estudo apresentam boas fundações quando comparadas com as condicionantes geológico-geotécnicas relevantes que ocorrem sob a barragem de Três Marias.

- Órgãos de descarga ( $\alpha_8$ )

As grandes barragens do setor elétrico usualmente têm a vazão de projeto dos órgãos extravasores dimensionada para a cheia máxima provável ou decamilenar. A Cemig realiza periodicamente testes de abertura das comportas e garante redundância nos sistemas de alimentação para operação das comportas. Por isso, considera-se elevada a confiabilidade desses dispositivos.

- Condições de manutenção ( $\alpha_9$ )

A Cemig mantém um programa formal de segurança de barragens, atuando na fase de diagnóstico (com inspeções de campo periódicas e análise contínua da instrumentação de auscultação) e na fase de planejamento e execução de obras e reparos, garantindo, dessa forma, condições perfeitamente



adequadas de manutenção de suas barragens. Esse descritor foi avaliado pela análise das informações contidas no banco de dados de deterioração das barragens, disponível em sistema informatizado da Cemig GT. Como critério considerou-se a lista de problemas atualmente existentes em cada barragem e, tendo como referência a experiência com o desempenho histórico das barragens da Cemig, adotou-se um valor de referência de condições “muito boas” equivalente a um  $V_m < 150$ , conforme definido no item 2.6.5 desta dissertação. Resumidamente, os problemas mais importantes de manutenção das barragens pontuadas com valor 2 estão relacionados às trincas na crista e deformações nos maciços de Irapé e Emborcação, percolações pela fundação e maciço de Três Marias e dúvidas quanto à percolação pela fundação da margem direita de Volta Grande.

- Danos potenciais humanos e econômicos ( $\alpha_{10}$  e  $\alpha_{11}$ )

O método leva em consideração o volume do reservatório e a existência de instalações a jusante como representativos dos possíveis danos em caso de ruptura. Conforme discutido na metodologia, o aspecto relativo à consequência é tratado com menor profundidade no presente trabalho por não envolver o caráter iminente técnico da engenharia de barragens. De qualquer forma, considerando que todas as usinas em análise são grandes barragens, dispostas em cascata e situadas no sudeste brasileiro (região desenvolvida economicamente e com grande densidade populacional), as consequências de eventuais rupturas seriam catastróficas. Apenas Jaguará apresenta pontuação inferior quando se trata do volume do reservatório.

### A.3 Descritores índice de Lafitte: justificativa da pontuação do portfólio de barragens

- Sismicidade ( $\alpha_1$ )

O método utiliza a escala Medvedev-Sponheuer-Karnik para avaliação da sismicidade, que indica o grau de intensidade pelo qual o local em análise é afetado pelo sismo. Essa escala tem sua origem associada a dados de aplicação da escala Mercalli modificada. Ambos os métodos têm uma avaliação subjetiva e quantificam a intensidade sísmica de I a XII.

O maior evento conhecido nas barragens em estudo é aquele já discutido sobre a barragem de Nova Ponte, conforme relatado por UNB (1998). Na ocasião, o sismo foi classificado como sendo de intensidade VI na escala Mercalli Modificada. Considerando que a amplitude e a descrição de quantificação da escala Mercalli são similares às da escala MSK, pode-se inferir que esse evento também estaria associado a uma intensidade VI na escala MSK (sismo imediatamente identificado; móveis mexem). Muito embora um sismo dessa magnitude seja considerado um evento relevante para os padrões brasileiros, no método ele é classificado com pontuação mínima. Dessa forma, todas as barragens são niveladas com a pontuação mais favorável.

- Hidrologia ( $\alpha_2$ )

Com relação ao método de índice global de risco, esse descritor tem equivalência com o perigo de ocorrência de cheias superiores às do projeto, mas também considera o conhecimento disponível da hidrologia, que indicaria a confiabilidade no valor da cheia de projeto dos órgãos extravasores e na sua operação. Todas as barragens são bem pontuadas nesse quesito pelo fato da existência de estudos de cheia e do atendimento aos critérios de projeto quanto à capacidade de extravasão.

- Aporte de sedimentos ( $\alpha_3$ )

Esse item revela a preocupação do autor do método com o seu parque gerador, constituído majoritariamente por estruturas de concreto. Nesse caso, o aporte de sedimentos poderia alterar as condições de carregamento na estrutura e afetar sua estabilidade. Para a estabilidade de barragens de terra esse descritor não é relevante.

- Geologia ( $\alpha_5$ )

Diferentemente dos demais descritores contidos nessa classe, a geologia em si não é um perigo associado às barragens, mas sua consideração nesse grupo pode ser justificada por se tratar de uma condicionante local, objetivo da classe CL. Esse descritor, dependendo do entendimento, também pode apresentar um sobreamento com o descritor ( $\alpha_8$ ) referente à qualidade das fundações, sendo portanto superestimado. Além disso, a classificação do descritor se resume a boas, razoáveis e medíocres. Em que pese algumas barragens do estudo apresentarem condicionantes geológicas mais relevantes, ainda assim podem ser classificadas como boas.

- Qualidade do corpo da barragem ( $\alpha_7$ )

De forma similar ao discutido no item de “dimensionamento estrutural” dos métodos anteriores, considera-se apenas a barragem de Emborcação com pontuação relevante nesse descritor, devido à sua “qualidade” (confiabilidade) ter sido prejudicada pela adoção de modelo constitutivo, parâmetros de deformabilidade e compactação/lançamento de materiais não adequados, resultando em deformações importantes na estrutura. Salienta-se que se julgou pertinente pontuar a qualidade do corpo da barragem associada a aspectos de manutenção no descritor  $\alpha_{12}$ .

- Descarregador de fundo ( $\alpha_{11}$ )

As barragens em análise não possuem descarga de fundo. Desse modo, esse item foi desconsiderado no cálculo da média ponderada do índice FO.

- Monitoramento, operação e manutenção ( $\alpha_{12}$ )

Além das condições de manutenção já consideradas nas classificações anteriores, o método atual também contempla monitoramento e operação. No caso em análise, a operação das usinas hidrelétricas é realizada obedecendo rigorosamente às regras operativas existentes e, além disso, o controle dos níveis dos reservatórios é uma obrigação legal no setor elétrico. O monitoramento das condições da barragem é conduzido por meio de um programa formal de segurança de barragens. As inspeções de campo são realizadas seguindo a periodicidade preconizada pelo CBDB e ICOLD, eventualmente a serem ajustadas após a regulamentação da lei de segurança de barragens. Quanto à

instrumentação, as oito barragens têm as atividades de coleta e análise dos dados realizadas periodicamente, possuindo instrumentação compatível com o porte e tipo das estruturas.

Mediante o exposto, julga-se que o aspecto ligado à manutenção é o fator dominante na avaliação desse descritor. Sua classificação foi estabelecida com o mesmo critério proposto no índice global de risco, associado ao banco de dados de deteriorações existentes em cada barragem.

- Consequências na população a jusante ( $\alpha_{13}$ ) e no meio ambiente, estruturas ( $\alpha_{14}$ )

O método segrega a parcela relativa à perda de vidas humanas (fatalidades) e à existência de instalações a jusante. No método do índice global de risco, esses fatores são avaliados em um único descritor. Como já discutido, pelo porte da estrutura e volume dos reservatórios, todas as barragens recebem pontuações máximas.

- Importância das infraestruturas em estudo ( $\alpha_{15}$ )

Devido à geração relevante das usinas em análise (superiores a 300 MW), todas podem ser consideradas muito importantes no cenário do sistema interligado nacional.

- Sistemas de aviso e alerta ( $\alpha_{16}$ )

A Cemig possui planos de emergência para suas barragens. Nesses procedimentos são descritos e cadastrados os meios de aviso e alerta disponíveis, incluindo a comunicação com a defesa civil.

- Clima ( $\alpha_5$ ), Estabilidade dos taludes do reservatório ( $\alpha_6$ ), Qualidade das fundações ( $\alpha_8$ ), Variação do nível da água no reservatório ( $\alpha_9$ ) e Órgãos de descarga ( $\alpha_{10}$ )

Esses descritores apresentam equivalência com outros utilizados no método de índice global de risco, sendo válida a discussão já realizada anteriormente no Apêndice A.2.

#### **A.4 Descritores metodologia Sabesp: justificativa da pontuação do portfólio de barragens**

- Dimensão da barragem<sup>2</sup> e Volume de água armazenada<sup>3</sup>

Pela análise das faixas de classificação dos descritores relativos à dimensão e volume, depreende-se que as barragens da empresa Sabesp têm porte consideravelmente menor do que as barragens incluídas neste estudo, homogeneizando a pontuação no valor máximo. Isso ocorre de modo geral para todos os descritores da classe de periculosidade potencial, nivelando a pontuação das barragens.

- Tipo de barragem<sup>7</sup>

Nesse quesito, quando a barragem apresenta dois tipos de estruturas compondo o barramento (terra e enrocamento), como é o caso de Miranda e São Simão, ela foi classificada como sendo da estrutura mais desfavorável.

- Órgão vertente<sup>8</sup>

Todas as barragens em estudo apresentam vertedouros de superfície controlados por comportas tipo segmento.

- Informações de projeto<sup>10</sup>

Todas as barragens em análise são bem documentadas, tendo sido a existência de informações de projeto uma das condicionantes consideradas no capítulo 3 para a seleção das barragens. A disponibilidade de relatórios técnicos e projetos é fator essencial para entendimento pormenorizado do desempenho da barragem, e consequente aplicação dos métodos de análise de risco.

- Percolação<sup>12</sup>

O descritor relativo à percolação, segundo Kuperman *et al.* (2001), pode assumir quatro classificações possíveis: Conforme previsto em projeto ou inexistente (os níveis piezométricos e as vazões de percolação se encontram dentro do previsto pelas hipóteses de projeto e em regime estabilizado, estendendo tal situação ao corpo da barragem, às ombreiras e às fundações de todas as

estruturas); Fora do previsto, mas não crítica (significando que, pontualmente, algum instrumento indica níveis piezométricos ou vazões mais elevados que o previsto, não tendo sido constatada nenhuma implicação importante no desempenho global do trecho afetado); Crítica (significando terem sido constatadas anormalidades na distribuição das pressões ou das vazões, com implicações importantes ou em vias de se tornarem importantes, em vista da evolução do fenômeno); e Desconhecida, quando nada se conhece acerca do acompanhamento quanto à percolação.

Na prática, barramentos extensos e bem instrumentados como as barragens em estudo, inevitavelmente vão apresentar, pontualmente, algum instrumento indicando nível piezométrico ou vazão mais elevados que os previstos em projeto. Pequenas surgências (desde que controladas e monitoradas) também são comuns de serem observadas em estruturas de grande porte. Dessa forma, para barramentos extensos é utópico se pensar em uma situação exatamente como prevista em projeto (ou inexistente). Em suma, praticamente todas as barragens acabam recaindo na classificação “fora do previsto, mas não críticas”. A única exceção pode ser considerada para a barragem de Três Marias, que apresenta percolações importantes através do aterro e fundações, ocorrências essas que vêm sendo registradas desde o enchimento do reservatório e monitoradas a partir de 1962. Julga-se que a palavra “crítica” não seja totalmente adequada por superestimar a gravidade do problema e transparecer um caráter de descontrole, o qual não é o caso. O próprio método descreve que a classificação “crítica” também significa um problema que pode se tornar crítico caso haja evolução do fenômeno, enquadramento mais apropriado para as percolações em Três Marias.

- Deformações<sup>13</sup>

Esse descritor apresenta uma lógica semelhante à da percolação quanto à sua classificação. A previsão de deformações evidentemente sempre existe na fase de projeto, mas geralmente verifica-se carência de valores de controle, diferentemente do que ocorre, por exemplo, para níveis piezométricos (poropressões). Quando as deformações são de impacto nulo e sua magnitude perfeitamente inseridas no cálculo da sobrelevação da barragem, julga-se que a classificação de “conforme previstas em projeto” seja válida.

Das barragens em análise destaca-se a de Emborcação, considerada como “crítica”, devido às trincas existentes, à magnitude das deformações observadas e ao potencial de evolução do fenômeno, em função das oscilações do nível do reservatório. Já Irapé é pontuada como “fora do

previsto”, por apresentar trincas na crista da barragem, decorrentes da altura da barragem (210 m) e da grande diferença de rigidez entre materiais adjacentes (transições e enrocamento). Por outro lado, a barragem de Irapé não apresenta deformações da ordem de grandeza daquelas observadas em Emborcação, justificando sua pontuação ligeiramente mais favorável.

- Nível de deterioração de paramentos ou taludes<sup>14</sup>

Essa classificação aplica-se aos taludes protegidos com enrocamento e também àqueles em solo (revestidos com grama), embora seja dado maior enfoque na degradação dos materiais, em especial do rip-rap. A ação do intemperismo pode modificar a granulometria dos enrocamentos, alterando seus parâmetros de resistência e conseqüentemente as condições de estabilidade do talude. Já a deterioração do revestimento de proteção pode favorecer a ocorrência de erosão externa e, em casos críticos, desencadear a abertura de brechas.

O descritor assume as seguintes classificações: nível mínimo ou nenhum de deterioração, nível baixo, moderado, alto e nível excessivo de deterioração. Conforme ressaltado por Kuperman *et al.* (2001), o julgamento do nível de desagregação alcançado por uma determinada estrutura, ou trecho dela, é muitas vezes subjetivo. Apenas no caso em que a deterioração tiver alcançado níveis muito elevados é que ela poderá ser objetivamente identificada como importante. Dessa forma, torna-se mais relevante a análise de sua evolução com o tempo, acompanhada a partir de inspeções periódicas e sistemáticas das estruturas.

As barragens de Jaguara, Miranda, Três Marias, Irapé e Emborcação não apresentam indícios de degradação dos materiais de proteção dos taludes, sendo classificadas como mínimos ou nenhum. Já as barragens de Volta Grande, São Simão e Nova Ponte, com proteção constituída por basalto denso, apresentam uma desagregação típica por fragmentação, resultando em diminuição da granulometria. Esse fenômeno ocorre devido à expansão de argilo-minerais em fraturas nos blocos de basalto. No caso de São Simão, apesar da situação ser mais extensa, a ocorrência é verificada especificamente no talude de jusante, sendo mais favorável do que nos casos de Nova Ponte e Volta Grande, que ocorrem no rip-rap. No geral, observa-se uma redução da granulometria do rip-rap em áreas bem definidas dos taludes. Esse fenômeno vem sendo acompanhado desde o início da operação, e sua evolução é lenta e superficial, não havendo indícios de problemas criados por esses fatores, sem necessidade de reparos imediatos. Levando em consideração esses aspectos, as deteriorações para as três barragens são classificadas como baixas.

- Erosões a jusante<sup>15</sup>

Esse descritor traduz o dano que as erosões a jusante podem causar por meio de solapamento ou instabilização de quaisquer estruturas da barragem. Nenhuma das barragens apresenta erosões a jusante relevantes para o caso desse descritor.

- Importância<sup>1</sup>, Impactos a jusante<sup>4, 5 e 6</sup>, Vazão de projeto<sup>9</sup>, Frequência na avaliação do comportamento<sup>11</sup> e Condições dos equipamentos dos descarregadores<sup>16</sup>

Esses descritores têm equivalência com outros já comentados em métodos anteriores, suprimindo-se aqui a discussão.



## **A.5 Índices metodologia Cemig: justificativa da pontuação do portfólio de barragens**

- Potencial de risco (P)

Como nos métodos anteriores, quando o barramento apresenta múltiplas classificações (de tipo de barragem ou de fundação), a escolha é feita com aquele tipo que apresenta maior potencial de risco e que, concomitantemente, seja um material representativo na extensão total do barramento. No que tange aos tipos de fundação possíveis, a metodologia os diferencia somente em rocha e solo/aluvião, incluindo ainda a existência ou não de tratamento. A tendência observada nos métodos mais atuais é estratificar a fundação de acordo com o perfil de intemperismo, baseado na evolução pedogênica.

- Vulnerabilidade quanto aos aspectos de projeto (Vp)

De modo geral, as usinas da Cemig GT atendem aos critérios de projeto preconizados pela Eletrobrás. Como pontuações notáveis para o descritor Vp destacam-se novamente Três Marias e Emborcação. Na primeira delas, considerando os problemas de percolações através do aterro e fundações, pode-se inferir que o dimensionamento do sistema de drenagem foi inadequado e o tratamento de fundação insuficiente por não garantir um meio efetivo de controle da percolação. Já em Emborcação, a rigidez das transições quando comparada com a do material adjacente (enrocamentos) caracteriza que o dimensionamento também foi equivocado. Apesar do item “dimensionamento do sistema de drenagem e transições do maciço” implicitamente referir-se ao critério de percolação, falta um item concernente ao princípio de compatibilidade de deformações, no qual a barragem de Emborcação ficaria mais bem inserida.

- Vulnerabilidade quanto aos aspectos de manutenção (Vm)

Em síntese, apesar de não representarem perigo iminente às estruturas, as deteriorações mais impactantes na manutenção das barragens estão relacionadas às trincas na crista e deformações nos maciços de Irapé e Emborcação, surgências no aterro e fundações de Três Marias, dúvidas quanto à percolação pela fundação da margem direita de Volta Grande, fenômeno de reação álcali-agregado nas estruturas de concreto de Jaguará, piezometria elevada na interface das estruturas de solo e concreto de Miranda e crescimento de vegetação em áreas pontuais na barragem de São Simão.

Como exemplo ilustrativo, a FIG. A.2 mostra a lista de deteriorações que vêm sendo reparadas e/ou monitoradas na barragem de Emborcação, disponível em sistema informatizado interno da Cemig GT.

UHE Emborcação					
Lista de deteriorações não reparadas - 2012					
Deteriorações que afetam a vulnerabilidade					
Resultado					
Local	Descrição	G	U	G*U	
Barragem de Terra/En...	Dúvidas quanto ao adequado funcionamento estrutural da barragem de enrocamento, especialmente na ...	20	1,5	30	<input type="checkbox"/>
Barragem de Terra/En...	DESALINHAMENTO MEIO FIO: Desalinhamento dos meio-fios da pista de rolamento na crista da barragem...	10	1	10	<input type="checkbox"/>
Barragem de Terra/En...	TRINCAS TRANSVERSAIS: Abertura de trincas transversais à crista. As trincas transversais foram ob...	10	1	10	<input type="checkbox"/>
Barragem de Terra/En...	TRINCAS LONGITUDINAIS MEIO DA CRISTA: Em 2007 foram observadas trincas incipientes próximas às es...	10	1	10	<input type="checkbox"/>
Barragem de Terra/En...	TRINCAS A MONTANTE: Aparecimento de uma trinca longitudinal na seção 2 (est 9+95,0m), junto ao me...	10	1,5	15	<input type="checkbox"/>
Barragem de Terra/En...	TRINCAS A JUSANTE: Abertura de trincas longitudinais na pista de rolamento da crista. Estas trinc...	10	1	10	<input type="checkbox"/>
Barragem de Terra/En...	Ocorrência de "embarrigamento" no enrocamento do talude de montante, ao longo de toda a sua exten...	10	2	20	<input type="checkbox"/>
Barragem de Terra/En...	Inexistência de dispositivo para medição das pressões nos drenos dos túneis de desvio o que impos...	6	1,5	9	<input type="checkbox"/>
Reservatório - Sela ...	O enrocamento de rip-rap da sela topográfica na margem esquerda apresenta grandes falhas o que co...	6	0,5	3	<input type="checkbox"/>
Barragem de Terra/En...	Obstrução de canaleta na saída do tapete drenante, no pé do dique da margem esquerda. A obstruçã...	6	1	6	<input type="checkbox"/>

FIGURA A.2 – Banco de dados de deteriorações da barragem de Emborcação

Fonte: Cemig

- Consequência (C)

Com relação à classe de consequência, todas as barragens são niveladas quando considerados os danos a jusante (elevados). As diferenças nos descritores ocorrem por conta da estratificação associada à potência instalada (maior custo de reconstrução e maior perda de geração) e ao volume do reservatório (maior vazão de descarga em caso de ruptura de barragens e, conseqüentemente, maior área impactada a jusante e maiores danos sócio-ambientais).

## A.6 Descritores potencial de risco: justificativa da pontuação do portfólio de barragens

- Periculosidade<sup>1,2,3,4 e 5</sup>

Os descritores da periculosidade estão diretamente ligados aos dados de projeto ou características técnicas da barragem, já amplamente discutidos nos itens anteriores.

- Tempo de operação<sup>6</sup>

Esse descritor é abordado na classe de vulnerabilidade, enquanto na metodologia Cemig enquadra-se na classe equivalente à periculosidade (= potencial de risco na metodologia Cemig). Aparentemente é mais adequado considerá-lo junto aos dados de projeto, uma vez que a idade de uma estrutura não informa sobre as suas condições de operação e manutenção, mas poderia informar sobre sua periculosidade, visto que estatísticas relativas à ruptura de barragens (ICOLD, 1995) indicam uma concentração de casos (de ruptura) nos primeiros anos de vida dessas estruturas.

- Existência de projetos *as built*<sup>7</sup> e confiabilidade das estruturas vertedouras<sup>8</sup>

Descritores da classe de vulnerabilidade e já foram considerados em metodologias anteriores. Todas as barragens avaliadas possuem documentação de projeto, vertedouros dimensionados adequadamente e sem restrições de operação.

- Tomada de água<sup>9</sup>

Diferentemente dos métodos anteriores, a estrutura da tomada é considerada aqui como um fator relevante na vulnerabilidade da barragem, sendo avaliada também quanto à sua forma de controle (se a montante ou jusante). A forma de controle pode ser considerada importante, pois quando o controle (abertura e fechamento da entrada de água) é a montante, pode-se interromper o fluxo de água em caso de necessidade. No caso das barragens em análise, todas as tomadas de água encontram-se em excelente estado de conservação e possuem comportas a montante.

- Percolação<sup>10</sup>

Analogamente ao discutido na metodologia Sabesp, pequenas surgências praticamente sempre serão identificadas em barramentos extensos após o enchimento do reservatório, o que não exige a necessidade de executar o controle e o monitoramento. Por essa lógica, grandes barragens

difícilmente serão pontuadas com percolação descrita como “totalmente controlada pelo sistema de drenagem”. Todas as barragens avaliadas apresentam algum ponto de surgência, monitorado sistematicamente, sem carreamento de material e sem evolução nas vazões percoladas, levando à pontuação “Sinais de umedecimento”. No caso de Três Marias, existem surgências nos taludes de jusante e na área imediatamente a jusante da barragem, também monitorados sistematicamente, mas que foram classificados como “zonas úmidas” devido às condições de fundação e de construção do maciço na década de 50, que se traduzem em maior vulnerabilidade das estruturas.

- Deformações, afundamentos, assentamentos<sup>11</sup>

A discussão das deformações é a mesma comentada anteriormente na metodologia Sabesp. Subentende-se que pequenos abatimentos estão inseridos nos valores previstos em projetos e são considerados de impacto reduzido. Destaca-se aqui a barragem de Emborcação, que recebeu a pontuação dez neste descritor, devido à presença de deformações diferenciais importantes entre os materiais da seção transversal, abatimentos no talude de montante e trincas na crista. Apesar dessa pontuação exigir, segundo o método, intervenção na barragem, julga-se que, neste caso específico, objeto de estudos, monitoramento e reparos contínuos desde o enchimento do reservatório, a recomendação precípua do método vem sendo atendida. A possibilidade de escorregamentos é descartada e as deformações, no grau em que se encontram, ainda não comprometem a borda livre mínima e a segurança da barragem.

- Deterioração dos taludes<sup>12</sup>

O descritor trata de forma geral as falhas no rip-rap e nas proteções, em contraposição à metodologia Sabesp, que remete, sobretudo, à degradação de materiais. Com isso, falhas decorrentes de presença de vegetação e movimentações localizadas e superficiais também podem ser consideradas. Diante das escalas descritivas possíveis, praticamente todas as barragens enquadram-se em “falhas no rip-rap e na proteção de jusante”, ainda que as anomalias encontradas sejam de impacto e extensão mínimos e baixos, tais como pequenas regiões com fragmentação dos blocos de rocha por intemperismo e áreas com deslocamento/escorregamentos de blocos de pequena importância.

- Importância<sup>13,14 e 15</sup>

Os descritores contidos nessa classe referem-se aos danos a jusante, tratados em todos os métodos anteriores.

## **A.7 Matrizes de classificação da Lei 12.334: justificativa da pontuação do portfólio de barragens**

- Características técnicas, estado de conservação e dano potencial associado

As matrizes de características técnicas (CT), estado de conservação (EC) e dano potencial associado (DPA), por meio de descritores equivalentes em outros métodos, já foram inteiramente discutidas, comprovando que o sistema de classificação da lei é fruto da evolução das metodologias brasileiras utilizadas nos últimos anos. A única exceção ocorre para o descritor relativo à eclusa, item aparentemente sem relação direta com segurança de barragens.

As principais dificuldades na avaliação de grandes barragens utilizando as matrizes referem-se à existência de múltiplas estruturas, com alturas variadas e, por vezes, assentes em diferentes tipos de fundação. Nesses casos, considerou-se a estrutura mais desfavorável para efeito de pontuação.

- Plano de segurança da barragem

A Cemig GT, como de praxe no setor elétrico, mantém um programa formal de segurança de barragens, que atende plenamente aos itens relativos à estrutura organizacional, procedimentos de inspeção e monitoramento e emissão anual de relatórios de inspeção com análise da instrumentação civil instalada. As barragens em estudo, como já comentado, possuem documentação técnica completa, condicionante essa considerada no capítulo 3 quando da seleção dos empreendimentos. As usinas evidentemente possuem regras operacionais, sendo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) responsável pela coordenação e controle da operação no sistema interligado nacional.

## A.8 Justificativas Diagramas LCI – Três Marias

Tabela A.1 – Justificativas dos indicadores da barragem de Três Marias

(Continua)

CAUSA	INDICADOR	JUSTIFICATIVA
Recalque	Trincas / fissuras na barragem e estruturas anexas	Trincas ou fissuras relevantes não detectadas na crista ou taludes. Principalmente na fase construtiva e início de operação, havia possibilidade de recalques diferenciais induzirem trincas internas no maciço devido à compressibilidade de camadas de fundação como a argila porosa. Há instrumentos de recalque que possibilitam o monitoramento dos recalques, bem como são executadas inspeções visuais mensais que permitem a identificação de trincas e fissuras na barragem.
	Danos nas interfaces barragem/estruturas anexas e/ou ombreiras	Danos nas interfaces não observados. As inspeções rotineiras mensais permitem a identificação de anomalias em campo.
	Percolação / infiltração	Há indícios de que percolações observadas na barragem possam ter como causa os recalques diferenciais oriundos das camadas de argila porosa e cascalho da fundação. Essa região atualmente registra os maiores recalques (aterro e fundação). Além das inspeções visuais rotineiras, existem instrumentos de auscultação que medem as grandezas (poropressões, vazões e recalques) diretamente associadas ao indicador e à causa.
	Erosão interna	Embora existam percolações através da barragem e fundação (e camadas de baixa resistência), aparentemente não há indícios de erosão interna decorrente de recalques. Os vários medidores de vazão instalados a jusante não registram evidências de carreamento de materiais. A complexidade da fundação dificulta a detecção.
	Redução da borda livre	A borda livre normal atende aos critérios de projeto. No projeto da barragem foi contemplada a sobrelevação do coroamento. Os marcos de recalque instalados na crista permitem o controle da eventual redução da borda livre.
	Galgamento / brecha	Sem evidência. O monitoramento dos reservatórios, além de ser uma obrigação legal, é feito com sistema de telemetria, focando na operação segura da barragem. Além disso, o monitoramento conta com o apoio das áreas de meteorologia e hidrologia.
Instabilidade	Deformações e trincas	Sem evidências nas inspeções visuais. A baixa resistência da argila porosa nas estacas 21+80m e 23+27m foi confirmada por sondagens a percussão (1 a 5 golpes no SPT), o que poderia favorecer a instabilidade. No entanto, estudos de estabilidade mostram que os coeficientes de segurança da barragem atendem aos preconizados nos critérios de projeto, mesmo no trecho da argila porosa. As deformações são monitoradas visualmente e por meio de instrumentação.
	Redução da borda livre	Não detectado. A borda livre normal atende aos critérios de projeto. Os marcos de recalque instalados na crista permitem o controle da eventual redução da borda livre causados por processos de instabilidade.
	Galgamento	Sem evidência. O monitoramento dos reservatórios, além de ser uma obrigação legal, é feito com sistema de telemetria, focando na operação segura da barragem. Também há apoio das áreas de meteorologia e hidrologia.

Tabela A.1 – Justificativas dos indicadores da barragem de Três Marias

(Conclusão)

CAUSA	INDICADOR	JUSTIFICATIVA
Erosão interna	Zonas úmidas, surgências, subsidências, crescimento de vegetação excessiva	Existem evidências de surgências desde o início de operação, fruto das condicionantes associadas à fundação da barragem. Os cascalhos de fundação influenciam diretamente na saturação do terreno a jusante. Nas inspeções recentemente realizadas também se detecta o crescimento de vegetação, o que aumenta a probabilidade da ocorrência do fenômeno e prejudica o monitoramento visual. Há monitoramento por meio de inspeções visuais rotineiras e instrumentação (medidores de vazão).
	<i>Piping</i>	Não são detectados carreamentos de materiais nas áreas a jusante. Na fundação da barragem, não se pode garantir que não exista passagem de finos dos materiais argilosos que envolvem os cascalhos (muitos permeáveis), causando <i>piping</i> . As inspeções rotineiras ajudam na detecção do problema, contudo o crescimento de vegetação na barragem pode comprometer sua identificação.
	Instabilidade de talude / solapamento	Não detectado. Estudos de estabilidade confirmam coeficientes de segurança da barragem adequados, mesmo para a condição de drenos inoperantes. Ademais, a probabilidade de perda de estabilidade global do talude, tendo como causa a erosão interna, é remota.
Erosão externa	Solapamento do pé da barragem	Não detectado. Facilmente identificado nas inspeções visuais rotineiras. Além disso, o canal de descarga do órgão extravasor encontra-se na margem direita, mais afastada do pé da barragem.
	Deterioração no talude de montante, espaldar	O processo de lançamento do rip-rap foi ineficiente na fase construtiva. Não há camada de transição para o aterro da barragem. Intervenções para recomposição do talude já foram realizados no passado. Atualmente há um abatimento pontual que não compromete a segurança da barragem, provavelmente associada à falha na compactação ou deslocamento causado pelas ondas do reservatório.
	Erosão em sulcos no talude de jusante	Em relatórios antigos, há registros de água de chuva que infiltrava no talude de jusante, no contato do enrocamento com o maciço, causando erosões no aterro. O problema foi resolvido com a construção de canaletas de drenagem construídas nas bermas. Atualmente há registros pontuais de erosões em alguns locais do enrocamento, principalmente nas áreas próximas às aberturas no meio-fio da crista para drenagem da pista.
	Galgamento / carreamento	Sem evidência. O monitoramento dos reservatórios, além de ser uma obrigação legal, é feito com sistema de telemetria, focando na operação segura da barragem.

Tabela A.2 – Justificativas gerais dos indicadores dos órgãos extravasores e estruturas de adução e descarga de Três Marias

CAUSA	INDICADOR	JUSTIFICATIVA
Todas em órgãos extravasores	Todos em órgãos extravasores	O vertedouro localiza-se na margem direita e dissociado das estruturas da barragem. Não há quaisquer evidências de danos às estruturas, percolações ou deteriorações dos materiais estruturais. Todos esses indícios de deteriorações podem ser determinados facilmente por meio das inspeções visuais mensais.
Tubulações danificadas	Deslocamento de tubulações	Não detectado. Os condutos forçados estão assentes em fundação constituída de rocha sã, praticamente indeformável.
	Percolação / infiltração	Não detectado. Os condutos forçados que passam sob a barragem são envelopados por concreto. Além disso, existe o sistema de drenagem na seção dos condutos, constituída por poços de alívio interligados ao tapete horizontal, assentado diretamente sobre o concreto que envolve as tubulações. Foram instalados recentemente piezômetros para monitorar eventual vazamento nos condutos.
	Movimento superficial	Não observado.
	Corrosão	Não observado.
Demais causas em estruturas de adução e descarga	Demais indicadores em estruturas de adução e descarga	A tomada de água é uma estrutura de concreto, não embutida no corpo da barragem. Não há evidências de danos a essa estrutura auxiliar.

Obs: No caso específico de Três Marias, julga-se importante justificar detalhadamente os indicadores relativos à localização “Estruturas de adução – Tubulações”, uma vez que os condutos forçados passam sob o aterro da barragem, caracterizando um ponto de vulnerabilidade.



## A.9 Justificativas Diagramas LCI – Emborcação

Tabela A.3 – Justificativas dos indicadores da barragem de Emborcação

(Continua)

CAUSA	INDICADOR	JUSTIFICATIVA
Recalque	Trincas / fissuras na barragem e estruturas anexas	Há trincas longitudinais e transversais na crista que vêm sendo monitoradas desde o enchimento do reservatório. O aparecimento das trincas é intermitente, conforme a movimentação do barramento com os ciclos de carregamento e descarregamento do reservatório. As trincas são monitoradas periodicamente durante as inspeções rotineiras. O prolongamento do núcleo até a base do pavimento da crista favorece a visualização das anomalias.
	Danos nas interfaces barragem/estruturas anexas e/ou ombreiras	Danos nas interfaces não observados. As inspeções rotineiras mensais permitem a identificação de anomalias em campo.
	Percolação / infiltração	Apesar da magnitude dos recalques observados na barragem, são pequenas as alterações observadas em termos de percolação, indicando a adequada capacidade vedante do núcleo. O tapete interno impermeável e as injeções executadas também contribuíram significativamente para a redução das vazões percoladas. Existem instrumentos de auscultação como piezômetros e medidores de vazão.
	Erosão interna	Não há evidências. Aparentemente o núcleo mantém sua capacidade vedante e as transições, embora rígidas, desempenham seu papel. Além disso, a fundação em rocha é de boa qualidade, praticamente indeformável, minimizando a ocorrência do fenômeno. O núcleo é instrumentado com piezômetros e células de pressão total.
	Redução da borda livre	A borda livre mínima atual da barragem atende aos critérios de projeto, porém a borda livre normal é mais comprometida. A continuidade das deformações expõe o indicador. Os recalques já registrados são superiores aos considerados para o cálculo da sobrelevação da barragem. Os marcos de recalque instalados na crista permitem o controle da redução da borda livre.
	Galgamento / brecha	Sem evidência. O monitoramento dos reservatórios, além de ser uma obrigação legal, é feito com sistema de telemetria, focando na operação segura da barragem. Além disso, o monitoramento conta com o apoio das áreas de meteorologia e hidrologia.

Tabela A.3 – Justificativas dos indicadores da barragem de Emborcação

(Conclusão)

CAUSA	INDICADOR	JUSTIFICATIVA
Instabilidade	Deformações e trincas	As leituras da instrumentação atualmente em operação na barragem indicam que as deformações do maciço da barragem ainda não cessaram e permanecem sem indícios de estabilização. Por outro lado, os recalques elevados, desde a fase construtiva, ocasionaram danos em vários instrumentos de recalque e deflexão, tornando o monitoramento deficiente. Os estudos de estabilidade (equilíbrio limite) indicam coeficientes de segurança adequados. No entanto, os estudos numéricos de tensão x deformação mostram zonas de plastificação na barragem que, em uma eventual proliferação com o incremento das deformações, poderiam comprometer a instabilidade da barragem.
	Redução da borda livre	A borda livre mínima da barragem atende aos critérios de projeto, mas a borda livre normal é mais comprometida. A continuidade das deformações expõe o indicador. Apesar das deformações observadas, os indícios associados à causa instabilidade não são tão claros como os associados à causa recalque. Os marcos de recalque instalados na crista permitem o controle da redução da borda livre.
	Galgamento	Sem evidência. O monitoramento dos reservatórios, além de ser uma obrigação legal, é feito com sistema de telemetria, focando na operação segura da barragem. Também há apoio das áreas de meteorologia e hidrologia.
Erosão interna	Zonas úmidas, surgências, subsidências, crescimento de vegetação excessiva	Surgência no pé da barragem junto à ombreira direita, cuja causa está associada à percolação pela fundação da barragem nesse trecho. No entanto, o problema ocorre desde a época da construção e vem sendo monitorado desde então, não sendo relevante. Os crescimentos de vegetação no enrocamento também são inexpressivos.
	<i>Piping</i>	Não são detectados carreamentos de materiais nas áreas a jusante atualmente. As fundações são de boa qualidade. Há registros de presença de material fino e areia no interior de um tanque de medidor de vazão, porém sem observações nos últimos anos e provavelmente associado a material lançado sobre o enrocamento dessa região (não estando associado à ocorrência de <i>piping</i> ). Toda a área a jusante é inspecionada visualmente com periodicidade mensal.
	Instabilidade de talude / solapamento	Não detectado. Estudos de estabilidade confirmam coeficientes de segurança da barragem adequados. Além disso, a probabilidade de perda de estabilidade global do talude, tendo como causa a erosão interna, é remota.
Erosão externa	Solapamento do pé da barragem	Não detectado. Facilmente identificado nas inspeções visuais rotineiras. Além disso, o canal de descarga do vertedouro fica situado na margem esquerda, distante e sem possibilidade de gerar correntes de retorno em direção ao pé da barragem.
	Deterioração no talude de montante, espaldar	Existem evidências de depressões no enrocamento e deslizamento de blocos de rocha. As inspeções rotineiras permitem o acompanhamento das deteriorações. No talude de montante, no trecho submerso, foi realizada recentemente batimetria, que aparentemente não indicou anomalias.
	Erosão em sulcos no talude de jusante	Não detectado.
	Galgamento / carreamento	Sem evidência. O monitoramento dos reservatórios, além de ser uma obrigação legal, é feito com sistema de telemetria, focando na operação segura da barragem.

Tabela A.4 – Justificativas gerais dos indicadores dos órgãos extravasores e estruturas de adução e descarga de Emborcação

CAUSA	INDICADOR	JUSTIFICATIVA
Todas em órgãos extravasores	Todos em órgãos extravasores	O vertedouro localiza-se na margem esquerda e dissociado das estruturas da barragem de terra-enrocamento. Não há quaisquer evidências de danos às estruturas, percolações ou deteriorações dos materiais estruturais. Todos esses indícios de deteriorações podem ser determinados facilmente por meio de inspeções visuais mensais.
Todas em estruturas de adução e descarga	Todos em estruturas de adução e descarga	A tomada de água é uma estrutura em concreto não embutida no corpo da barragem. Não há quaisquer evidências de danos às estruturas, percolações ou deteriorações dos materiais estruturais. Todos esses indícios de deteriorações podem ser determinados facilmente por meio das inspeções visuais mensais.

## A.10 FMEA - Sistema barragem de Três Marias

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1 Barragem de terra												
Conter o reservatório	1 (1) Galgamento (falhas hidráulicas)	Erosão externa com formação de brecha	10	VI	Níveis de água excepcionais	1	I	10	Deplecionamento do reservatório e manutenção de borda livre	Prevenção	1	10
									Monitoramento dos níveis por sistema de telemetria	Detecção		
	1 (2) Movimento de massa	Instabilidade global com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção	4	120
									Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Propriedades inadequadas dos materiais	1	I	10	Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção	4	40
									Recompactação	Prevenção		
									Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
	1 (3) Erosão interna	Piping com formação de brecha	9	V	Falha de projeto ou construção	3	II	27	Diminuição da carga hidráulica (deplecionamento do reservatório)	Prevenção	2	54
									Lançamento de materiais de filtro e dreno	Prevenção		
Inspeção visual e instrumentação									Detecção			
1.1 Crista												
Permitir acesso à barragem	1.1 (1) Obstrução do acesso	Impossibilidade de execução de inspeções	1	I	Excesso de deformações	1	I	1	Reconstrução e recompactação	Prevenção	1	1
									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 CONTROLE	D	NPR			
1.2 Espaldar de jusante (zona 3)													
Conferir estabilidade mecânica	1.2 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Percolações ou poropressões elevadas	3	II	30	Construção de berma estabilizadora	Prevenção	2	60	
									Cálculo da estabilidade global do talude	Detecção			
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
					Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	10	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	2	20	
		Inspeção visual e instrumentação	Detecção										
		Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I					10	Ampliação de berma			Prevenção
										Inspeção visual e instrumentação			Detecção
		Instabilidade local da barragem	4	III	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	4	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	2	8	
	Inspeção visual e instrumentação								Detecção				
	Percolações ou poropressões elevadas				4	III	16	Construção de berma	Prevenção	2	32		
								Cálculo da estabilidade global do talude	Detecção				
	1.2 (2) Deformação excessiva (movimento de massa)	Fissuração com instabilidade local	4	III	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	4	Selagem de trincas	Prevenção	2	8	
									Recompactação	Prevenção			
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
					Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I	4	Selagem de trincas	Prevenção	2	8	
									Recompactação	Prevenção			
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
		Fissuração com instabilidade global	10	VI	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	10	Selagem de trincas	Prevenção	2	20	
									Recompactação	Prevenção			
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
					Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I	10	Selagem de trincas	Prevenção	2	20	
									Recompactação	Prevenção			
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
		Galgamento com erosão externa	10	VI	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	10	Selagem de trincas	Prevenção	2	20	
Recompactação									Prevenção				
Inspeção visual e instrumentação									Detecção				
Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)					1	I	10	Selagem de trincas	Prevenção	2	20		
	Recompactação							Prevenção					
	Inspeção visual e instrumentação							Detecção					
1.2 (3) Erosão interna	Piping	9	V	Percolações ou poropressões elevadas	3	II	27	Construção de drenos complementares	Prevenção	2	54		
								Inspeção visual e instrumentação	Detecção				
								Propriedades inadequadas dos materiais	1			I	9
				Inspeção visual e instrumentação	Detecção								

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.2.1 Enrocamento de proteção												
Proteger o talude de jusante contra erosão externa	1.2.1 (1) Falha de proteção	Erosão externa com instabilidade local	4	III	Desagregação dos blocos de rocha	1	I	4	Recomposição do enrocamento	Prevenção	1	4
									Inspeção visual	Deteção		
					Crescimento de vegetação	6	III	24	Supressão e limpeza periódica	Prevenção	1	24
									Inspeção visual	Deteção		
					Buraco de animais	2	II	8	Recomposição do enrocamento	Prevenção	1	8
									Inspeção visual	Deteção		
					Lançamento inadequado ou compactação insuficiente	4	III	16	Recomposição do enrocamento	Prevenção	1	16
									Inspeção visual	Deteção		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.3 Espaldar de montante (zona 2)												
Conferir estabilidade mecânica	1.3 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Rebaixamento rápido	1	I	10	Regras operativas adequadas	Prevenção	1	10
									Cálculo da estabilidade global do talude	Detecção		
									Inspeção visual e monitoramento de nível por sistema de telemetria	Detecção		
					Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	10	Deplecionamento do reservatório e ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	2	20
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
									Deplecionamento do reservatório e recomposição/substituição do material	Prevenção		
		Inspeção visual e instrumentação	Detecção									
		Instabilidade local da barragem	4	III	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	4	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	2	8
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
	Percolações ou poropressões elevadas								1	I		
	Cálculo da estabilidade global do talude				Detecção							
	Inspeção visual e instrumentação				Detecção							
	1.3 (2) Deformação excessiva (movimento de massa)				Fissuração com instabilidade local	4	III	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	4	Selagem de trincas
		Recompactação	Prevenção									
		Inspeção visual e instrumentação	Detecção									
		Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I				4	Selagem de trincas	Prevenção	2	8
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
		Fissuração com instabilidade global	10	VI	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	10	Selagem de trincas	Prevenção	2	20
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I	10	Selagem de trincas	Prevenção	2	20
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
Galgamento com erosão externa	10	VI	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	10	Selagem de trincas	Prevenção	2	20		
							Recompactação	Prevenção				
							Inspeção visual e instrumentação	Detecção				
			Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I	10	Selagem de trincas	Prevenção	2	20		
							Recompactação	Prevenção				
							Inspeção visual e instrumentação	Detecção				
1.3 (3)	Erosão externa	Instabilidade local da barragem	4	III	Inadequação construtiva ou de manutenção	2	II	8	Recompactação e manutenção	Prevenção	1	8

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.3.1 Rip-rap												
Proteger o talude de montante contra ação de ondas e erosão externa	1.3.1 (1) Falha de proteção	Erosão externa com instabilidade local	4	III	Desagregação dos blocos de rocha	2	II	8	Recomposição do rip-rap	Prevenção	1	8
									Inspeção visual	Detecção		
					Deslocamento de blocos por ondas ou ciclos de molhagem e secagem	1	I	4	Recomposição do rip-rap	Prevenção	1	4
									Inspeção visual	Detecção		
					Movimentação por colapso	1	I	4	Recomposição do rip-rap	Prevenção	4	16
									Inspeção visual	Detecção		
					Movimentação por fluência	1	I	4	Recomposição do rip-rap	Prevenção	4	16
									Inspeção visual	Detecção		
Lançamento inadequado (embricamento) ou compactação insuficiente	2	II	8	Recomposição do rip-rap	Prevenção	1	8					
				Inspeção visual	Detecção							
Material de transição não adequado	2	II	8	Recomposição do rip-rap	Prevenção	1	8					
				Inspeção visual	Detecção							
1.4 Núcleo argiloso (zona 1)												
Impermeabilizar e reduzir a condutividade hidráulica da barragem (função vedante)	1.4 (1) Percolação excessiva	Piping	9	V	Fraturamento hidráulico	1	I	9	Recompactação	Prevenção	6	54
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Carga hidráulica elevada com aumento da linha freática	1	I	9	Rebaixamento do reservatório	Prevenção	4	36
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
1.5 Sistema de drenagem superficial												
Coletar e conduzir a água superficial sobre o talude	1.5 (1) Incapacidade de coletar e conduzir a água	Erosão externa com instabilidade local	2	II	Quebra de canaletas de concreto	4	III	8	Substituição de zonas danificadas	Prevenção	1	8
									Inspeção visual	Detecção		
					Obstrução por detritos ou materiais da barragem (solo e blocos de rocha)	4	III	8	Limpeza periódica das canaletas	Prevenção	1	8
									Inspeção visual	Detecção		
Coletar e conduzir a água que percola através da barragem	1.5 (2) Incapacidade de coletar e conduzir a água	Erosão externa com instabilidade local	2	II	Quebra de canaletas de concreto	4	III	8	Substituição de zonas danificadas	Prevenção	1	8
									Inspeção visual	Detecção		
					Obstrução por detritos ou materiais da barragem (solo e blocos de rocha)	4	III	8	Limpeza periódica das canaletas	Prevenção	1	8
									Inspeção visual	Detecção		



FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR						
1.6 Sistema de drenagem interna																
Controle da percolação através da barragem	1.6 (1) Incapacidade de coletar e conduzir a água percolada	Piping	9	V	Inadequação de granulometria ou critérios de filtro	1	I	9	Deplecionamento do reservatório		4	36				
									Construção de drenos complementares	Prevenção						
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Deteção						
		Instabilidade global da barragem	10	VI	3	II	30	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	120		
											Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Deteção				
											Recalques diferenciais com trincas internas	3			II	30
Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Deteção															
Espessura ou dimensões insuficientes	2	II	20	20	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	80								
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Deteção						
1.6.1 Filtro vertical																
Coletar e conduzir a água percolada pela zona 1 (maciço argiloso)	1.6.1 (1) Incapacidade de coletar e conduzir a água percolada	Saturação da zona 3 com instabilidade global da barragem	10	VI	Inadequação de granulometria ou critérios de dreno (falha de projeto)	1	I	10	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	40				
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Deteção						
									Colmatação (contaminação) por material argiloso (falha construtiva)	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	120
													Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Deteção		
									Espessura ou dimensões insuficientes (incluindo altura)	2	II	20	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	80
													Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Deteção		
									Recalques diferenciais com trincas internas	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	120
													Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Deteção		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.6.2 Filtro vertical ou inclinado (inferior)												
Coletar e conduzir a água percolada pela zona 1 (maciço argiloso)	1.6.2 (1)	Incapacidade de coletar e conduzir a água percolada	10	VI	Inadequação de granulometria ou critérios de dreno (falha de projeto)	1	I	10	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	40
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Colmatação (contaminação) por material argiloso (falha construtiva)	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	120
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Espessura ou dimensões insuficientes	2	II	20	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	80
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Recalques diferenciais com trincas internas	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	120
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
1.6.3 Tapete horizontal												
Coletar e conduzir a água percolada pelo filtro vertical, filtro inferior e fundação	1.6.3 (1)	Incapacidade de coletar e conduzir a água percolada	10	VI	Inadequação de granulometria ou critérios de dreno (falha de projeto)	1	I	10	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	40
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Colmatação (contaminação) por material argiloso (falha construtiva)	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	120
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Espessura, dimensões ou localização insuficientes	2	II	20	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	80
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Recalques diferenciais com trincas internas	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	4	120
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.6.4 Saída do tapete horizontal												
Conduzir a vazão percolada para jusante da barragem	1.6.4 (1) Incapacidade de conduzir a água percolada	Saturação da zona 3 com instabilidade global da barragem	10	VI	Inadequação de granulometria ou critérios de dreno (falha de projeto)	1	I	10	Reconstrução de dreno	Prevenção	3	30
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Colmatação (contaminação) por material argiloso (falha construtiva)	1	I	10	Reconstrução de dreno/trecho deteriorado	Prevenção	3	30
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Obstrução da saída de drenagem	1	I	10	Reconstrução de dreno	Prevenção	3	30
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
		Saturação da zona 3 com instabilidade local	4	III	Inadequação de granulometria ou critérios de dreno (falha de projeto)	1	I	4	Reconstrução de dreno	Prevenção	3	12
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Colmatação (contaminação) por material argiloso (falha construtiva)	1	I	4	Reconstrução de dreno/trecho deteriorado	Prevenção	3	12
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
					Obstrução da saída de drenagem	1	I	4	Reconstrução de dreno	Prevenção	3	12
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
Piping	9	V	Inadequação de granulometria ou critério de filtro (falha de projeto)	1	I	9	Reconstrução de dreno	Prevenção	3	27		
			Erosão ou falha de proteção	1	I	9	Inspeção visual e instrumentação (medidor de vazões)	Detecção	3	27		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR										
2 Fundação																				
Prover suporte para a barragem de terra	2 (1) Movimento de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	3	II	30	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem) ou barragem (suavização de taludes)	Prevenção	4	120								
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção										
									Singularidades geológicas não detectadas	1	I	10	Sondagens e investigação	Detecção	6	60				
				Instrumentação	Detecção															
	2 (2) Liquefação	Instabilidade global da barragem	10	VI	Sismos	1	I	10		Inspeção visual e instrumentação	Detecção	4	40							
	2 (3) Erosão interna	<i>Piping</i>	Percolação excessiva associada a tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	9	V	Propriedades inadequadas dos materiais (permeabilidade)	3	II	27	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	108							
Obras de drenagem em áreas a jusante										Prevenção										
Inspeção visual da instrumentação										Detecção										
																	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção)	Prevenção	4	108
																Obras de drenagem a jusante (ex: tapetes)	Prevenção			
								Inspeção visual e instrumentação	Detecção											
Controlar a percolação sob a barragem	2 (4) Percolação excessiva	Perda de armazenamento de água	4	III	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	3	II	12	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou tapete impermeável)	Prevenção	4	48								
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção										
	2 (5) Erosão interna	<i>Piping</i>	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	9	V	3	II	27	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	108								
								Obras de drenagem em áreas a jusante	Prevenção											
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção										

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
2.1 Fundação da margem direita												
Prover suporte para a barragem de terra	2.1 (1) Movimento de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Execução ou projeto da trincheira de vedação deficientes	1	I	10	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	40
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Injeções insuficientes	1	I	10	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	40
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
	2.1 (2) Erosão interna	Piping	9	V	Execução ou projeto da trincheira de vedação deficientes	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	36
									Obras de drenagem a jusante (ex: tapetes)	Prevenção		
					Injeções insuficientes	1	I	9	Inspeção visual da instrumentação	Detecção	4	36
									Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção		
Obras de drenagem a jusante (ex: tapetes)	Prevenção	4	36									
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											
Controlar a percolação sob a barragem	2.1 (3) Percolação excessiva	Perda de armazenamento de água	4	III	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	1	I	4	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou tapete impermeável)	Prevenção	4	16
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
	2.1 (4) Erosão interna	Piping	9	V	Execução ou projeto da trincheira de vedação deficientes	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	36
									Inspeção visual da instrumentação	Detecção		
					Injeções insuficientes	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	36
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR									
2.2 Fundação leito do rio																			
Prover suporte para a barragem de terra	2.2 (1)	Movimento de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Injeções insuficientes	1	I	10	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	40						
										Inspeção visual e instrumentação	Deteção								
							Poços de alívio insuficientes ou colmatados	1	I	10	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	40					
											Inspeção visual e instrumentação	Deteção							
	2.2 (2)	Erosão interna	Piping	9	V	Injeções insuficientes	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	36						
										Obras de drenagem a jusante (ex: tapetes)	Prevenção								
										Inspeção visual da instrumentação	Deteção								
						Poços de alívio deficientes	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	36						
										Obras de drenagem a jusante (ex: tapetes)	Prevenção								
										Inspeção visual e instrumentação	Deteção								
Controlar a percolação sob a barragem	2.2 (3)	Percolação excessiva	Perda de armazenamento de água	4	III	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	1	I	4	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou tapete impermeável)	Prevenção	4	16						
										Inspeção visual e instrumentação	Deteção								
	2.2 (4)	Erosão interna	Piping	9	V	Injeções insuficientes	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	36						
										Inspeção visual da instrumentação	Deteção								
										Poços de alívio deficientes	1			I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	36
																Inspeção visual e instrumentação	Deteção		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR			
2.3 Fundação Planície de inundação													
Prover suporte para a barragem de terra	2.3 (1) Movimento de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Execução ou projeto da trincheira de vedação deficientes	1	I	10	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	40	
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção			
						Remoção insuficiente de materiais de baixa resistência	1	I	10	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	40
										Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
	2.3 (2) Liquefação	Instabilidade global da barragem	10	VI	Sismos	1	I	10	Inspeção visual e insrtumentação	Deteção	4	40	
	2.3 (3) Erosão interna	Piping		9	V	Execução ou projeto da trincheira de vedação deficientes	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	36
										Obras de drenagem a jusante (ex: tapetes)	Prevenção		
										Inspeção visual da instrumentação	Deteção		
Propriedades inadequadas dos materiais (permeabilidade)										Prevenção			
Controlar a percolação sob a barragem	2.3 (4) Percolação excessiva	Perda de armazenamento de água	4	III	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	1	I	4	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou tapete impermeável)	Prevenção	4	16	
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção			
	2.3 (5) Erosão interna	Piping		9	V	Execução ou projeto da trincheira de vedação deficientes	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	36
										Inspeção visual da instrumentação	Deteção		
										Propriedades inadequadas dos materiais (permeabilidade)	Prevenção		
										Obras de drenagem a jusante (ex: tapetes)	Prevenção		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
2.4 Fundação Margem esquerda												
Prover suporte para a barragem de terra	2.4 (1) Movimento de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Remoção insuficiente de materiais de baixa resistência	3	II	30	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	120
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Compactação insuficiente das camadas remanescentes	1	I	10	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	40
	Inspeção visual e instrumentação	Detecção										
	2.4 (2) Liquefação	Instabilidade global da barragem	10	VI	Sismos	1	I	10	Inspeção visual e instrumentação	Detecção	4	40
	2.4 (3) Erosão interna	Piping	9	V	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	3	II	27	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	4	108
									Obras de drenagem a jusante (ex: tapetes)	Prevenção		
					Propriedades inadequadas dos materiais (permeabilidade)	3	II	27	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção)	Prevenção	4	108
Obras de drenagem a jusante (ex: tapetes)									Prevenção			
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											
Controlar a percolação sob a barragem	2.4 (4) Percolação excessiva	Perda de armazenamento de água	4	III	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	3	II	12	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou tapete impermeável)	Prevenção	4	48
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
	2.4 (5) Erosão interna	Piping	9	V	Propriedades inadequadas dos materiais (permeabilidade)	3	II	27	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção)	Prevenção	4	108
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											



FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR			
3 Ombreiras													
Conferir estabilidade na interface do aterro	3 (1)	Movimento de massa	Instabilidade local da barragem	4	III	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem	1	I	4	Selagem de trincas	Prevenção	2	8
										Recompactação	Prevenção		
										Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
	3 (2)	Erosão interna	Piping	9	V	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem, criando caminhos preferenciais de percolação	1	I	9	Reforço dos tratamentos no contato (injeção ou drenagem)	Prevenção	2	18
										Obras de drenagem a jusante	Prevenção		
										Inspeção visual da instrumentação	Deteção		
3.1 Ombreira direita													
Conferir estabilidade na interface do aterro	3.1 (1)	Movimento de massa	Instabilidade local da barragem	4	III	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem	1	I	4	Selagem de trincas	Prevenção	2	8
										Recompactação			
										Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
	3.1 (2)	Erosão interna	Piping	9	V	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem, criando caminhos preferenciais de percolação	1	I	9	Reforço dos tratamentos no contato (injeção ou drenagem)	Prevenção	2	18
										Obras de drenagem a jusante	Prevenção		
										Inspeção visual da instrumentação	Deteção		
3.2 Ombreira esquerda													
Conferir estabilidade na interface do aterro	3.2 (1)	Movimento de massa	Instabilidade local da barragem	4	III	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem	1	I	4	Selagem de trincas	Prevenção	2	8
										Recompactação			
										Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
	3.2 (2)	Erosão interna	Piping	9	V	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem, criando caminhos preferenciais de percolação	1	I	9	Reforço dos tratamentos no contato (injeção ou drenagem)	Prevenção	2	18
										Obras de drenagem a jusante	Prevenção		
										Inspeção visual da instrumentação	Deteção		

## A.11 FMEA - Sistema barragem de Emborcação

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR			
1 Barragem de terra-enrocamento													
Conter o reservatório	1 (1)	Galgamento (falhas hidráulicas)	9	V	Níveis de água excepcionais	1	I	9	Deplecionamento do reservatório e manutenção de borda livre	Prevenção	1	9	
									Monitoramento dos níveis por sistema de telemetria	Detecção			
	1 (2)	Movimento de massa	Instabilidade global 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	6	180
										Recompactação	Prevenção		
										Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
	1 (3)	Erosão interna	Piping com formação de brecha	9	V	Falha de projeto ou construção	1	I	9	Diminuição da carga hidráulica (deplecionamento do reservatório)	Prevenção	6	54
										Lançamento de materiais de filtro e dreno	Prevenção		
Inspeção visual e instrumentação										Detecção			
1.1 Crista													
Permitir acesso à barragem	1.1 (1)	Obstrução do acesso	2	II	Excesso de deformações	3	II	6	Reconstrução e recompactação	Prevenção	1	6	
									Inspeção visual	Detecção			
Garantir a borda livre da barragem	1.1 (2)	Deformação excessiva	9	V	Recalques (inadequação de projeto ou construção)	6	III	54	Alteamento da crista	Prevenção	1	54	
									Inspeção visual e monitoramento por campanhas topográficas	Detecção			

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.2 Enrocamento de jusante (zonas 1, 2B e 2A)												
Conferir estabilidade mecânica	1.2 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	10	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	4	40
					Inspeção visual e instrumentação				Detecção			
		Instabilidade local da barragem	4	III	Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I	10	Ampliação de berma	Prevenção	4	40
					Inspeção visual e instrumentação				Detecção			
					Inadequação construtiva (compactação deficiente)	2	II	8	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	4	32
					Inspeção visual e instrumentação				Detecção			
Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	2	II	8	Ampliação de berma	Prevenção	4	32					
				Inspeção visual e instrumentação	Detecção							

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR			
1.2 Enrocamento de jusante (zonas 1, 2B e 2A)													
Conferir estabilidade mecânica	1.2 (2) Deformação excessiva (movimento de massa)	Fissuração com instabilidade global	10	VI	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80	
									Recomposição e recompactação	Prevenção			
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção			
					Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80	
									Recompactação	Prevenção			
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção			
				Forma do vale (recalques diferenciais)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80		
								Recompactação	Prevenção				
								Inspeção visual e instrumentação	Deteção				
				Colapso dos materiais	2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80		
								Inspeção visual	Deteção				
				Fluência dos materiais	2	II	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80		
		Inspeção visual	Deteção										
		Fissuração com instabilidade local	4	III	5	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	5	III	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80
										Recomposição e recompactação	Prevenção		
										Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
						Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	5	III	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80
										Recompactação	Prevenção		
										Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
				Forma do vale (recalques diferenciais)	5	III	20	Selagem de trincas	Prevenção	4	80		
								Recompactação	Prevenção				
								Inspeção visual e instrumentação	Deteção				
				Colapso dos materiais	5	III	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80		
								Inspeção visual	Deteção				
Fluência dos materiais	5			III	20	Recomposição do talude	Prevenção	4	80				
		Inspeção visual	Deteção										
Galgamento	9	V	1	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9		
								Recompactação	Prevenção				
								Inspeção visual e instrumentação	Deteção				
		Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9				
						Recompactação	Prevenção						
						Inspeção visual e instrumentação	Deteção						

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.2.1 Enrocamento de proteção (zona de grandes blocos)												
Proteger o talude de jusante contra erosão externa	1.2.1 (1) Falha de proteção	Erosão externa com instabilidade local	2	II	Desagregação dos blocos de rocha	2	II	4	Recomposição do enrocamento	Prevenção	1	4
									Inspeção visual	Detecção		
					Crescimento de vegetação	1	I	2	Supressão e limpeza periódica	Prevenção	1	2
									Inspeção visual	Detecção		
					Lançamento inadequado ou compactação insuficiente	6	III	12	Recomposição do enrocamento	Prevenção	1	12
									Inspeção visual	Detecção		
					Movimentação por colapso	5	III	10	Recomposição do rip-rap	Prevenção	2	20
									Inspeção visual	Detecção		
Movimentação por fluência	5	III	10	Recomposição do rip-rap	Prevenção	4	40					
				Inspeção visual	Detecção							

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.3 Enrocamento de montante (zonas 1, 2A e 2B)												
Conferir estabilidade mecânica	1.3 (1) Instabilidade associada a movimentos de massa	Instabilidade global da barragem	10	VI	Rebaixamento rápido	1	I	10	Alterção nas regras operativas	Prevenção	1	10
									Cálculo da estabilidade global do talude	Detecção		
									Inspeção visual e monitoramento de nível por sistema de telemetria	Detecção		
					Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	10	Deplecionamento do reservatório e ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	6	60
		Inspeção visual e instrumentação	Detecção									
		Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I	10	Deplecionamento do reservatório e recomposição/substituição do material	Prevenção	6	60			
						Inspeção visual e instrumentação	Detecção					
		Instabilidade local da barragem	4	III		Inadequação construtiva (compactação deficiente)	2	II	8	Ajustes de construção (recompactação)	Prevenção	6
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											
				Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	2	II	8	Inspeção visual e instrumentação	Detecção	6	48	

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.3 Enrocamento de montante (zonas 1, 2A e 2B)												
Conferir estabilidade mecânica	1.3 (2) Deformação excessiva (movimento de massa)	Fissuração com instabilidade global	10	VI	Colapso dos materiais (quebra ou rearranjo de blocos)	3	II	30	Recomposição do enrocamento	Prevenção	6	180
									Alterações nas regras operativas	Prevenção		
									Inspeção visual	Deteção		
					Fluência dos materiais	2	II	20	Recomposição do enrocamento	Prevenção	6	120
									Inspeção visual	Deteção		
					Inadequação construtiva (compactação deficiente)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	6	120
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
					Forma do vale (recalques diferenciais)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	6	120
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
					Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	2	II	20	Selagem de trincas	Prevenção	6	120
		Recompactação	Prevenção									
		Inspeção visual e instrumentação	Deteção									
		Fissuração com instabilidade local	4	III	Colapso dos materiais (quebra ou rearranjo de blocos)	6	III	24	Recomposição do enrocamento	Prevenção	6	144
									Alterações nas regras operativas	Prevenção		
									Inspeção visual	Deteção		
					Fluência dos materiais	5	III	20	Recomposição do enrocamento	Prevenção	6	120
									Inspeção visual	Deteção		
					Inadequação construtiva (compactação deficiente)	5	III	20	Selagem de trincas	Prevenção	6	120
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
					Forma do vale (recalques diferenciais)	5	III	20	Selagem de trincas	Prevenção	6	120
									Recompactação	Prevenção		
Inspeção visual e instrumentação	Deteção											
Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	5				III	20	Selagem de trincas	Prevenção	6	120		
		Recompactação	Prevenção									
		Inspeção visual e instrumentação	Deteção									
Galgamento	9	V	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	1	I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9		
							Recompactação	Prevenção				
							Inspeção visual e instrumentação	Deteção				
			Inadequação de projeto (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I	9	Selagem de trincas	Prevenção	1	9		
				Recompactação	Prevenção							
				Inspeção visual e instrumentação	Deteção							

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1.3.1 Rip-rap												
Proteger o talude de montante contra ação de ondas e erosão externa	1.3.1 (1) Falha de proteção	Erosão externa com instabilidade local	2	II	Desagregação dos blocos de rocha	2	II	4	Recomposição do rip-rap	Prevenção	1	4
									Inspeção visual	Detecção		
					Deslocamento de blocos por ondas ou ciclos de molhagem e secagem	5	III	10	Recomposição do rip-rap	Prevenção	1	10
									Alterações nas regras operativas	Prevenção		
					Movimentação por colapso	6	III	12	Recomposição do rip-rap	Prevenção	4	48
									Alterações nas regras operativas	Prevenção		
					Movimentação por fluência	5	III	10	Recomposição do rip-rap	Prevenção	4	40
									Inspeção visual	Detecção		
					Lançamento inadequado (embricamento) ou compactação insuficiente	6	III	12	Recomposição do rip-rap	Prevenção	1	12
									Inspeção visual	Detecção		
					Material de transição não adequado	1	I	2	Recomposição do rip-rap	Prevenção	1	2
									Inspeção visual	Detecção		
1.4 Núcleo argiloso												
Impermeabilizar e reduzir a condutividade hidráulica da barragem (função vedante)	1.4 (1) Percolação excessiva	Piping	9	V	Fraturamento hidráulico	1	I	9	Recompactação	Prevenção	6	54
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
					Carga hidráulica elevada com aumento da linha freática	1	I	9	Rebaixamento do reservatório	Prevenção	2	18
									Cálculo da estabilidade global da barragem	Detecção		
Inspeção visual e instrumentação	Detecção											



FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR			
1.5 Random impermeável													
Impermeabilizar e aumentar caminho de percolação (função vedante)	1.5 (1) Percolação excessiva	Piping	9	V	Fraturamento hidráulico	1	I	9	Deplecionamento do reservatório	Prevenção	6	54	
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
					Subpressão elevada	1	I	9	Deplecionamento do reservatório	Prevenção	6	54	
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção			
Prover suporte para o espaldar de jusante	1.5 (2) Deformação excessiva (movimento de massa)	Instabilidade do espaldar de jusante	10	VI	Inadequação construtiva (compactação deficiente)	2	II	20	Inspeção visual e reinstrumentação	Detecção	6	120	
					Inadequação de projeto (propriedades dos materiais)	2	II	20	Inspeção visual e reinstrumentação	Detecção	6	120	
1.6 Transições													
Transicionar materiais de granulometria muito distinta	1.6 (1) Incapacidade de funcionar como transição	Piping	9	V	Granulometria inadequada	1	I	9	Deplecionamento do reservatório	Prevenção	5	45	
									Instrumentação	Detecção			
					Recalques da transição	1	I	9	Instrumentação	Detecção	6	54	
1.7 Sistema de drenagem interna (dreno)													
Controle da percolação através da barragem	1.7 (1) Incapacidade de coletar e conduzir a água percolada	Piping	9	V	Recalques diferenciais (propriedades inadequadas dos materiais)	1	I	9	Deplecionamento do reservatório	Prevenção	6	54	
									Construção de drenos complementares	Prevenção			
									Inspeção visual e monitoramento da instrumentação (recalques e piezometria)	Detecção			
					Inadequação de granulometria ou critérios de filtro	1	I	9	Deplecionamento do reservatório		6	54	
									Construção de drenos complementares	Prevenção			
									Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção			
		Instabilidade global da barragem	10	VI	10	Colmatação (contaminação) por material argiloso (falha construtiva)	1	I	10	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	6	60
										Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
						Inadequação de granulometria ou critérios de dreno (falha de projeto)	1	I	10	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	6	60
										Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		
						Espessura ou dimensões insuficientes (incluindo altura)	1	I	10	Construção de bermas estabilizadoras e drenos complementares	Prevenção	6	60
										Inspeção visual e instrumentação (piezometria)	Detecção		

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR			
2 Fundação													
Prover suporte para a barragem de terra	2 (1)	Movimento de massa	Instabilidade global	10	VI	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	1	I	10	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem) ou barragem (suavização de taludes)	Prevenção	6	60
										Inspeção visual e instrumentação	Detecção		
	2 (2)	Erosão interna	Piping	9	V	Percolação excessiva associada a tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	6	54
										Obras de drenagem em áreas a jusante	Prevenção		
										Inspeção visual da instrumentação	Detecção		
	Controlar a percolação sob a barragem	2 (3)	Percolação excessiva	Perda de armazenamento de água	4	III	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	1	I	4	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou tapete impermeável)	Prevenção	6
Inspeção visual e instrumentação											Detecção		
2 (4)		Erosão interna	Piping	9	V	Tratamento de fundação deficiente ou inadequado (falha de projeto ou construção)	1	I	9	Reforço dos tratamentos de fundação (injeção ou drenagem)	Prevenção	6	54
										Obras de drenagem em áreas a jusante	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Detecção			

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
3 Ombreiras												
Conferir estabilidade na interface do aterro	3 (1) Movimento de massa	Instabilidade local da barragem	4	III	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem	1	I	4	Selagem de trincas	Prevenção	2	8
									Recompactação	Prevenção		
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
	3 (2) Erosão interna	Piping	9	V	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem, criando caminhos preferenciais de percolação	1	I	9	Reforço dos tratamentos no contato (injeção ou drenagem)	Prevenção	2	18
Obras de drenagem a jusante									Prevenção			
Inspeção visual da instrumentação									Deteção			
3.1 Ombreira direita												
Conferir estabilidade na interface do aterro	3.1 (1) Movimento de massa	Instabilidade local da barragem	4	III	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem	1	I	4	Selagem de trincas	Prevenção	2	8
									Recompactação			
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
	3.1 (2) Erosão interna	Piping	9	V	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem, criando caminhos preferenciais de percolação	1	I	9	Reforço dos tratamentos no contato (injeção ou drenagem)	Prevenção	2	18
Obras de drenagem a jusante									Prevenção			
Inspeção visual da instrumentação									Deteção			
3.2 Ombreira esquerda												
Conferir estabilidade na interface do aterro	3.2 (1) Movimento de massa	Instabilidade local da barragem	4	III	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem	1	I	4	Selagem de trincas	Prevenção	2	8
									Recompactação			
									Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
	3.2 (2) Erosão interna	Piping	9	V	Falhas de projeto ou construção no contato com a barragem, criando caminhos preferenciais de percolação	1	I	9	Reforço dos tratamentos no contato (injeção ou drenagem)	Prevenção	2	18
Obras de drenagem a jusante									Prevenção			
Inspeção visual da instrumentação									Deteção			

