

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS
HÍDRICOS E AMBIENTAL**

GISELLE DE ANDRADE COLLE

**METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO PARA CLASSIFICAÇÃO DE
BARRAGENS SEGUNDO A SEGURANÇA**

**CURITIBA
2008**

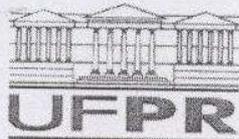
GISELLE DE ANDRADE COLLE

**METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO PARA CLASSIFICAÇÃO DE
BARRAGENS SEGUNDO A SEGURANÇA**

**Dissertação apresentada como requisito
parcial à obtenção do grau de Mestre,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Recursos Hídricos e
Ambiental, Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná.**

**Orientador: Prof. José Junji Ota
Co-Orientador: Prof. André L. T.
Fabiani**

**CURITIBA
2008**



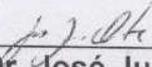
TERMO DE APROVAÇÃO

GISELLE DE ANDRADE COLLE

“METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO PARA CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS SEGUNDO A SEGURANÇA”

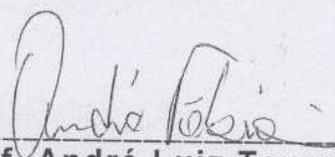
Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:

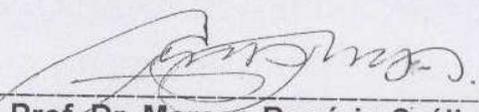


Prof. Dr. José Junji Ota
Universidade Federal do Paraná
Orientador

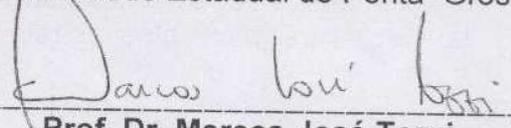
MEMBROS:



Prof. André Luiz Tonso Fabiani
Co-orientador

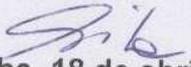


Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Prof. Dr. Marcos José Tozzi
Universidade Positivo - UNICENP




Curitiba, 18 de abril de 2008

Prof^ª Maria Cristina Borba Braga
Coord. Pós-graduação em
Eng^ª Rec. Hidr. e Ambiental
Matr. UFPR 109711

C697m Colle, Giselle de Andrade
Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança [manuscrito] / Giselle de Andrade Colle. – 2008.
104f. ; 30 cm.

Impresso.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2008.
“Orientador: Prof. Dr. José Junji Ota”.

Inclui bibliografias

1. Barragens e açudes - Segurança. 2. Barragens de concreto. 3. Barragens e açudes - Inspeção. I. Universidade Federal do Paraná. II. Ota, José Junji, 1951-. III. Título.

CDD: 627.8

CDU: 627.8

Bibliotecário: Arthur Leitis Junior - CRB 9/1548

**A Deus Criador
porque tudo que sou e tenho,
sou e tenho Nele.**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Professor Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes pelo seu incentivo e apoio à minha entrada no Programa de Pós-Graduação ainda nos tempos de graduação.

Ao meu orientador, Professor José Junji Ota, por sua atenção, paciência e compreensão, indispensáveis à realização e à conclusão desta pesquisa.

Ao Professor André Fabiani, co-orientador, que sempre acompanhou o desenvolvimento da pesquisa.

Pelo companheirismo, aos colegas Raquel Pompeo, César Yoshizawa e Rafael Cabral.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/CT-Hidro - Brasil, pela bolsa de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE APÊNDICES	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 TERMINOLOGIA	4
3.2 RUPTURA DE BARRAGENS	10
3.3 CAUSAS DE RUPTURA DE BARRAGENS.....	11
3.4 RISCO	13
3.4.1 Probabilidade de Carga.....	15
3.4.2 Probabilidade de Reação.....	16
3.4.3 Conseqüência	18
3.5 ANÁLISE DE RISCO	21
3.5.1 Classificação da Análise de Risco.....	23
3.5.2 Métodos, Metodologias e Ferramentas de Análise do Risco.....	31
3.5.2.1 Árvores de eventos.....	77
3.6 PANORAMA INTERNACIONAL	79
3.6.1 Estados Unidos	79
3.6.1.1 Métodos de análise de risco.....	79
3.6.2 Canadá.....	81
3.6.3 Noruega.....	82
3.6.4 Reino Unido	82
3.6.5 França.....	83

3.6.6 Países Baixos.....	83
3.6.7 Suécia.....	83
3.6.8 Austrália.....	84
3.6.9 Portugal.....	84
4 PLANILHAS ELETRÔNICAS DE CÁLCULO DOS INDICADORES DE RISCO	85
5 CONCLUSÕES.....	97
5.1 RECOMENDAÇÕES.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
APÊNDICES	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DEFINIÇÕES PARA TERMOS DE GERENCIAMENTO DO RISCO..	4
FIGURA 2 – DIAGRAMA COM AS ETAPAS FUNDAMENTAIS DA GESTÃO DE RISCO	5
FIGURA 3 – DIAGRAMA f-N	29
FIGURA 4 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DE APLICAÇÃO DE UMA ÁRVORE DE EVENTOS.....	37
FIGURA 5 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DE APLICAÇÃO DE UMA ÁRVORE DE FALHAS	38
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MÉTODO NÓ BORBOLETA	40
FIGURA 7 – PROCEDIMENTO PARA UMA RÁPIDA ESTIMATIVA DO NÍVEL DO ESCOAMENTO DEVIDO À FALHA DA BARRAGEM	52
FIGURA 8 – HIDROGRAMA TRIANGULAR	53
FIGURA 9 – EXEMPLO DE PARTE DE UM DIAGRAMA LCI.....	57
FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DAS BARRAGENS	73

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – DESCRIÇÕES VERBAIS (<i>VERBAL DESCRIPTORS</i>)	17
QUADRO 2 – EXEMPLO DE CÁLCULO DO RISCO	21
QUADRO 3 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CONSEQÜÊNCIA DE RUPTURA DE BARRAGENS.....	32
QUADRO 4 – CLASSIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE RISCO DE BARRAGENS (CBGB)	32
QUADRO 5 - EXEMPLO ILUSTRATIVO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO HAZOP	35
QUADRO 6 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO FMEA	36
QUADRO 7 – SÍMBOLOS LÓGICOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DE ÁRVORES DE FALHAS	39
QUADRO 8 – PONTUAÇÃO RBPS.....	43
QUADRO 9 – PONTUAÇÃO DE NÍVEL DE PERIGO	49
QUADRO 10 – PONTUAÇÃO DE MAGNITUDE.....	49
QUADRO 11 – IMPACTOS PARA PROPRIEDADES NÃO RESIDENCIAIS.....	55
QUADRO 12 – EXEMPLO DE FICHA DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO	56
QUADRO 13 – EXEMPLO DE FICHA RESUMO DO RISCO	59
QUADRO 14 – PERICULOSIDADE P.....	61
QUADRO 15 – VULNERABILIDADE V	62
QUADRO 16 – IMPORTÂNCIA ESTRATÉGICA I	63
QUADRO 17 – POTENCIAL DE RISCO PR	63
QUADRO 18 – CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A PERICULOSIDADE POTENCIAL PP	64
QUADRO 19 – CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS SEGUNDO SUA ALTURA E/OU VOLUME DO RESERVATÓRIO.....	65
QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O ESTADO REAL DA BARRAGEM ER	68

QUADRO 21 – ÍNDICES DE P_B E P_F	74
QUADRO 22 – ADEQUAÇÃO DO ITEM AO CRITÉRIO DE PROJETO ATUAL A_n	75
QUADRO 23 – PESO DO ITEM A SER AVALIADO PV_{P_n}	75
QUADRO 24 – ÍNDICE DE GRAVIDADE D_G E DE URGÊNCIA D_U	76
QUADRO 25 – ÍNDICES PARA O CÁLCULO DA CONSEQÜÊNCIA C	77

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1 – APRESENTAÇÃO RESUMO DA ANÁLISE DE RISCO E DAS METODOLOGIAS

APÊNDICE 2 – LISTAGEM DAS FÓRMULAS DAS PLANILHAS ELETRÔNICAS DE CÁLCULO DOS INDICADORES DE RISCO

APÊNDICE 3 – CD CONTENDO ARQUIVO DAS PLANILHAS ELETRÔNICAS DE CÁLCULO DOS INDICADORES DE RISCO

RESUMO

Tendo em vista o grande número de rupturas de barragens dos mais diversos tipos e dimensões que ocorrem anualmente em nosso país e o trâmite para aprovação dos Projetos de Lei N° 1.181, de 2.003, e N° 436, de 2.007, que objetivam estabelecer, respectivamente, a regulamentação da segurança de barragens e a contratação de seguro contra o rompimento dessas estruturas, o conteúdo desta dissertação apresenta uma compilação dos aspectos mais atuais da análise de risco aplicada à segurança de barragens. Inseridos neste contexto, foram encontrados na literatura técnica métodos, metodologias e ferramentas capazes de mensurar o valor do risco por meio de indicadores. No estudo, destacaram-se três metodologias de análise de risco qualitativa que foram transformadas em planilhas eletrônicas de cálculo visando sua aplicação por aqueles que necessitam calcular o risco oferecido pelas barragens de seus *portfolios* e que dispõem dos dados para aplicação.

Palavras-chave: barragens, segurança de barragens, análise de risco, ruptura de barragens.

ABSTRACT

In view of the great number of failures of dams of the most several types and dimensions that annually occur in our country and the course for approval of the Law Projects N° 1,181, of 2003, and N° 4,038, of 2004, that aim, respectively, to establish the dam safety regulation and to oblige the contractation of insurance against the breach of these structures, the content of this dissertation presents a compilation of the most current aspects of the risk analysis applied to dam safety. Inserted in this context, had been found in bibliography methods, methodologies and tools capable of to measure the value of the risk by means of indicators. In the study, had been destached three methodologies of qualitative risk analysis that had been transformed into spread sheets aiming at its application for those that need to calculate the risk posed by dams in the its portfolios and that possess of the data for application.

Key-words: dams, dam safety, risk analysis, dambreak.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de levantar metodologias baseadas em análise de risco capazes de classificar um conjunto de barragens segundo o risco que oferecem ao ambiente em que estão instaladas.

São muitos os casos de rompimento de barragens que vêm causando grandes prejuízos, tanto individuais como à sociedade, desde as estruturas mais simples, utilizadas por pequenos proprietários de terra, até barragens de rejeitos, como a de uma mineradora que rompeu no Rio Fubá, um dos subafluentes do Rio Paraíba do Sul, em Minas Gerais (janeiro de 2007).

As causas dos rompimentos são das mais diversas, independente do porte da barragem, portanto foram levantadas na literatura metodologias que levassem em consideração comportamentos previsíveis que são capazes de levar tais estruturas à ruptura.

Foi realizada uma pesquisa intensiva em *sites* oficiais sobre barragens com o intuito de se encontrar material técnico mais recente sobre o assunto. Também foram consultados livros e artigos técnicos que disponibilizaram materiais menos recentes, mas que servem de base para todo e qualquer estudo desenvolvido atualmente sobre o assunto.

Em toda a pesquisa bibliográfica foram encontradas três metodologias brasileiras, que fazem parte do escopo principal desta dissertação.

Durante o estudo, percebeu-se, na realidade brasileira, que as barragens que geram um lucro mínimo razoável, pela venda de energia, encontram-se nas mãos de empresas privadas (ou de economia mista) que possuem suas metodologias particulares de análise de risco, enquanto que as estruturas que não conseguem se auto-sustentar financeiramente, geralmente, encontram-se nas mãos do poder público, ou, em muitos casos, simplesmente não possuem um dono, estão abandonadas.

Também, não se pode esquecer das estruturas que possuem como proprietários pessoas físicas, como alguns pequenos e médios proprietários rurais, que na maioria das vezes não fazem nenhum tipo de controle ou melhoria para prevenir acidentes ou diminuir os riscos provenientes de suas barragens, apenas amontoam terra cada vez que a estrutura é arrastada pelas águas.

O poder público, por intermédio do Ministério da Integração, em vista da situação em que se encontravam as barragens sob sua responsabilidade, tem realizado esforços no sentido de gerenciar tais estruturas ao desenvolver o Cadastro Nacional de Barragens, além do Manual publicado pelo próprio Ministério que apresenta uma das metodologias que fazem parte do escopo principal desta dissertação.

Espera-se que a realidade do nosso país, quanto a regulamentação de tais estruturas, venha a ser alterada tendo em vista dois projetos de lei que estão em trâmite para aprovação.

Um é o Projeto de Lei Nº 1.181, de 2003 (BRASIL, 2003), de autoria de Leonardo Monteiro, que estabelece em seu artigo 1º a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Tal Projeto de Lei tem por objetivo principal regulamentar procedimentos de segurança.

O outro é o Projeto de Lei Nº 436, de 2.007 (BRASIL, 2007), de autoria de Elcione Barbalho, que em seu artigo 1º torna obrigatória a contratação de seguro contra o rompimento de barragens visando cobrir danos físicos, inclusive morte, e prejuízos materiais às pessoas físicas e jurídicas domiciliadas nas respectivas jusantes.

Ambos projetos de lei aplicam-se tanto às barragens de cursos de água quanto às barragens de contenção de rejeitos.

Acredita-se que com a aprovação de tais projetos de lei será dispensada maior ênfase e será dada maior importância ao estudo de metodologias de análise de risco para segurar as barragens.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral alcançado nesta dissertação foi a realização de um levantamento extenso e aprofundado do atual estado da arte dos assuntos relacionados à análise de risco apresentados da forma mais sintética possível, porém sem perder o embasamento técnico, no capítulo da Revisão Bibliográfica.

Desta forma, os interessados pela análise de risco aplicada à segurança de barragens têm um ponto de partida para a realização de futuros estudos; acredita-se ser esta a principal contribuição do presente trabalho.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

A partir dos estudos levantados na Revisão Bibliográfica, criar planilhas eletrônicas de cálculo, baseadas em metodologias existentes, para serem utilizadas por pessoas com interesse em calcular o risco oferecido pelas barragens.

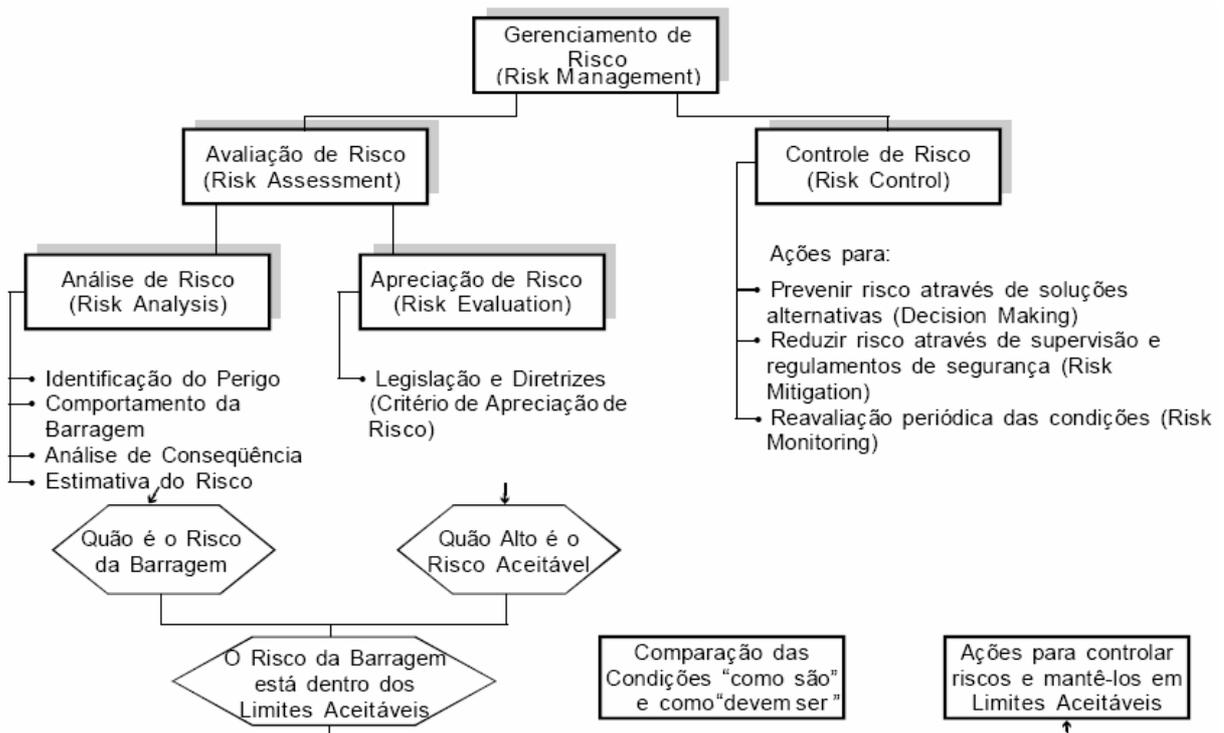
Almejou-se não somente criar as planilhas eletrônicas de cálculo, mas antes apresentar as características específicas de cada uma das metodologias existentes estudadas, explanando suas características peculiares e mostrando ao leitor os fatores que são considerados em cada uma delas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TERMINOLOGIA

MENESCAL, VIEIRA E OLIVEIRA (2001) propõem interpretações bem definidas de termos e expressões relacionados com a segurança de barragens, e apresentam um esquema de como funciona o gerenciamento do risco, conforme representado na figura 1, esta adaptada na tradução do termo *Risk Evaluation* que pelos autores é interpretada por Aceitação de Risco, e que no presente trabalho será considerado como Apreciação de Risco:

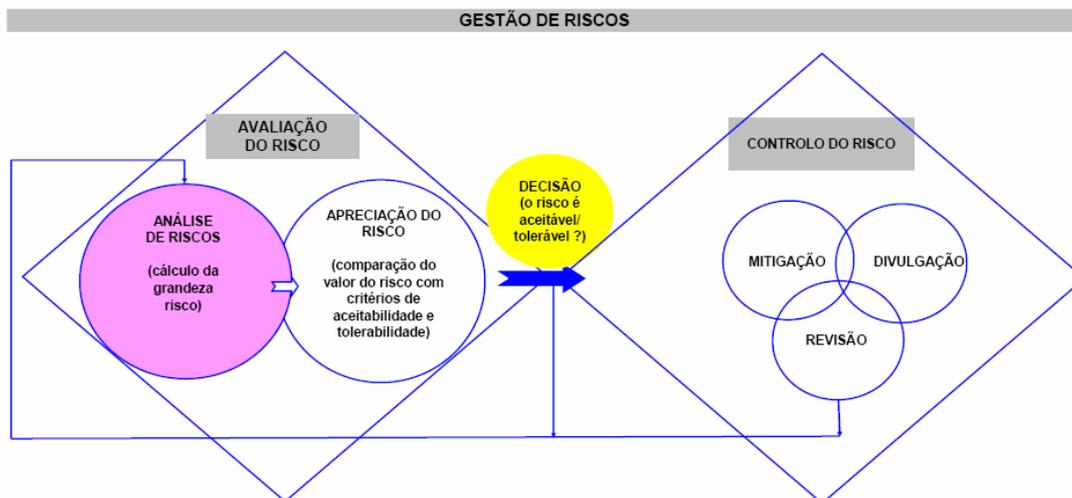
FIGURA 1 - DEFINIÇÕES PARA TERMOS DE GERENCIAMENTO DO RISCO



FONTE – adaptado de MENESCAL, VIEIRA E OLIVEIRA (2001)

Para CNPGB (2005), constituem as etapas fundamentais da gestão de risco (figura 2):

FIGURA 2 – DIAGRAMA COM AS ETAPAS FUNDAMENTAIS DA GESTÃO DE RISCO



FONTE: CNPGB (2005)

A seguir, apresenta-se a terminologia considerada essencial ao entendimento desta dissertação:

Risco (*Risk*): é a medida da probabilidade e severidade de um efeito adverso para saúde, propriedade ou meio-ambiente (CSA¹, apud HARTFORD, 1999, p.8).

Gerenciamento do Risco (*Risk Management*): é o processo completo de avaliação do risco (*risk assessment*) (incluindo análise do risco (*risk analysis*) e apreciação do risco (*risk evaluation*)) e controle do risco (*risk control*) (CSA¹, apud HARTFORD, 1999, p. 10). Para CNPGB (2005), é a aplicação sistemática de políticas, procedimentos e práticas de gestão às tarefas de identificação, análise, apreciação, avaliação, mitigação e controle do risco.

Avaliação do Risco (*Risk Assessment*): processo de tomada de decisão (*decision-making process*) que utiliza os resultados da análise de risco para definir quais ações são necessárias, logo um critério limitando quais níveis de risco são

¹ CSA - Canadian Standards Association. **Risk Analysis Requirements and Guidelines**. CAN/CSA-Q634-M91, 1991.

aceitáveis deve ser considerado; para eventos que resultam em perda de vidas, a referência é feita por normas de risco social e individual (*individual and societal risk guidelines*). Para o Bureau of Reclamation é o processo de tomada de decisão com base na análise de risco (MCGRATH, 2000).

Análise de Risco (*Risk Analysis*): é utilizada para avaliar informações para estimar o risco dos perigos sobre indivíduos ou populações, propriedades ou meio-ambiente (CSA¹, apud HARTFORD, 1999, p. 8). Para o Bureau of Reclamation é o processo de cálculo do risco (MCGRATH, 2000).

Estimativa do Risco (*Risk Estimation*): é a parte do processo da análise de risco usada para produzir uma medida do nível do risco à saúde (vida humana), propriedade, ou meio-ambiente sendo analisados (CSA¹, apud HARTFORD, 1999, p. 9).

Apreciação do Risco (*Risk Evaluation*): é o processo de examinar e julgar a significância do risco (CSA¹, apud HARTFORD, 1999, p. 9). Segundo CNPGB (2005), é o processo de ponderação e julgamento do significado do risco.

Critério de Risco (*Risk Criteria*): os riscos calculados pela análise de risco (qualitativa ou quantitativa) são comparados com critérios (por exemplo, riscos aceitos ou determinados pela população (*acceptable public safety criteria*), ou simplesmente níveis aceitáveis de segurança (*acceptable levels of dam safety*)) no processo de avaliação do risco, para determinar se estes riscos calculados são ou não aceitáveis dentro dos critérios pré-definidos (MCGRATH, 2000).

Critério de Risco Aceitável (*Acceptable Risk Criteria*): é o critério de risco baseado em perda de vidas aceitável (MCGRATH, 2000). MORRIS, SAMUELS e

¹ CSA - Canadian Standards Association. **Risk Analysis Requirements and Guidelines**. CAN/CSA-Q634-M91, 1991.

ELLIOTT (1999) definem como o risco ou perigo de morte acidental esperada pelo público devido a qualquer causa.

Controle do Risco (*Risk Control*): é a implantação e o reforço de ações para controlar o risco, com a reavaliação periódica da efetividade dessas ações. (CSA¹, apud HARTFORD, 1999, p. 9).

Mitigação do Risco (*Risk Mitigation*): aplicação seletiva de técnicas e de princípios de gestão apropriados para reduzir a probabilidade de uma ocorrência ou das suas conseqüências adversas ou ambas (CNPGB, 2005).

Risco Residual (*Residual Risk*): risco que resta após a aplicação de metodologias (MCGRATH, 2000). Para CNPGB (2005) é o nível de risco remanescente em qualquer instante antes, durante e após ter sido implementado um programa de medidas de mitigação de risco.

Risco Individual (*Individual Risk*): é o risco para qualquer indivíduo identificável que mora dentro da zona impactada pela falha ou que segue um particular padrão de vida que pode ser alterado pelas conseqüências da falha (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE², apud HARTFORD, 1999, p. 10). Segundo CNPGB (2005), é um risco adicional imposto ao indivíduo pela existência, no caso, da barragem.

Risco Social (*Societal Risk*): é o risco para a sociedade como um todo, podendo a falha causar morte, danos, perdas financeiras e ambientais, entre outras. O risco social pode ser definido para cada categoria de perda (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE², apud HARTFORD, 1999, p. 10). De acordo com CNPGB (2005), é o

¹ CSA - Canadian Standards Association. **Risk Analysis Requirements and Guidelines**. CAN/CSA-Q634-M91, 1991.

² HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. **The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations**. HMSO, 1992.

risco que, quando materializado, assume conseqüências de grande escala ou abrangência que implicam uma resposta do meio social e político, através de discussão pública e de mecanismos de regulação. Para MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT (1999) é o risco de acidentes onde a exposição é involuntária e um pequeno incidente pode resultar em várias fatalidades.

Risco Tolerável (*Tolerable Risk*): é um risco que é tomado como sendo capaz de assegurar benefícios líquidos positivos na confiança de que ele está sendo devidamente controlado, revisado continuamente e tendo sua redução promovida como e quando possível e/ou apropriado (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE¹, apud HARTFORD, 1999, p. 10). Para CNPGB (2005), é o risco que, apesar de ser inferior ao limite de tolerabilidade dentro de uma gama com a qual a sociedade pode aceitar de forma a assegurar determinados benefícios, ainda é suscetível de redução, pois não deve ser negligenciado ou ignorado. Difere do risco aceitável, pois este não requer medidas para sua redução.

Risco Aceitável (*Acceptable Risk*): é o risco que, para os propósitos de vida ou trabalho, cada um que pode ser impactado está preparado para aceitar, sem considerar a hipótese de alterações nos mecanismos de controle do risco (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE¹, apud HARTFORD, 1999, p. 10). Para CNPGB (2005), é o risco que pode ser aceito pelos indivíduos ou pela sociedade eventualmente afetados, admitindo que não há alterações nos mecanismos de controle de risco. Este risco é considerado insignificante e adequadamente controlado, não sendo requeridas medidas para sua redução.

¹ HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. **The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations.** HMSO, 1992.

População em Risco (*Population At Risk – PAR*): todos os indivíduos que, caso não sejam evacuados, serão atingidos pela onda de inundação provocada por uma ruptura de barragem (CNPGB, 2005).

Portfolio de barragens: inventário de barragens, grupo de barragens, conjunto de barragens.

Percolação: comportamento do fluxo de água pelo corpo da barragem e pelas ombreiras e fundações (KUPERMAN et al., 2001).

Falha: incapacidade de um componente executar a função para a qual foi planejado (HARTFORD, 1999).

Modo de Falha (*Failure Mode*): a maneira como uma falha pode ocorrer (HARTFORD, 1999). Modo de falha potencial é definido por CYGANIEWICZ e SMART (2000) como uma inadequação ou defeito existente, originado de uma condição construtiva natural, do projeto da barragem ou de suas estruturas, da construção, dos materiais constituintes, da operação e da manutenção ou de processos de envelhecimento, que pode levar a uma incontrolável liberação do reservatório.

Perigo (*Hazard*): é uma condição externa que pode causar impactos indesejáveis ao sistema da barragem, como, por exemplo, enchentes e terremotos (HARTFORD, 1999).

Probabilidade: é a medida do grau de confiança de uma previsão relativa a ocorrência de um evento futuro incerto (HARTFORD¹, apud HARTFORD, 1999, p. 8).

¹ HARTFORD, D.N.D. This Dam Risk Business – the challenge of implementation. **ANCOLD'98**. ANCOLD, 1998.

Incertezas: em prever o desempenho futuro da barragem, das condições de carregamento, das reações aos carregamentos e nas estimativas das conseqüências de falha, pela imperfeição do conhecimento e pelas informações incompletas (USB, 2003a). Segundo USB (2003b), a incerteza pode ser reduzida pelo desempenho de ações adicionais como uma maior coleta de dados, pelo desempenho de mais análises, ou pelo desempenho de uma mais detalhada análise de risco. Também deve ficar clara a diferença entre redução do risco e redução das incertezas na estimativa do risco.

Conseqüência: refere-se ao impacto total ocorrido como resultado de um perigo concretizado (HARTFORD, 1999).

3.2 RUPTURA DE BARRAGENS

Ruptura da barragem é uma liberação não controlada do conteúdo do reservatório ocasionada pelo colapso da barragem ou por parte dela (CBDB – NRSP¹, apud MENESCAL; VIEIRA; OLIVEIRA, 2001, p.52).

RAMOS e MELO (1994) entendem por ruptura de barragem qualquer ocorrência associada ao comportamento da barragem, dos órgãos de segurança e de exploração (obras de desvio durante a construção, descarregador de cheias, descarga de fundo), que possa originar uma onda de inundação. Como exemplos dessas ocorrências, citam: a abertura intempestiva de uma comporta e aflúências excepcionais que excedam a capacidade de vazão dos órgãos de descarga.

Para CNPGB (2005) a ruptura, de uma forma geral, é a perda de capacidade de uma barragem, ou de parte dela, de funcionar como previsto.

¹ CBDB – NRSP. **Guia Básico de Segurança de Barragens**. São Paulo, SP, 1999.

3.3 CAUSAS DE RUPTURA DE BARRAGENS

RAMOS e MELO (1994) apresentam estudo que analisa a segurança de barragens quanto a aspectos de natureza hidráulica e operacional.

É citada a publicação *Deterioration of Dams and Reservoirs*, compilação mais completa existente sobre deteriorações e rupturas de barragens (ICOLD¹, apud RAMOS e MELO, 1994, p. 5). Baseados na publicação, os autores concluem que as causas predominantes de ruptura envolvendo órgãos de segurança e exploração de barragens (obras de desvio durante a construção, descarregadores de cheias e descargas de fundo) são:

- a) a insuficiente capacidade de vazão ou o mau funcionamento dos órgãos de descarga de cheias (incluindo a deficiente avaliação da vazão de dimensionamento, a incorreta utilização dos critérios de dimensionamento hidráulico e o não funcionamento das comportas), representando cerca de 42% do número total de rupturas de barragens;
- b) as relacionadas com as fundações (percolação, erosão interna), com as erosões localizadas e com o deficiente comportamento estrutural, representando cerca de 23% das rupturas.

Dos acidentes graves ocorridos entre 1964 e 1983, verificou-se que cerca de metade das rupturas de barragens com mais de 15 metros de altura foram provocadas por razões de natureza hidráulica (submersão ou erosão próxima do descarregador de cheias), enquanto que a outra metade resultou de erosões internas e deslizamentos. Também, é relatado pelos autores que para as rupturas de barragens de aterro com altura inferior a 15 metros a proporção é alterada para 77% e 23%, respectivamente; logo, os fatores de natureza hidráulica são responsáveis pela maioria dos acidentes em

¹ ICOLD. *Deterioration of Dams and Reservoirs*. dec. 1983.

pequenas barragens de aterro (LEBRETON¹, apud RAMOS e MELO, 1994). Então, RAMOS e MELO (1994) concluem que nessas barragens, o dimensionamento adequado das obras de segurança tem sido negligenciado.

Também é apontado como uma das causas mais frequentes de rupturas de barragens de aterro o não funcionamento ou o mau funcionamento das comportas em consequência de: falta de energia, obstrução ou encravamento do equipamento de manobra, impossibilidade de acesso do pessoal de operação à zona de comando do equipamento em situações de tempestade e manutenção deficiente (RAMOS e MELO, 1994).

RAMOS e MELO (1994) ainda salientam que em relação aos fatores de natureza hidráulica, as causas de ruptura mais frequentes estão associadas a:

- a) aspectos hidrológicos, relacionados com a deficiente avaliação dos hidrogramas de cheia de projeto, isto devido à escassez de dados hidrológicos e a utilização de métodos e valores da cheia de projeto não consentâneos com os critérios atuais;
- b) insuficiente capacidade de vazão dos órgãos de segurança e de exploração;
- c) adoção de soluções para estes órgãos tecnicamente inadequadas;
- d) ações hidrodinâmicas não consideradas no projeto.

Uma inspeção realizada pelo U.S. Corps of Engineers, no início da década de 80, revelou que mais de duas mil barragens dos Estados Unidos não verificavam as condições de segurança exigidas pela regulamentação existente (WATER POWER²,

¹ LEBRETON, A. **Les Ruptures et Accidents Graves de Barrages de 1964 à 1983**. La Houille Blanche, N°6/7, 1985, pp. 52.

² WATER POWER. **U.S. Government Hesitates over Dam Safety Problems**. Jan. 1982 (notícia).

apud RAMOS e MELO, 1994, p.14), sendo que em 81% dos casos a necessidade de reparação ou de reabilitação nessas obras era devido à insuficiente capacidade de vazão dos descarregadores de cheias.

De acordo com RAMOS e MELO (1994), os principais responsáveis por deficiências de comportamento dos descarregadores de cheias são:

- a) subavaliação do valor da vazão de dimensionamento;
- b) mau funcionamento dos equipamentos hidráulicos, incluindo manutenções deficientes, avarias nos equipamentos ou sistemas de alimentação e de comando e desajustamento das leis de manobra das comportas;
- c) deficiente capacidade de vazão;
- d) deteriorações e rupturas nas estruturas, nos equipamentos e a jusante provocadas por ações hidrodinâmicas;
- e) deficiente comportamento estrutural, incluindo as fundações;
- f) obstruções provocadas por materiais transportados em períodos de cheia.

Os itens apresentados a seguir versam sobre a composição do cálculo do risco e sobre a etapa da Análise de Risco com suas classificações, necessários a uma melhor compreensão do item 3.5.2 – Métodos, Metodologias e Ferramentas de Análise de Risco.

3.4 RISCO

Uma definição simples e objetiva do risco é fornecida pelo *Webster's Dictionary*: a possibilidade de perda (*the possibility of loss*), ou seja, a possibilidade da ocorrência de um evento e as conseqüências adversas (perdas) provocadas pela ocorrência (USBR, 2003a).

HARRALD et al. (2004) definem o cálculo do risco como sendo o produto da probabilidade de um evento desfavorável ocorrer pelas conseqüências provocadas pelo evento:

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade do evento} \cdot \text{Conseqüência do evento} \quad (1)$$

KREUZER¹, citado por MENESCAL et al. (2001, p.51), define a fórmula para o cálculo do risco como:

$$\text{Risco} = (\text{Probabilidade de uma condição de perigo ou carregamento}) \cdot (\text{Probabilidade de reação da barragem dada a condição de perigo ou carregamento}) \cdot (\text{Conseqüências dada a reação}) \quad (2)$$

Para o Bureau of Reclamation a fórmula para o cálculo do risco é semelhante (MCGRATH, 2000):

$$\text{Risco} = P(\text{carregamento}) \cdot P(\text{reação adversa para dado carregamento}) \cdot \text{Conseqüência para dada reação adversa} \quad (3)$$

onde P é a probabilidade.

Lembrando que a fórmula acima, utilizada pelo Bureau of Reclamation em sua metodologia *Risk Based Profiling System* – RBPS, considera os seguintes carregamentos: hidráulico, sísmico e estático (HARRALD et al., 2004).

HARRALD et al. (2004) também definem o risco em uma expressão mais elaborada:

$$\text{Risco} = \text{Ameaça} \cdot \text{Vulnerabilidade} \cdot \{\text{Conseqüências [diretas (a curto prazo) + indiretas (amplas)]}\} \quad (4)$$

Quanto ao risco nos negócios do setor de energia elétrica, MACHADO E RABELLO (2001) discorrem sobre o contrato tipo EPC – *Engineering, Procurement and Construction*, modalidade contratual que se cumpre nas condições de preço fixo e

¹ KREUZER, H. **General Report**. In: TWENTIETH CONGRESS ON LARGE DAMS, Question 76, 2000, Beijing, China, v. 1.

prazo determinado para a realização completa de obras e instalações no setor de energia elétrica, prática que vem se tornando tendência no Brasil e no exterior.

Os autores explicam que os riscos num contrato tipo EPC são caracterizados, tanto qualitativamente como quantitativamente, e define-se quem arcará com as responsabilidades pelos mesmos; para tanto, a cobertura securitária é obtida, pois no caso da consumação do risco é necessário que existam recursos financeiros para enfrentar suas conseqüências.

Os principais riscos num contrato tipo EPC são divididos em riscos de natureza técnica (riscos hidrológicos e geológicos) e riscos de natureza negocial (risco de desempenho da instalação, risco de alteração de leis e regulamentos, riscos associados a eventos de força maior, riscos associados a licenças e a autorizações) (MACHADO E RABELLO, 2001).

O principal risco hidrológico, apresentado pelos autores, é o risco de uma cheia, durante a etapa de construção, maior do que aquela para a qual a ensecadeira foi dimensionada para suportar. Em contratos tipo EPC, o risco hidrológico é alocado ao contratado (empresas de engenharia, construtoras, fornecedores de equipamento) até um limite da cheia provável; para valores maiores que o limite, o risco é alocado ao contratante (empreendedor).

MACHADO E RABELLO (2001) concluem não ser apropriado alocar às contratadas de um contrato tipo EPC riscos negociais sobre os quais elas não têm controle nem riscos técnicos além dos limites previsíveis de cada situação.

A seguir, são definidos os três termos de uma fórmula genérica de cálculo do risco: a Probabilidade de Carga, a Probabilidade de Reação e a Conseqüência.

3.4.1 Probabilidade de Carga

CYGANIEWICZ e SMART (2000) definem três categorias de cargas:

- a) Cargas Estáticas (*Static Loads*): incluem cargas hidrostáticas impostas pelo reservatório, cargas estáticas e dinâmicas impostas pela operação das estruturas, cargas induzidas por deslizamentos e pelos fenômenos hidráulicos de erosão e cavitação associados com a água passando através e ao redor da barragem, e sempre considerando: a magnitude da carga, o tempo de exposição e as potenciais conseqüências adversas;
- b) Cargas das Vazões (*Flood Loads*): para sua determinação são desenvolvidas análise de frequências e hidrogramas de escoamento;
- c) Cargas Sísmicas (*Seismic Loads*): o Bureau of Reclamation utiliza o *Probabilistic Seismic Hazard Assessment* (Avaliação da Probabilidade de Perigo Sísmico) em que serão considerados o tipo da fonte do sismo, a magnitude do sismo e a distância entre a fonte do sismo até a barragem com suas estruturas.

3.4.2 Probabilidade de Reação

Segundo o Bureau of Reclamation (USBR, 2003a) pode-se estimar as probabilidades de reação de duas formas:

- a) Descrições Verbais (*Verbal Descriptors*): descrição por palavras aplicada quando não se tem uma base estatística de dados (explicada mais a frente);
- b) utilizando-se dados estatísticos e também pela fórmula abaixo que considera eventos repetidos de uma condição idêntica:

$$p_n = 1 - (1 - p)^n \quad (5)$$

Se um evento randômico tem uma probabilidade de ocorrência p , p_n é a probabilidade de que o evento ocorrerá em n tentativas independentes.

CYGANIEWICZ e SMART (2000) descrevem a utilização da técnica de árvores de eventos, por uma equipe de análise de risco, para estimar as probabilidades

de reações estruturais, em seis passos (uma descrição mais específica sobre árvores de eventos encontra-se no item 3.5.2.1 e um exemplo encontra-se no item 3.5.2, figura 4):

Passo 1) cada membro da equipe de análise de risco deve ter um perfeito entendimento de cada nó da árvore de eventos;

Passo 2) separa-se os fatores de carga com alta probabilidade de ocorrência e os com baixa probabilidade de ocorrência;

Passo 3) a estimativa da probabilidade do nó pode ser feita quando não há informação estatística para usar como base para a determinação das probabilidades. O Bureau of Reclamation emprega o método de descrições verbais (*verbal descriptors*) que transforma avaliações verbais em valores numéricos, é uma transformação verbal em numérica (*verbal to numeric transformation*). O método fornece um processo de estimativa consistente e prático, para ser usado pelos especialistas da equipe, mostrado no quadro 1.

QUADRO 1 – DESCRIÇÕES VERBAIS (*VERBAL DESCRIPTORS*)

Descrição	Probabilidade
Virtualmente Certo	0,999
Extremamente Provável	0,995
Muito Provável	0,990
Provável	0,900
Indefinido	0,500
Improvável	0,100
Muito Improvável	0,010
Extremamente Improvável	0,005
Virtualmente Impossível	< 0,001

FONTE - CYGANIEWICZ e SMART (2000)

Passo 4) os integrantes da equipe identificam os fatores do passo 2 que têm os maiores efeitos sobre as probabilidades estimadas no passo 3;

Passo 5) alcançar um consenso da equipe sobre as probabilidades de reação estimadas e suas incertezas;

Passo 6) repetir os passos 1 ao 5 para cada nó da árvore.

Completados os passos para todos os nós, o processo de análise de risco continua com a identificação e quantificação das conseqüências adversas que podem resultar dos modos de falha identificados nas árvores de eventos (CYGANIEWICZ e SMART, 2000).

3.4.3 Conseqüência

Segundo RAMOS e MELO (1994) a onda de cheia causada pela ruptura de uma barragem pode resultar em perda significativa de vidas humanas e em grandes prejuízos materiais. Os autores afirmam que é possível contabilizar aproximadamente os prejuízos materiais, enquanto que tentar atribuir valor à vida humana levanta questões de ordem moral mais profundas.

O Regulamento de Segurança de Barragens de Portugal, comentado por RAMOS e MELO (1994), entende risco potencial como a quantificação das conseqüências de um acidente, independentemente da probabilidade da ocorrência deste. De acordo com as perdas de vidas humanas e bens materiais são estabelecidos três níveis de riscos potenciais:

- a) baixo: na ausência de perdas de vidas humanas e custos materiais reduzidos;
- b) significativo: havendo perda de algumas vidas humanas e custos materiais relativamente elevados;
- c) elevado: perda de um número apreciável de vidas humanas e custos materiais altos.

O estudo da estimativa das conseqüências contempla (USBR, 2003a):

- a) parâmetros de ruptura da barragem (*dam breach parameters*) para cada modo de falha;

- b) determinação das áreas de inundação;
- c) tempo de aviso (*warning time*): CNPGB (2005) define como o intervalo de tempo entre o instante do primeiro aviso à população em risco (PAR) e o instante de chegada da onda de cheia à PAR; este tempo é utilizado em métodos para a estimativa de perda de vidas devido à ruptura da barragem;
- d) potencial de perda de vidas;
- e) apreciação das perdas econômicas.

Para o cálculo do potencial de perda de vidas USBR (2003a) apresenta um procedimento simplificado:

- a) se a quantidade da população em risco depender do período do ano (por exemplo: estação do ano, época de colheita) e a diferença for significativa para cada período, estimar a probabilidade da barragem falhar dentro de cada período proporcionalmente ao número de dias nestes períodos pelo número de dias do ano;
- b) estimar a probabilidade da falha ocorrer: durante o dia, durante a noite, enquanto a população está acordada, e a noite quando a população já estiver dormindo;
- c) estimar o número de pessoas em risco que pode variar de acordo com o período do ano ou com a hora do dia;
- d) estimar o potencial para perda de vidas utilizando dados históricos de outras falhas, que também é a melhor forma de estimar o *warning time*.

Para CYGANIEWICZ e SMART (2000) são consideradas como conseqüências: as perdas econômicas relacionadas com perda de benefícios do projeto e o perigo potencial para as propriedades da área inundada, há também a perda de vidas potencial, a alteração de *habitats* e do ambiente, os impactos sociais na

comunidade local e a perda de confiança no proprietário e nos operadores da barragem. Como estas conseqüências não são diretamente mensuráveis, então pesos são atribuídos.

Para a perda de vida potencial, complexos fatores como área inundada, *warning time*, tempo para a ruptura, tempo de chegada da onda de choque e reação emergencial são considerados (CYGANIEWICZ e SMART, 2000).

Em seu regulamento, USBR (2003b) considera como conseqüência, no cálculo do risco, a perda de vidas esperada para um dado modo de falha da barragem.

KUPERMAN et al. (2001) afirmam que para a quantificação e simulação das conseqüências sociais originadas pela ruptura de uma barragem devem ser levados em consideração os seguintes itens: características demográficas, serviços públicos afetados, deslocamentos de pessoas, empregos afetados, influência sobre a capacidade produtiva, efeitos sobre o patrimônio cultural, efeitos sobre áreas recreacionais e de lazer, influência sobre a saúde pública, população afetada (traumatismos, falecimentos, hospitalizados, traumas, entre outros).

Quanto às conseqüências ambientais, devem ser apreciados os seguintes itens: destruição da camada vegetal e do *habitat*, remoção do solo de cobertura, deposição de sedimentos, destruição de vida animal (KUPERMAN et al., 2001).

Em relação às conseqüências econômicas, além da perda da água armazenada e da paralisação do faturamento, devem ser levantados: quantidade de residências danificadas ou destruídas, quantidade de indústrias, comércio e agricultura afetados, itens afetados relativos à infra-estrutura, reparos e recuperações das estruturas do barramento para reconduzi-lo à função inicialmente prevista, fornecimento temporário de serviços anteriormente supridos pela barragem (abastecimento de água e geração de energia elétrica), limpeza da área inundada (KUPERMAN et al., 2001).

SILVEIRA (1999) apresenta um exemplo de aplicação do cálculo do risco considerando os custos envolvidos (quadro 2):

QUADRO 2 – EXEMPLO DE CÁLCULO DO RISCO

Carregamento	P(carga)	Reação	P(reação)	Danos em US\$ milhões	Custo do risco anual (US\$)
40-60% CMP*	0,004	falha vertedouro auxiliar	0,1	35	14.000,00
60-80% CMP	0,0008	falha vertedouro auxiliar	0,3	35	8.400,00
	0,0008	barragem é galgada	0,05	80	3.200,00
	0,0008	falha vertedouro serviço	0,05	80	3.200,00
>80% CMP	0,0002	falha vertedouro auxiliar	0,5	35	3.500,00
	0,0002	barragem é galgada	0,2	160	6.400,00
	0,0002	falha vertedouro serviço	0,1	160	3.200,00
N.A. máx (estático)	0,5	barragem é galgada	0,0005	80	20.000,00
Sísmica M** 5,5-6,5	0,01	barragem é galgada	0,005	80	4.000,00
Sísmica M 6,5-7,5	0,001	barragem é galgada	0,1	80	8.000,00
Sísmica M > 7,5	0,0001	barragem é galgada	0,3	80	2.400,00
Custo do risco anual total					76.300,00

* Cheia Máxima Provável

** Magnitude

FONTE - SILVEIRA (1999)

3.5 ANÁLISE DE RISCO

Segundo SILVEIRA (1999), em uma definição breve, os métodos de análise de risco e tomada de decisão são utilizados para o gerenciamento apropriado dos recursos disponíveis, de modo a se conseguir a maior segurança das barragens a um menor custo.

Segundo o mesmo autor, uma barragem é considerada segura e dispensa a análise de risco se satisfazer os critérios atuais de projeto, se apresentar desempenho satisfatório e se não registrar deficiências nas inspeções *in situ*.

MCGRATH (2000) define a análise de risco como sendo uma metodologia que estima duplamente a probabilidade de um componente ou sistema falhar e a magnitude das conseqüências resultantes da falha.

MCGRATH (2000) atenta para o fato de que não é uma prática comum comparar os resultados da análise de risco com critérios de risco aceitáveis (*acceptable risk criteria*, que no caso de *loss of life criteria* são os chamados *societal risk criteria* ou *individual risk criteria*) para determinar níveis de risco razoáveis aceitáveis pelo público exposto. Apenas duas organizações utilizam este conceito: o Bureau of

Reclamation utiliza explicitamente critério de risco aceitável para estabelecer níveis aceitáveis de segurança de barragens, enquanto que o regulamento do Estado de Washington inclui implicitamente critério de risco aceitável.

O autor também conclui que a análise de risco é uma valiosa ferramenta para entender o comportamento das barragens, para ajudar na definição das inspeções, monitoramentos e instrumentações, para identificar as medidas de redução do risco (*risk reduction*) e para priorizar as investigações e os trabalhos de redução do risco (MCGRATH, 2000).

Segundo CYGANIEWICZ e SMART (2000), o Bureau of Reclamation distingue a *risk analysis*, que determina o risco em termos qualitativos e quantitativos, do *risk assessment*, que utiliza os resultados da *risk analysis* com outros fatores para tomar uma decisão sobre a ação que deve ser utilizada como solução. A *risk reduction analysis* determina os impactos que as alternativas propostas oferecem sobre o risco.

O Bureau of Reclamation define a análise de risco como uma ferramenta capaz de identificar as condições de carregamento (estático, hidrológico, sísmico), os modos potenciais de falha e as conseqüências, e também estimar as probabilidades para cada evento (USBR, 2003a).

Para o Bureau of Reclamation o processo de análise de risco é descrito em dois estágios: o primeiro consiste em determinar a necessidade de reduzir o risco e o segundo em avaliar alternativas estratégicas para a redução do risco (MCGRATH, 2000).

O Bureau considera, também, que a *risk reduction analysis* divide-se em duas partes: a primeira consiste em identificar os componentes que contribuem para um maior risco e então planejar alternativas para reduzir este risco. A segunda parte é a avaliação destas alternativas para uma efetiva redução do risco (MCGRATH, 2000).

Os benefícios da análise de risco segundo CYGANIEWICZ e SMART (2000) são:

- a) a comunicação do risco: a quantificação do risco informa aos tomadores de decisão a gravidade do risco e suas potenciais conseqüências;
- b) uma melhor compreensão do comportamento das barragens: a análise é capaz de identificar as características e condições da barragem que contribuem para sua vulnerabilidade;
- c) a análise identifica quais informações adicionais são necessárias para reduzir as incertezas;
- d) fornece um grupo de alternativas de ações corretivas para mitigar os riscos identificados;
- e) ajuda na escolha da alocação de recursos, pois indica quais são as prioridades de acordo com a classificação relativa do risco.

A classificação das barragens de um inventário, de acordo com a análise de risco, indica qual delas oferece um risco mais alto para o público e, então, ajuda a decidir se são necessárias modificações para reduzir o risco de acordo com a prioridade (CYGANIEWICZ e SMART, 2000).

3.5.1 Classificação da Análise de Risco

SILVEIRA (1999) classifica a análise de risco em três níveis:

- a) avaliação subjetiva de risco: o responsável pela barragem só considera o que lhe parece mais importante. Este tipo de avaliação pode ser suficiente e resultar em uma boa decisão, apesar de não ser computada de modo sistemático, mas dificilmente resultará em uma solução otimizada;
- b) avaliação de risco baseada em índices: estimativa sistemática dos fatores que afetam a segurança estabelecendo uma classificação para um conjunto de barragens. Não permite comparações numéricas de probabilidades nem considera condições específicas de campo;

- c) análise formal do risco: estima-se as frequências da ocorrência dos eventos adversos, as probabilidades dos níveis de resposta aos eventos adversos e dos danos conseqüentes dos eventos adversos.

Já o Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens classifica a análise de risco em três grupos (CNPGB, 2005):

- a) análise qualitativa: uma análise que classifica na forma descritiva (por exemplo, elevado, grande, médio) ou de escalas de ordenação numérica (por exemplo, de 1 a 5) para caracterizar a magnitude das conseqüências potenciais;
- b) análise semi-quantitativa;
- c) análise quantitativa: uma análise das conseqüências baseada em valores numéricos, pretendendo-se que tais valores sejam uma representação válida da grandeza real das conseqüências e da probabilidade dos vários cenários que são examinados.

A classificação da análise de risco por MCGRATH (2000) é subdividida em:

- a) análise qualitativa, que usa um sistema de classificação para a estimativa das probabilidades de falha e para as conseqüências;
- b) análise quantitativa, que pode ser:
 - *Quantitative Risk Analysis* – QRA (análise de risco quantitativa);
 - *Probabilistic Risk Analysis* – PRA (análise de risco probabilística).

HARRALD et al. (2004) citam um *workshop* patrocinado pela FEMA – Federal Emergency Management Agency, que identificou quatro áreas de aplicação do *risk assessment* que ocorrem nas áreas quantitativa e qualitativa:

- a) *Failure Modes Identification* – Identificação de Modos de Falha (qualitativa);
- b) *Index Priorization* – Índice de Priorização;
- c) *Portfolio Risk Assessment* – Avaliação de Risco de Inventário;
- d) *Detailed Quantitative Risk Assessment* – Avaliação de Risco Quantitativa Detalhada.

O Bureau of Reclamation classifica em duas categorias básicas a análise de risco, se a primeira categoria (alínea a) justificar ações adicionais, então a segunda (alínea b) é empregada (USBR, 2003a):

- a) *Baseline Risk Analysis* (Análise de Risco Básica): determina o risco representado pela situação atual da estrutura existente e pela forma como ela é geralmente operada; três tipos são geralmente usados pelo Bureau (USBR, 2003a);
 - *Portfolio Risk Analysis* (Análise de Risco de Inventário) – PRA: o *U.S. Department of the Interior* utiliza o sistema *Technical Priority Ranking* (Técnica de Classificação de Prioridades - TPR) que é aplicado para priorizar as barragens. Segundo CYGANIEWICZ e SMART (2000) PRA é um sistema de classificação técnica que descreve o risco pela ponderação dos desempenhos hidrológicos, sísmicos e estáticos; paralelamente ao PRA o Bureau desenvolveu o RBPS – *Risk Based Profiling System* (Sistema Modelo Risco Baseado) onde pontos são atribuídos às categorias de carga estática, hidrológica e sísmica, e também à operação e à manutenção;
 - *Comprehensive Facility Review* (Revisão Completa das Instalações) – CFR: como parte do processo é preparado um *Report of Findings* (Relatório de Objetivos) – ROF em que é estimado o risco apresentado

pela estrutura existente. De acordo com CYGANIEWICZ e SMART (2000) uma equipe do Bureau realiza essa revisão completa a cada seis anos, revisão que consiste em examinar o desempenho passado de cada barragem, as mudanças no estado da arte do projeto das barragens e as potenciais questões a serem levantadas associadas às barragens. Já segundo USBR (2003b), como o processo da estimativa do risco durante a CFR não tem o intuito de ser um processo muito detalhado pela equipe, um alto nível de incerteza pode ser associado com a estimativa do risco;

- *Issue Evaluation Risk Analysis* (Questão da Apreciação da Análise de Risco): é realizada por uma equipe de análise de risco que desenvolve árvores de eventos definindo modos de falha e estimando as probabilidades de carga, de reação estrutural e de conseqüências. Conforme CYGANIEWICZ e SMART (2000) este tipo de *Baseline Risk Analysis* é chamada também de *Project Team Risk Analysis* (Equipe de Projeto de Análise de Risco) formada por um grupo de especialistas que desenvolvem árvores de eventos.
- b) *Risk Reduction Analysis* (Análise de Redução do Risco): determina a potencial redução do risco de várias alternativas que podem ser aplicadas para tal fim; subdivide-se em dois tipos (USBR, 2003a):
- *Alternative Identification Analysis* (Análise de Identificação de Alternativas): determina quais alternativas podem potencialmente reduzir o risco para níveis aceitáveis;
 - *Alternative Evaluation Analysis* (Análise de Apreciação das Alternativas): estima a potencial redução do risco oferecida por cada alternativa.

Conforme CYGANIEWICZ e SMART (2000) quando o risco determinado pela *Baseline Risk Analysis* não está dentro dos níveis aceitáveis de risco, então a *Risk Reduction Analysis* é aplicada, pois esta examina as alternativas para reduzir o risco e o impacto dessas alternativas sobre o risco inicial.

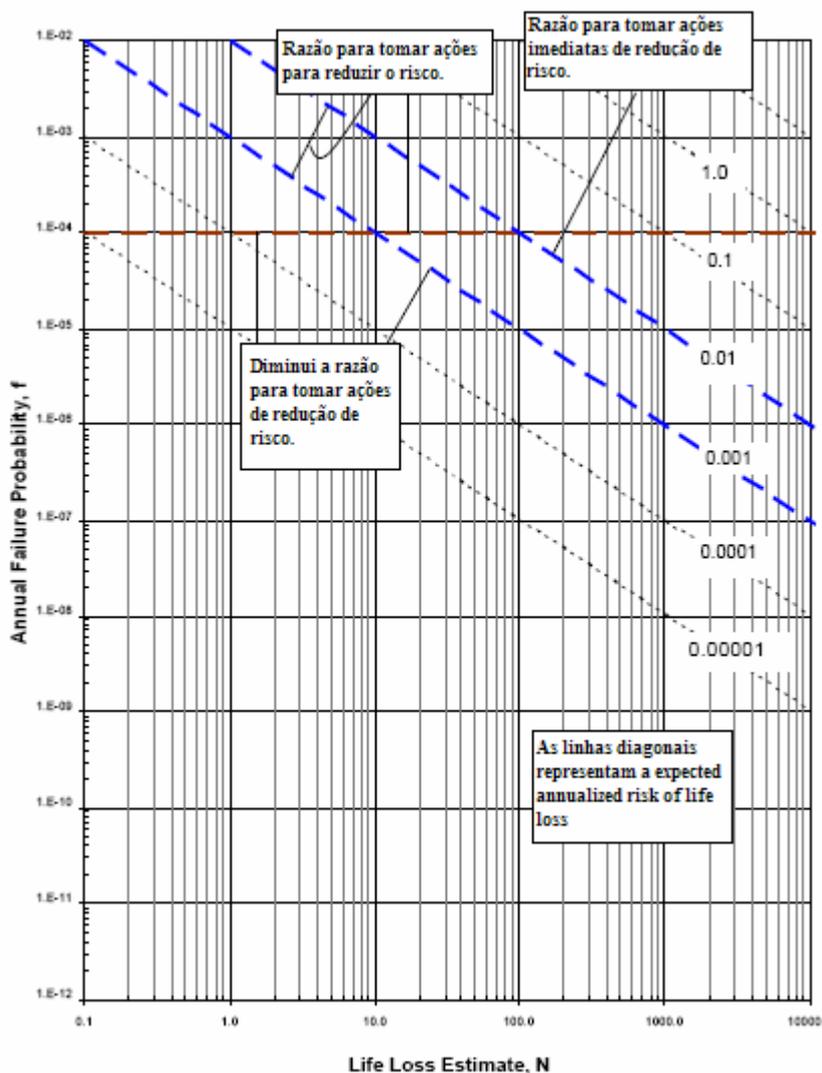
De acordo com o regulamento apresentado por USBR (2003b) a estrutura do risco divide-se em quatro partes:

- a) *risk identification* (identificação do risco): os modos de falha são identificados e monitorados (USBR, 2003b);
- b) *risk estimation* (estimação do risco): quantifica o risco estimando a probabilidade de uma liberação não intencional da água armazenada e as conseqüências dessa liberação. Mais especificamente, o regulamento calcula o *estimated risk* (risco estimado) pelo produto entre a *annual probability of dam failure* (probabilidade anual de falha da barragem) e a *expected life loss consequence* (conseqüência de perda de vidas esperada) (USBR, 2003b):
 - *annual probability of failure* (probabilidade anual de falha): é a probabilidade de uma falha estrutural ou de uma condição que resulta em uma liberação não intencional do reservatório em que se esperaria como conseqüência a perda de vidas. Esta probabilidade é totalizada para todas as condições específicas de carregamento (sísmico, estático, hidrológico, operação inadequada, entre outros). Não são incluídas probabilidades de eventos em que não é esperada a perda de vidas.
- c) *risk evaluation* (apreciação do risco): compara os riscos estimados com padrões aceitáveis para determinar se é necessária alguma ação para reduzir os riscos. A norma do Bureau apresenta duas formas de comparação para se fazer esta apreciação (USBR, 2003b):

- é recomendado aos tomadores de decisão implementarem ações para a redução do risco se a *annual probability of failure* exceder 1 possibilidade em 10.000;
- *estimated risk* (risco estimado), também denominado *risk of life loss* (risco de perda de vidas) ou *expected annualized risk of life loss* (risco de perda de vidas anual esperado), indica a necessidade e urgência de implementar ações de redução do risco se:
 - *estimated risk* $> 0,01$ vidas/ano: devem ser tomadas ações imediatas para a redução do risco;
 - *estimated risk* entre 0,01 e 0,001 vidas/ano: devem ser tomadas ações para diminuir o risco;
 - *estimated risk* $< 0,001$ vidas/ano: a necessidade de implementar ações de redução do risco ou conduzir estudos adicionais diminui com o valor do *estimated risk*.

Para apreciação do risco é apresentado um diagrama denominado Diagrama f-N (figura 3) que cruza a probabilidade anual de falha da barragem f com a perda de vidas estimada N, dando como resultado o risco de perda de vidas anual estimado, e, ainda, ilustra as ações de redução do risco necessárias (USBR, 2003b):

FIGURA 3 – DIAGRAMA f-N



FONTE: USBR (2003b)

- d) *risk reduction actions* (ações de redução do risco): para adotar uma ação de redução do risco é preciso considerar várias alternativas de ações, os custos associados a elas e o impacto delas sobre o risco estimado (USBR, 2003b).

ALMEIDA (1998) esquematiza a gestão do risco para vales a jusante de barragens da seguinte forma:

- a) avaliação do risco, que consiste em:
- caracterização e identificação das zonas de perigo;
 - análise do risco associado.

b) mitigação do risco, subdividida em:

- redução do risco;
- gestão de crise.

A caracterização e identificação das zonas de perigo são realizadas pela sobreposição de mapas de inundação em cima de mapas de ocupação do solo, pois o perigo a jusante está associado a quatro grandezas (ALMEIDA, 1998):

- a) nível máximo atingido pela água;
- b) área submersa máxima;
- c) taxa de subida do nível da água;
- d) velocidades extremas do escoamento.

Os mapas de inundação, que deverão ser apresentados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), além de representarem as áreas inundadas pela cheia para cada cenário deverão fornecer as seguintes informações adicionais (ALMEIDA, 1998):

- a) tempos de chegada do caudal máximo e da cota máxima de água;
- b) isolinhas de altura máxima de água;
- c) isolinhas de velocidade máxima do escoamento;
- d) isolinhas dos valores máximos instantâneos da vazão específica ($q = h \cdot v$).

Já os mapas de ocupação do solo informam dados de densidade populacional a jusante da barragem (ALMEIDA, 1998).

A análise do risco é feita pelo cálculo do risco (probabilidade do evento ocorrer multiplicada pelo dano provocado pelo evento) (ALMEIDA, 1998).

O dano depende da **susceptibilidade** dos **elementos de risco** (pessoas e bens), e esta susceptibilidade é determinada por meio de dois fatores (ALMEIDA, 1998):

- a) exposição física aos efeitos da cheia, ou seja, a localização dos elementos de risco;
- b) **vulnerabilidade** que traduz a tolerância física, social e econômica ao acidente (no subitem 3.5.2, é mostrada a metodologia desenvolvida pelo autor para o cálculo do **fator de vulnerabilidade**).

A redução do risco nos vales a jusante das barragens é feita com o planejamento da ocupação do solo com base nas zonas de perigo identificadas (ALMEIDA, 1998).

A gestão da crise, que é definida como a resposta dada em caso de acidente, é realizada com (ALMEIDA, 1998):

- a) plano de emergência;
- b) Sistema de Alerta e Aviso (SAA).

3.5.2 Métodos, Metodologias e Ferramentas de Análise do Risco

Abordagem com Base em Normas (*Standards Based Approach*) é a abordagem padrão na engenharia de barragens, em que os riscos são controlados pelo cumprimento de regras estabelecidas para as situações de projeto, resistência estrutural, coeficientes de segurança e pela adoção de medidas de projeto defensivas (CNPGB, 2005).

Análise de *dambreak*: análise que possibilita uma estimativa dos efeitos da onda de cheia resultante da ruptura da barragem; a análise inclui também o mecanismo de ruptura da barragem, bem como a propagação da onda de cheia através do canal de jusante e das áreas susceptíveis de serem inundadas (CNPGB, 2005).

O Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002) tem o objetivo de estabelecer parâmetros e roteiro quanto aos procedimentos de segurança a serem adotados em barragens novas e barragens já construídas. Quanto à classificação de barragens, que constitui a base para a análise da segurança e para fixar níveis apropriados de atividades de inspeção, afirma que cada barragem deve ser classificada de acordo com as conseqüências potenciais de sua ruptura, como mostra o quadro 3; o sistema de classificação proposto está baseado no potencial de perdas de vidas e nos danos econômicos, sociais e ambientais associados à ruptura da barragem. O manual, em seu anexo A, apresenta ainda um sistema alternativo para avaliação do potencial de risco, o qual é citado mais a frente em MENESCAL et al. (2001).

QUADRO 3 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CONSEQÜÊNCIA DE RUPTURA DE BARRAGENS

Conseqüência de Ruptura	Perdas de Vidas	Econômico, social e danos ambientais
muito alta	significativa	dano excessivo
alta	alguma	dano substancial
baixa	nenhuma	dano moderado
muito baixa	nenhuma	dano mínimo

FONTE - BRASIL (2002)

PINTO (1987) apresenta critérios sugeridos pela Comissão de Segurança do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB) para a classificação do potencial de risco de barragens, conforme quadro 4:

QUADRO 4 – CLASSIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE RISCO DE BARRAGENS (CBGB)

Categoria	Perdas de Vida	Perdas Econômicas
baixo	nenhuma esperada (nenhuma estrutura permanente para habitação humana)	mínima (região não desenvolvida e estruturas e cultivos ocasionais)
significante	até cinco (nenhum desenvolvimento urbano e não mais do que um pequeno número de estruturas habitáveis)	apreciável (terras cultivadas, industriais e estruturas)
alto	mais do que cinco	excessiva (comunidades, indústrias e agricultura extensas)

FONTE - PINTO (1987)

Segundo o Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens de Portugal (CNPGB, 2005) são seis os métodos de análise de risco, disponíveis na bibliografia especializada, que melhor se adequam às barragens:

- a) HAZOP – *Hazard and Operability Analysis* (Análise dos Perigos e da Operacionalidade): de acordo com o Grupo, o método classifica por meio de palavras os desvios das grandezas que caracterizam o comportamento de um subsistema em análise, reconhecendo as causas e as conseqüências dos desvios e propondo ações corretivas, como é apresentado no exemplo do quadro 5;
- b) FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis* (Análise dos Modos de Falha e dos seus Efeitos): a partir de um modo de falha, avalia suas causas, a seqüência de seus efeitos, os meios de sua detecção, de sua prevenção e de mitigação dos seus efeitos (quadro 6). Segundo HARTFORD (1999), é o método de análise por meio do qual as conseqüências de modos de falha de um componente são sistematicamente identificadas e analisadas;
- c) FMECA – *Failure Mode, Effect and Criticality Analysis* (Análise dos Modos de Falha, dos seus Efeitos e da sua Severidade): ao se aplicar escalas de probabilidade de ocorrência das falhas e de gravidade dos seus efeitos ao método FMEA, tem-se esse método de análise de risco semi-quantitativo. De acordo com HARTFORD (1999), completa o FMEA ao levantar a probabilidade de ocorrência e conseqüência para cada modo de falha;
- d) ETA – *Event Tree Analysis* (Análise por Árvore de Eventos): método de análise semi-quantitativo e quantitativo que permite calcular a probabilidade de ocorrência de seqüências de eventos a partir de um determinado acontecimento iniciador que pode conduzir a falhas relevantes (figura 4);
- e) FTA – *Fault Tree Analysis* (Análise por Árvore de Falhas): método gráfico (figura 5) que utiliza símbolos normalizados (quadro 7) para indicar a relação entre os eventos, partindo de uma falha e identificando seqüências e combinações de eventos até chegar a eventos iniciadores que podem

resultar na ocorrência da citada falha, método que pode ser usado em análises qualitativas, semi-quantitativas e quantitativas;

- f) *Noeud Papillon* (Nó Borboleta): o evento central (figura 6) representa a falha do sistema unindo a parte esquerda, que utiliza o método da Árvore de Falhas, à parte direita, que utiliza Árvore de Eventos.

QUADRO 6 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO FMEA

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

a - Sistemas principais

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

b - Sub-sistemas da barragem

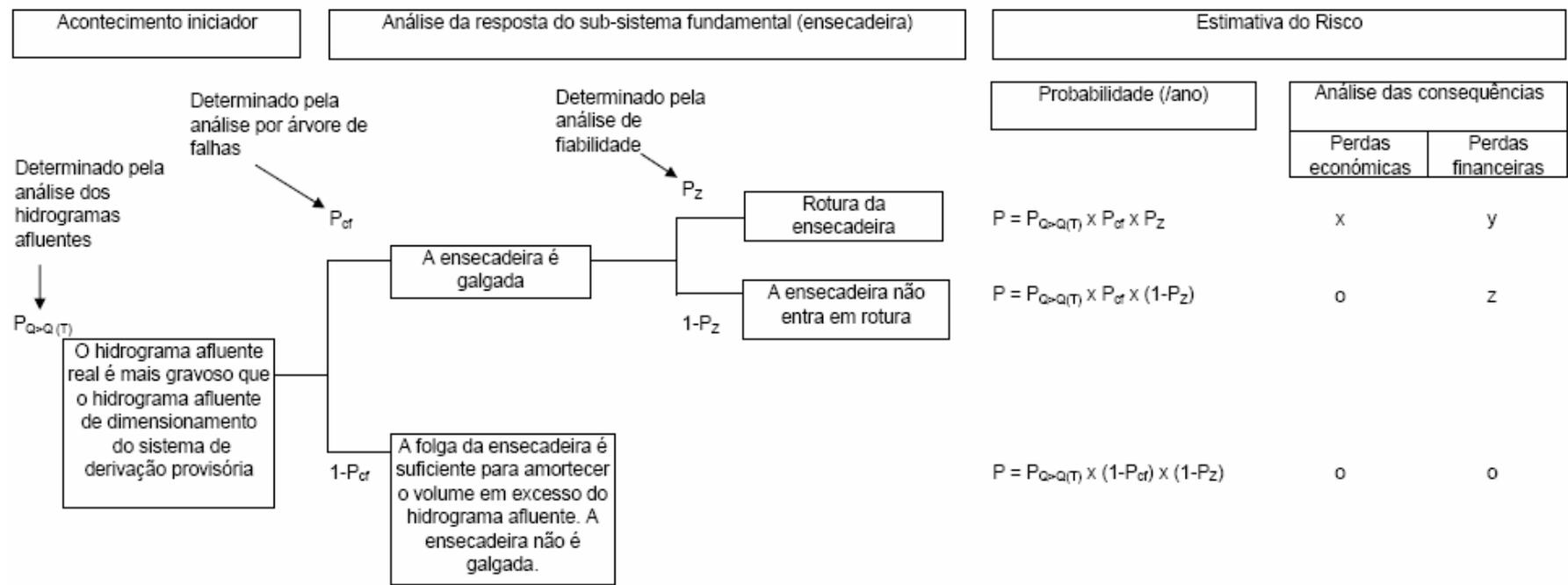
- 1 - galeria de desvio provisório
- 2 - ensecadeira
- 3 - corpo da barragem
- 4 - descarregador de cheias
- 5 - descarga de fundo
- 6 - tomada de água

c - Fase

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

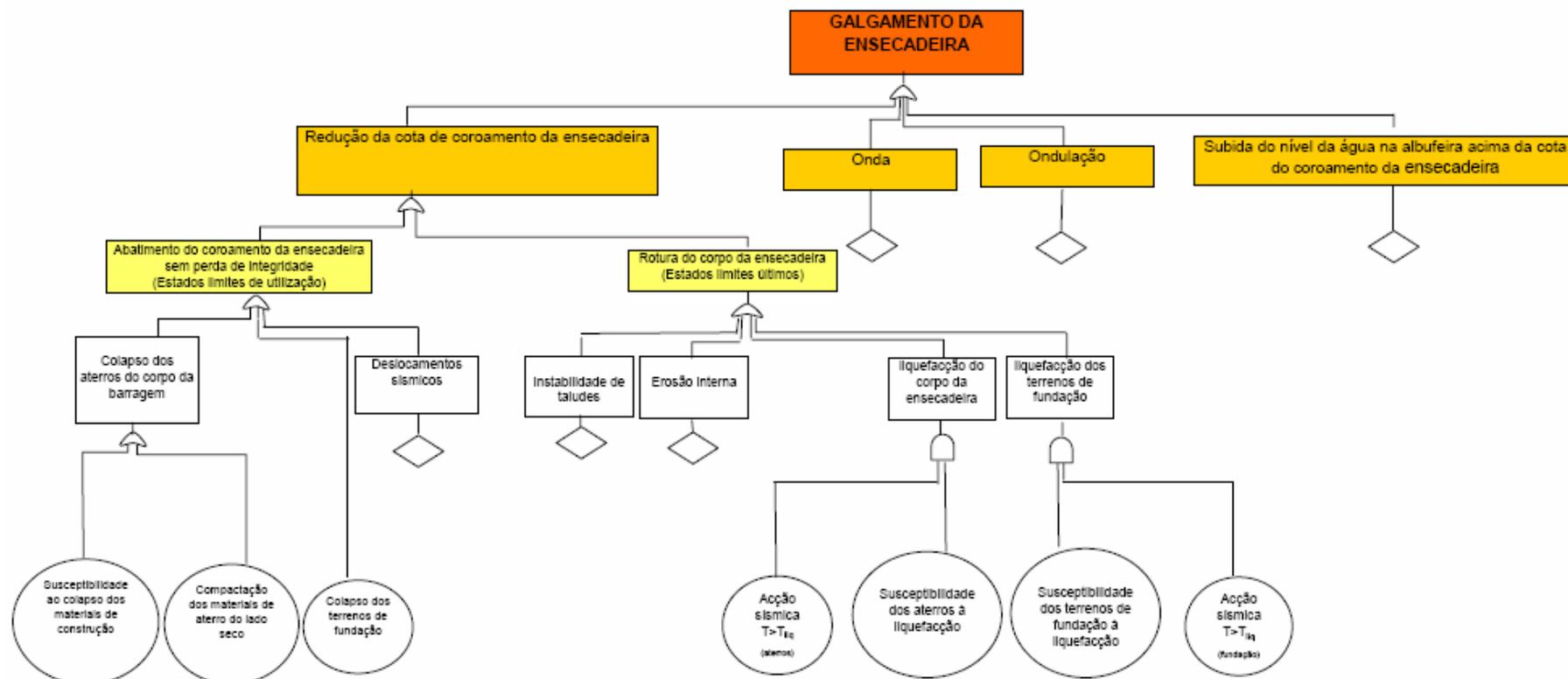
FONTE - CNPGB (2005)

FIGURA 4 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DE APLICAÇÃO DE UMA ÁRVORE DE EVENTOS



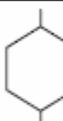
FONTE - CNPGB (2005)

FIGURA 5 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DE APLICAÇÃO DE UMA ÁRVORE DE FALHAS



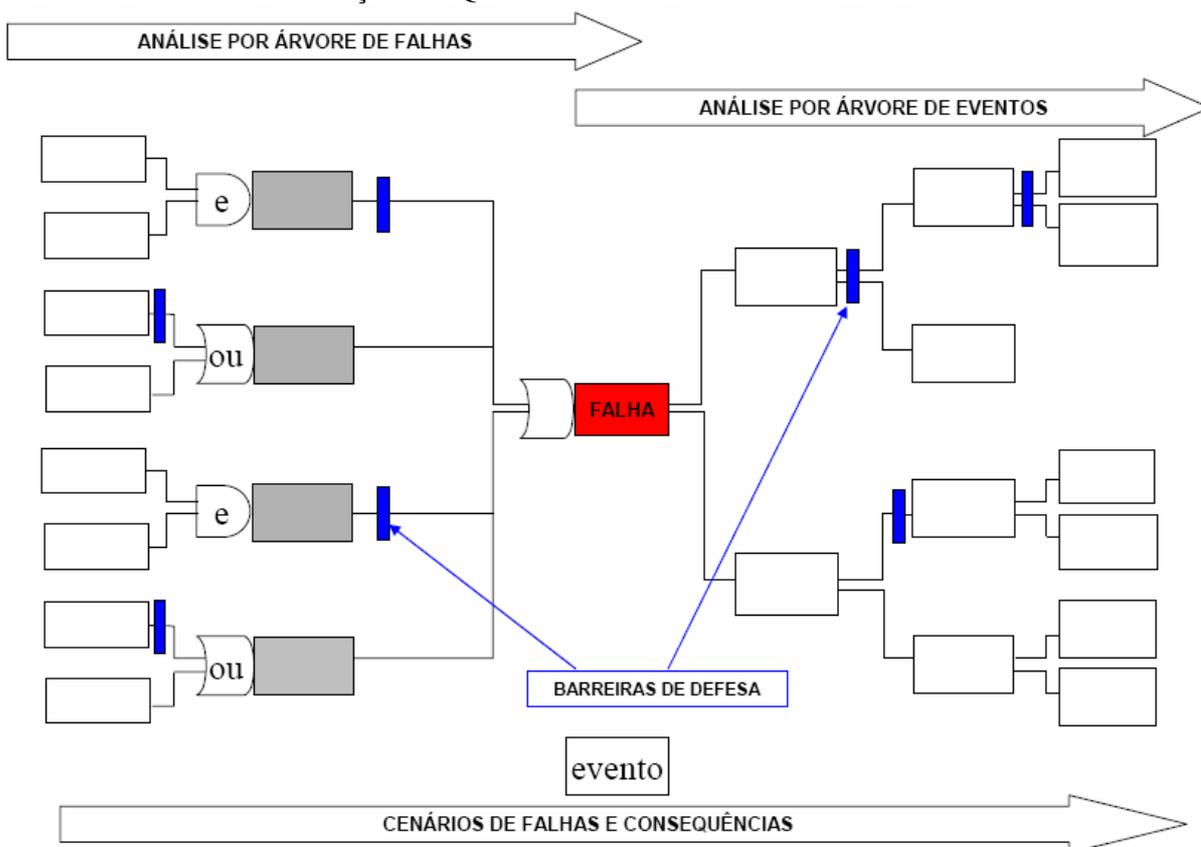
FONTE – CNPGB (2005)

QUADRO 7 – SÍMBOLOS LÓGICOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DE ÁRVORES DE FALHAS

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

FONTE - CNPGB (2005)

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MÉTODO NÓ BORBOLETA



FONTE – CNPGB (2005)

ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) e ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) são critérios que não fornecem valores explícitos, mas uma direção ou inclinação (MCGRATH, 2000).

Segundo CNPGB (2005), ALARP é um princípio metodológico que estabelece que os riscos, inferiores ao limite de tolerabilidade, só são toleráveis se a sua redução for impraticável ou se os custos associados a essa redução forem desproporcionais aos benefícios.

HARRALD et al. (2004) identificam algumas metodologias que assessoram as seguintes abordagens do risco:

- a) *dam safety risk assessment*: RBPS;
- b) *dam safety priority indexing*: TPR, CI;

- c) *dam safety risk assessment and priority indexing*: PRA, CI;
- d) *dam security risk (and vulnerability) assessment*: RAM-D, EPRI tool.

As metodologias da alínea “d” referem-se a questões de defesa das barragens contra ataques terroristas, sendo que a ferramenta EPRI ainda se encontra em desenvolvimento pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) em cooperação com a *Federal Energy Regulation Commission* (FERC) (HARRALD et al., 2004).

Risk Assessment Methodology for Dams (RAM-D) foi desenvolvido em 2001 pelo *Sandia National Laboratories* para a *Interagency Forum for Infrastructure Protection* (IFIP), que representa uma parceria de hidrelétricas, órgãos governamentais responsáveis por barragens, operadoras de sistemas de transmissão e especialistas em prevenção de terrorismo. A grande questão desta metodologia está em quantificar o risco de um ataque terrorista (HARRALD et al., 2004).

Portfolio Risk Assessment (PRA): metodologia desenvolvida por David Bowles, em 1996, para ser aplicada a um conjunto de barragens pertencente a um único responsável. É utilizada como prática padrão na Austrália e tem começado a ser utilizada por algumas agências de barragens americanas (HARRALD et al., 2004).

O processo de aplicação do PRA deve ser conduzido por uma equipe e inclui, resumidamente, os seguintes tópicos (HARRALD et al., 2004):

- a) identificação das necessidades e objetivos da aplicação da metodologia;
- b) inspeção com um sistema de classificação simplificado, como por exemplo:
 - *Pass (P)*;
 - *No Pass (NP)*;
 - *Aparent Pass (AP)*;

– *Apparent No Pass (ANP)*.

Sendo que AP e ANP devem ser utilizados quando as informações disponíveis não forem suficientes.

- c) são feitas estimativas das probabilidades das vazões e de terremotos de cada região; um reconhecimento do nível de avaliação do risco existente das barragens que são tratadas contra os padrões da engenharia é feito e os modos de falha são identificados aplicando-se FMEA;
- d) aplicação de um modelo de *dambreak*, definição de mapas de inundação e estimativa de custos de medidas de redução do risco são feitas;
- e) para as conseqüências são considerados o *life safety tolerable risk* (risco tolerável para vidas protegidas) e as normas de riscos econômicos e financeiros, incluindo o princípio ALARP.

O risco total do *portfolio* é calculado pela soma das estimativas anuais das probabilidades de falha, da *annualized life safety* (vidas protegidas anual) e dos riscos econômicos e financeiros de todas as barragens do *portfolio* (HARRALD et al., 2004).

Segundo os autores, o Bureau of Reclamation é o maior utilizador de metodologia baseada em risco com o seu *Risk Based Profiling System* (Sistema Modelo Baseado em Risco) – RBPS, este possui a capacidade de priorizar as ações de segurança de barragens e identificar as estruturas que representam grande risco para o público. Anteriormente, era utilizado o método *Technical Priority Rating* (TPR) que não era um sistema baseado no risco (HARRALD et al., 2004).

A base do RBPS é o *failure index = load . response* (índice de falha = carga . reação) para os casos hidrológico-hidráulico, sísmico e estático que junto com O&M (operação e manutenção) são os principais fatores que levam à ruptura de uma barragem (HARRALD et al., 2004).

A pontuação máxima que pode ser atingida na aplicação desta metodologia é de 1000 pontos alocados entre as quatro categorias do quadro 8; quanto mais alta a pontuação total, maior o risco potencial associado à barragem (HARRALD et al., 2004):

QUADRO 8 – PONTUAÇÃO RBPS

CATEGORIA	PONTUAÇÃO
Estática	300
Hidrológica	300
Sísmica	300
Operação e Manutenção	100
TOTAL	1000

FONTE - HARRALD et al. (2004)

Então, pode ser calculado o chamado *Risk Index* (Índice de Risco) pelo produto do *failure index* por um *loss of life factor* (fator de perda de vidas), este que representa as conseqüências associadas à falha, como por exemplo a *annualized loss of life* (perda de vidas anual) já mencionada (HARRALD et al., 2004).

O *loss of life factor* é determinado considerando: a população total em risco (*Population at Risk – PAR*), a localização desta população a jusante da barragem, a magnitude da vazão esperada pela falha da barragem e a severidade do modo de falha (HARRALD et al., 2004).

O *Risk Index* é calculado individualmente para cada categoria de *failure index* e ao final todos os *Risk Index* são somados, o que resulta no *Total Risk Index* (Índice de Risco Total) (HARRALD et al., 2004).

Impactos potenciais sociais e econômicos são calculados pelo *Socio-Economic Index* (Índice Sócio-Econômico) que é a multiplicação do *failure index* pela *population at risk* e dividido por 1000, sendo que “social” inclui conseqüências culturais e no meio-ambiente (HARRALD et al., 2004).

Para estimar as probabilidades de conseqüências adversas das cargas o RBPS utiliza com grande ênfase o FMECA (HARRALD et al., 2004).

Os dois tipos de risco definidos pela metodologia *Risk Index (failure index x loss of life factor)* e *Socio-Economic Index (failure index . total PAR / 1000)* são apenas mecanismos de pontuação para a classificação das barragens (método qualitativo) de acordo com o modo de falha e suas conseqüências, não sendo uma proposta de um esquema de priorização de alternativas de redução de risco (HARRALD et al., 2004).

CYGANIEWICZ e SMART (2000) relatam que o Bureau fornece 20 apêndices que complementam a metodologia do RBPS, entre eles, citam alguns:

- a) infiltração e *piping* em barragens de aterro: fornece um método para a classificação através de vários casos históricos disponíveis;
- b) reação sísmica de barragens de aterro e de concreto: fornece informação sobre os fatores a serem considerados na análise do risco apresentado pela estrutura num evento sísmico, como por exemplo liquefação e fissuração;
- c) determinação das condições de carregamento para eventos hidrológicos e sísmicos: explica sobre o desenvolvimento e uso de informações de carregamento em árvores de eventos;
- d) estimativas de conseqüências de perdas de vidas: discute os muitos fatores a serem considerados em estimativas de perda de vidas; cada fator inclui a detecção do evento, os processos de decisão, de notificação e de *dam breach*. Índices de fatalidade são fornecidos para estimativas de perda de vidas da população em risco.

Condition Indexing Method ou *Condition Index* (Índice de Condição) – CI é o fator que define o atual estado físico de uma instalação ou parte dela (HARRALD et al., 2004).

A USACE (United States Army Corps of Engineers) desenvolveu o programa *Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation* (Reparo, Avaliação, Manutenção e Recuperação).

Manutenção e Recuperação) – REMR com o objetivo inicial de executar pesquisas nas atividades de O&M, sendo que o CI faz parte do programa REMR (HARRALD et al., 2004).

A abordagem do processo CI resume-se em (HARRALD et al., 2004):

- a) dividir as instalações em subunidades;
- b) classificar a condição de cada uma das subunidades;
- c) através de inspeções no campo, medir a condição da instalação.

Índices para medir a condição das instalações recaem em uma das três classificações gerais (MARKOW et al.¹, apud HARRALD et al., 2004, p. 11):

- a) quantificação da magnitude do dano que se acumula dentro da estrutura (por exemplo: fratura, corrosão);
- b) resultados de testes não-destrutivos;
- c) desenvolvimento de índices que relacionem aspectos da condição física da instalação com características operacionais de serviço.

Andersen and Torrey's Condition Indexing Method (Método de Indexação da Condição, de Andersen e Torrey) para barragens de aterro: o Hydro-Quebec e o USACE desenvolveram um método de análise de decisão chamado *risk indexing tool* (ferramenta de indexação do risco) que une tomada de decisão baseada em condição e tomada de decisão baseada na análise de risco clássica. A base teórica desta abordagem foi desenvolvida e apresentada por Andersen and Torrey, em 1995, e

¹ MARKOW, M.J.; MCNEIL, S.; ACHARYA, D.; BROWN, M. **Network Level REMR Management System for Civil Works Structures: Concept Demonstration on Inland Waterways Locks.** USACE. Center for Construction Research and Education, Dept. of Civil Engineering, MIT, Cambridge, MA. Technical Report REMR-OM-6, Dec. 1989. 245p.

depois foi aperfeiçoada para ajudar a priorizar tarefas de manutenção, reparo e apreciação de barragens de aterro com menos de 30 metros de altura. A metodologia desenvolve um método de classificação que descreve a atual condição de barragens de aterro de uma forma uniforme, incluindo um procedimento para priorizar as atividades de O&M. A *risk indexing tool* é baseada na identificação de deficiências potenciais para a segurança da estrutura. O método não faz uma medida direta do risco e não utiliza probabilidades absolutas. *Checklists* são utilizados nas inspeções para determinar a condição física atual das estruturas. O processo resume-se em (HARRALD et al., 2004):

- a) a importância relativa das condições físicas observadas que podem levar à falha e uma simplificada análise de falha severa (*failure criticality analysis*) baseada em probabilidades condicionais de falha (*conditional probabilities of failure*) são determinadas;
- b) então, a importância relativa das mudanças das condições físicas é determinada por um especialista;
- c) a condição física e a importância relativa são combinadas para cada deficiência observada formando um *risk index* que prioriza gastos para melhorias com a premissa de que as mais significantes deficiências físicas têm preferência.

Também é apresentada pelos autores uma medida direta do risco, que classifica a barragem segundo sua importância, para ser usada em conjunto com a ferramenta de medição de condição (HARRALD et al., 2004).

A classificação é definida pela importância I da barragem do inventário (pode alcançar até 10.000 pontos) que é dada por (HARRALD et al., 2004):

$$I = V \cdot H \tag{6}$$

onde,

I: importância da barragem

V: vulnerabilidade

H: perigo potencial

A vulnerabilidade (pode alcançar até 1.000 pontos) é constituída por três fatores I_i , E_i e D_i (HARRALD et al., 2004):

$$V = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)/4 + (E_1 + E_2)/2 + (D_1 + D_2)/2 \quad (7)$$

onde,

I_1 : altura da barragem

I_2 : tipo de barragem

I_3 : tipo de fundação

I_4 : capacidade armazenada

E_1 : idade

E_2 : sismicidade

D_1 : capacidade do vertedouro

D_2 : fator de segurança do movimento de massa

Cada I_i corresponde a uma característica intrínseca à barragem e invariante no tempo. E_1 e E_2 são fatores externos e que variam no tempo. D_i são relativos às características de projeto da barragem (HARRALD et al., 2004).

O perigo potencial H possui uma pontuação de 1 a 10 e é determinado dependendo do potencial para perda de vidas, possíveis perdas econômicas, danos ambientais e interrupção de serviços essenciais (HARRALD et al., 2004).

ALMEIDA (1998) propõe uma metodologia para o cálculo de um fator que mensura a **vulnerabilidade** física, social e econômica ao acidente nos vales a jusante das barragens:

$$FV = FC \cdot AE \cdot OS \cdot SI \cdot CS \cdot NP \quad (8)$$

onde,

FV: fator de vulnerabilidade

FC: depende das características hidrodinâmicas da cheia (velocidade, profundidade)

AE: depende do tipo e eficácia do sistema de aviso e alerta

OS: índice de ocupação do solo por atividades econômicas e zonas habitacionais

SI: susceptibilidade física das estruturas ao impacto das cheias

CS: características sociológicas das populações em risco (idade e educação)

NP: número de pessoas expostas ao perigo

FONTENELLE et al. [2005?] discorrem sobre uma metodologia, para o cálculo do risco, baseada em inspeção:

$$\text{Risco} = \text{NPA} \cdot C \quad (9)$$

onde,

NPA: risco atribuído ao valor do Nível de Perigo da Anomalia, é baseado nas inspeções

C: risco atribuído a Capacidade do reservatório (hm^3)

O NPA é igual a pontuação do nível de perigo NP (quadro 9) vezes a pontuação da magnitude MG (quadro 10; $\text{NPA} = \text{NP} \cdot \text{MG}$) (FONTENELLE et al., [2005?]):

QUADRO 9 – PONTUAÇÃO DE NÍVEL DE PERIGO

Nível de Perigo	Pontuação
nenhum	0
atenção	1
alerta	3
emergência	9

FONTE - FONTENELLE et al. [2005?]

QUADRO 10 – PONTUAÇÃO DE MAGNITUDE

Magnitude	Pontuação
insignificante	1
pequena	2
média	3
grande	4

FONTE - FONTENELLE et al. [2005?]

A tabela 1 representa o critério de composição do Risco para a ponderação da Capacidade do reservatório (hm^3) e da soma dos valores de Nível de Perigo da Anomalia associado à barragem (FONTENELLE et al., [2005?]):

TABELA 1 - CRITÉRIO DE COMPOSIÇÃO DO RISCO

Capacidade (hm ³)	Nível de Perigo das Anomalias (NPA)	Risco	Capacidade (hm ³)	Nível de Perigo das Anomalias (NPA)	Risco
0-5	0-5	1,0	100 - 125	50-75	6,0
5-10	5-10	1,5	125 - 150	75-100	6,5
10-17,5	10-15	2,0	150 - 225	100-150	7,0
17,5 - 25	15-20	2,5	225 - 300	150-200	7,5
25-37,5	20-25	3,0	300 -450	200-250	8,0
37,5 - 50	25-30	3,5	450 - 600	250-300	8,5
50 - 62,5	30-35	4,0	600 - 1400	300-350	9,0
62,5 - 75	35-40	4,5	1.400 – 2.200	350-400	9,5
75 - 87,5	40-45	5,0	2.200 – 6.700	400-600	10,0
87,5 - 100	45-50	5,5			

FONTE - FONTENELLE et al. [2005?]

Por exemplo, para uma capacidade de 40 hm³ o risco atribuído é de 3,5 e para a soma dos valores de NPA igual a 80, o risco atribuído é de 6,5, logo o Risco vale 22,75.

A metodologia tem a desvantagem de considerar a capacidade do reservatório um valor fixo que não representa o nível de água do reservatório no ato da inspeção e propõe considerar o nível médio histórico do reservatório (FONTENELLE et al., [2005?]).

MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT (1999) descrevem uma metodologia de avaliação de risco para a avaliação da segurança dos reservatórios do Reino Unido, desenvolvida pela CIRIA (Construction Industry Research and Information Association – Associação de Pesquisa e Informação da Indústria da Construção), através do projeto Project RP568 (Reservoirs and Risk – Reservatórios e Risco), que, de acordo com os autores, fornece um sistema simples e fácil de ser aplicado que identifica e gerencia os riscos dos reservatórios.

A metodologia é composta por dois estágios: o *Impact Assessment* (Avaliação de Impacto) seguida de uma *Risk Assessment* (Avaliação de Risco) (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

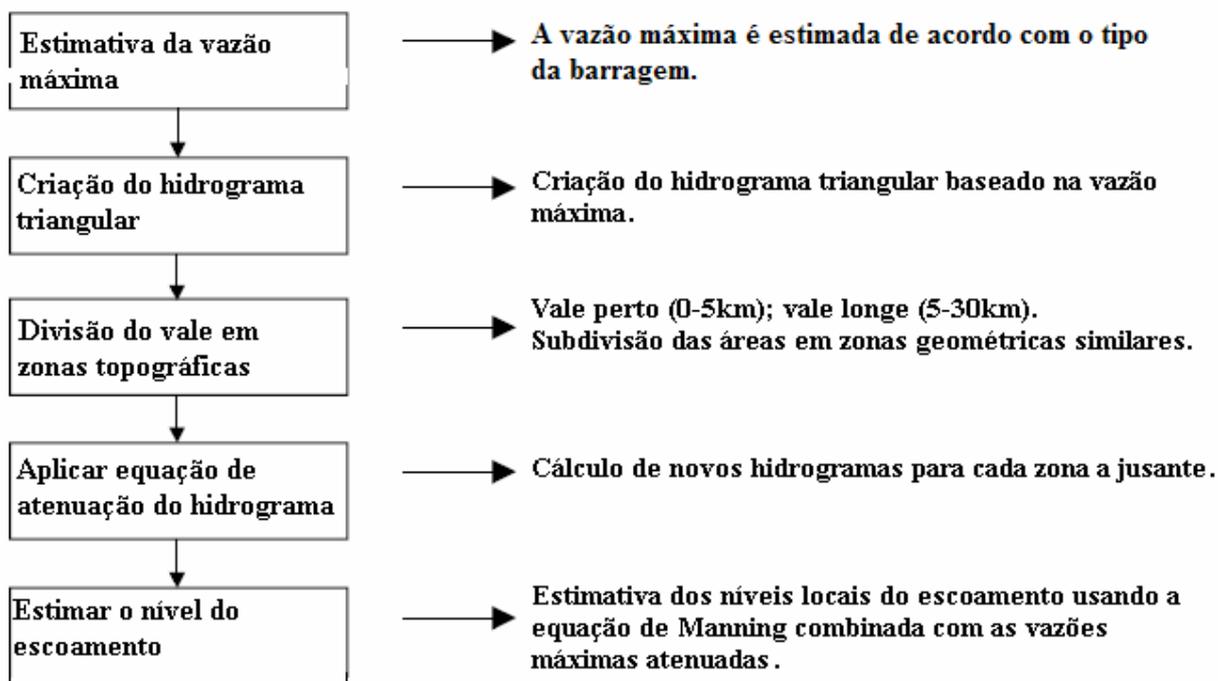
a) o *Impact Assessment* é dividido nos seguintes passos:

- coleta de informações e visita ao local;
- estimativa da vazão em caso de falha da barragem;
- estimativa dos níveis do escoamento resultante;
- avaliação dos impactos devido ao escoamento;
- combinação das pontuações do impacto em uma pontuação única.

Para a estimativa dos níveis do escoamento resultante da falha da barragem foi desenvolvido um procedimento simples e relativamente rápido de ser aplicado que não envolve modelos numéricos comumente usados para análises de *dambreak* (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999).

O procedimento resume-se na combinação de valores de vazão máxima com a Equação de Manning, esta utilizada para transformar a vazão (Q) em nível de escoamento (profundidade h); durante o procedimento também é considerada a atenuação da onda do escoamento de acordo com a distância que a zona topográfica encontra-se a jusante da barragem. Os passos do procedimento são os seguintes (figura 7) (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

FIGURA 7 – PROCEDIMENTO PARA UMA RÁPIDA ESTIMATIVA DO NÍVEL DO ESCOAMENTO DEVIDO À FALHA DA BARRAGEM



FONTE – adaptado de MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT (1999)

Segundo a figura 7, primeiramente estima-se a vazão máxima e cria-se o hidrograma triangular. Então, para a estimativa da atenuação da onda do escoamento, o vale a jusante é dividido em zonas topográficas (condições geométricas uniformes) e os efeitos da atenuação são calculados pela equação 10, baseada nas equações de Saint Venant (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

$$Q_p(x) = Q_p(0) \cdot e^{-X/La} \quad (10)$$

onde,

ponto 0: ponto localizado a montante da zona topográfica a ser calculada

ponto x: ponto localizado a jusante da zona topográfica a ser calculada

$Q_p(0)$: vazão do ponto 0, em m^3/s

$Q_p(x)$: vazão do ponto x, em m^3/s

X: distância entre o ponto 0 e o ponto x da zona topográfica atravessada, em m

Sendo que (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

$$L_a = k \cdot B^{-0,2} \cdot S_0^{1,9} \cdot n^{-1,8} \cdot Q_p(0)^{0,2} \cdot T_h^2 \quad (11)$$

onde,

k : fator que pode variar entre 1 até 10 (um valor sugerido é 2,5; pesquisas adicionais devem ser feitas para validar este valor)

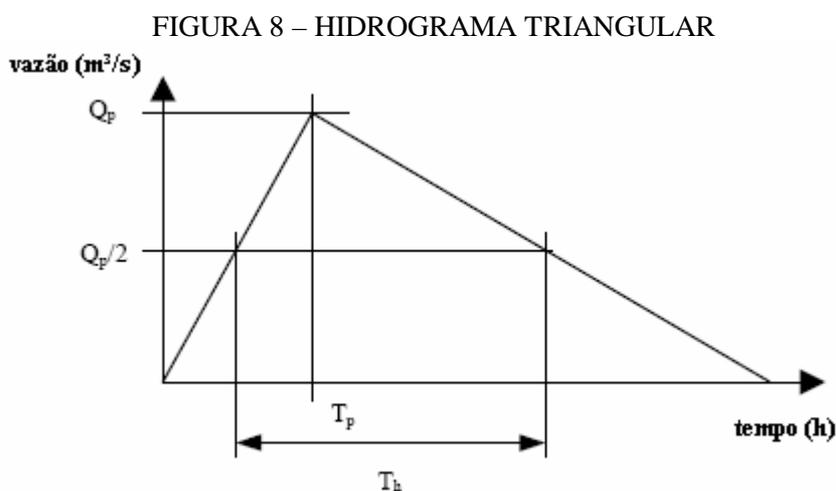
B : estimativa da área do vale pela estimativa da profundidade da água, em m

S_0 : inclinação do vale, em m/m

n : coeficiente de rugosidade de Manning

$Q_p(0)$: vazão do ponto 0, em m³/s

T_h : período de tempo para ocorrer metade da vazão máxima segundo o hidrograma triangular (figura 8):



FONTES – adaptado de MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT (1999)

Ao valor atenuado da vazão, $Q_p(x)$, pode-se calcular um novo valor de T_h , $T_h(x)$, pela equação abaixo, sendo assim, os novos valores de Q_p e T_h podem ser utilizados para o cálculo de atenuações subseqüentes (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

$$T_h(x) = T_h(0) \cdot Q_p(0) / Q_p(x) \quad (12)$$

Os níveis máximos do escoamento podem ser estimados para cada ponto aplicando-se a Equação de Manning com o valor da vazão máxima (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

$$Q_p(x) = (A^{5/3} \cdot S_o^{1/2}) / (n \cdot P^{2/3}) \quad (13)$$

onde,

$Q_p(x)$: vazão máxima no ponto calculado (m^3/s)

A: área atravessada pelo escoamento (m^2)

S_o : inclinação ao longo do vale do rio (m/m)

n: coeficiente de rugosidade de Manning

P: perímetro molhado da seção do vale (m)

Para cada ponto $x(m)$ tem-se uma vazão atenuada $Q_p(x)$, então, pode-se calcular a profundidade do escoamento implícita no perímetro molhado P e na área A (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999).

Para a avaliação dos impactos potenciais, devido ao escoamento, sete categorias de impactos são consideradas (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

- propriedades residenciais (por exemplo: moradias);
- propriedades não residenciais (por exemplo: fábricas, escolas, hospitais);
- infra-estrutura de transporte (por exemplo: estradas, rodovias, ferrovias);
- locais de recreação (por exemplo: acampamentos, lagos);
- indústrias (químicas, por exemplo);
- serviços de utilidade pública (por exemplo: energia, abastecimento de água);

– agricultura, habitats (por exemplo: plantações, locais históricos).

Cada categoria de impacto é relacionada com as condições de ruptura por meio de índices, em uma escala de 0 a 4, que são atribuídos à severidade dessas condições de ruptura (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999).

Para as quatro primeiras categorias de impactos, uma estimativa da PAR, relacionada com cada condição de ruptura, é apresentada para a consideração de perda de vidas potencial (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999).

Segue um exemplo (quadro 11) para a categoria de propriedades não residenciais (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

QUADRO 11 – IMPACTOS PARA PROPRIEDADES NÃO RESIDENCIAIS

Rompimento	Número de pessoas afetadas	Pontuação	PAR
Nenhum	0	0	0
Pequeno	0 to 150	1	150
Apreciável	150 to 500	2	500
Significante	500 to 1000	3	1000
Grande	Estimado (> 1000)	4	Estimado

FONTE – adaptado de MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT (1999)

A perda de vidas potencial é estimada pelas seguintes equações (GRAHAM¹, apud MORRIS, SAMUELS, ELLIOTT, 1999, p. 446):

$$\text{vale perto (0 – 5 km) perda de vidas potencial} = 0,5 \times \text{PAR} \quad (14)$$

$$\text{vale longe (5 – 30 km) perda de vidas potencial} = \text{PAR}^{0,6} \quad (15)$$

Conforme o quadro 12, As pontuações dos impactos são multiplicadas por pesos relativos à importância que os impactos têm entre si resultando em uma nova

¹ GRAHAM, W.J. **Estimating loss of life due to dam failure**. Eighteenth Annual USCOLD Lecture Series (Lecture series title: Managing the Risks of Dam Project Development, Safety and Operation), Buffalo, New York, 10-14 Aug. 1998.

pontuação (*score*). Então, a soma dessas pontuações e as pontuações para perda de vidas potencial são combinadas na Pontuação de Impacto do Reservatório (*Reservoir Impact Score*) (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

QUADRO 12 – EXEMPLO DE FICHA DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO

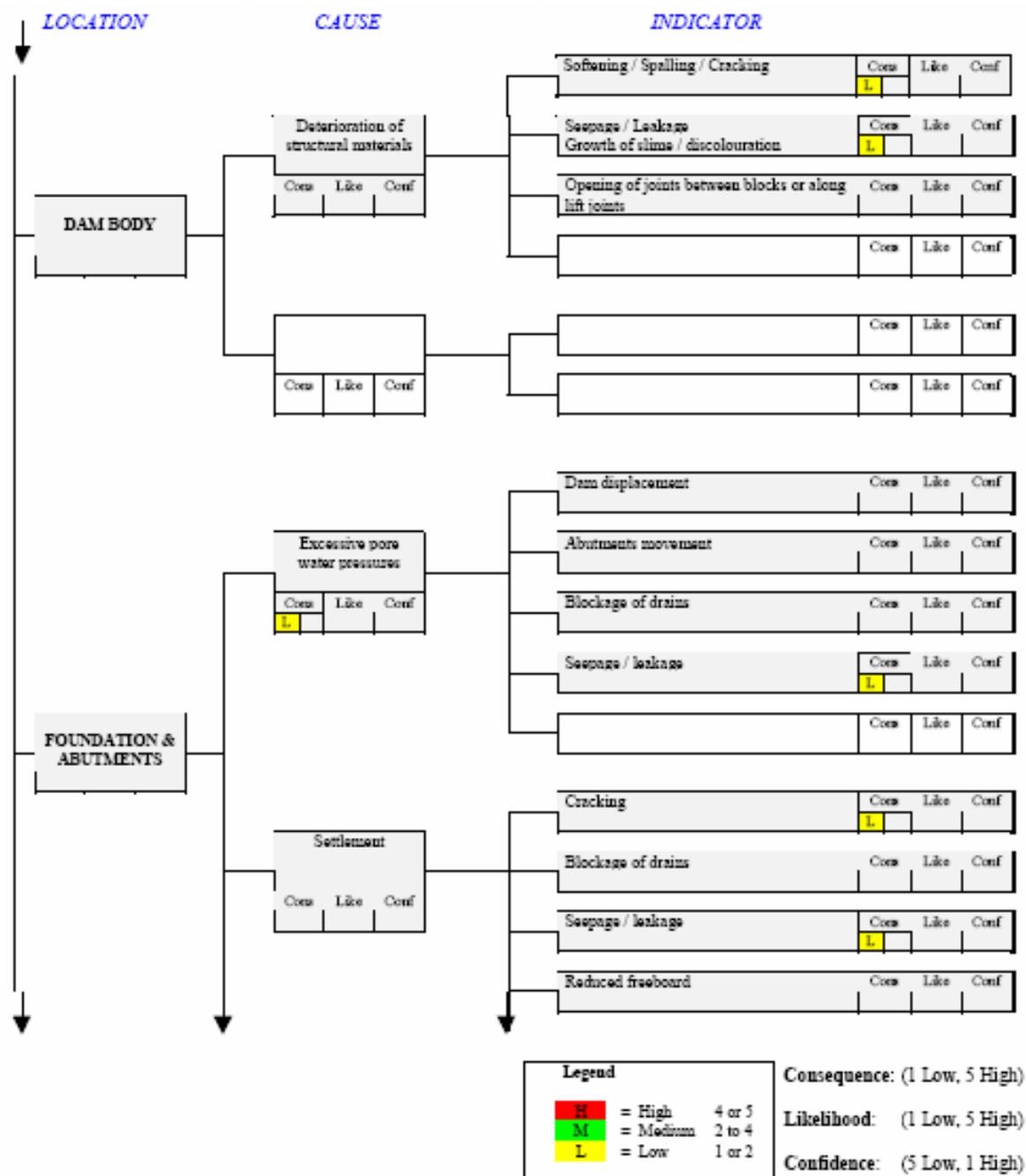
Reservoir Impact Assessment Summary Sheet		Date:																													
Site:		By:																													
NEAR VALLEY ASSESSMENT Impact 1 Residential Properties Impact 2 Non Residential Properties Impact 3 Transportation Infrastructure Impact 4 Recreational Sites Impact 5 Industrial Sites Impact 6 Utilities Impact 7 Agriculture / Habitats		IMPACT <table border="1"> <thead> <tr> <th>Impact Score (0-4)</th> <th>Weight</th> <th>Score (score x weight)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>0.15</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.15</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.10</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.05</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.25</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.25</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.05</td><td></td></tr> <tr> <td colspan="2">Total Near Valley Score¹ =</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Impact Score (0-4)	Weight	Score (score x weight)		0.15			0.15			0.10			0.05			0.25			0.25			0.05		Total Near Valley Score ¹ =			
Impact Score (0-4)	Weight	Score (score x weight)																													
	0.15																														
	0.15																														
	0.10																														
	0.05																														
	0.25																														
	0.25																														
	0.05																														
Total Near Valley Score ¹ =																															
FAR VALLEY ASSESSMENT Impact 1 Residential Properties Impact 2 Non Residential Properties Impact 3 Transportation Infrastructure Impact 4 Recreational Sites Impact 5 Industrial Sites Impact 6 Utilities Impact 7 Agriculture / Habitats		IMPACT <table border="1"> <thead> <tr> <th>Impact Score (0-4)</th> <th>Weight</th> <th>Score (score x weight)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>0.15</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.15</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.10</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.05</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.25</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.25</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.05</td><td></td></tr> <tr> <td colspan="2">Total Far Valley Score³ =</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Impact Score (0-4)	Weight	Score (score x weight)		0.15			0.15			0.10			0.05			0.25			0.25			0.05		Total Far Valley Score ³ =			
Impact Score (0-4)	Weight	Score (score x weight)																													
	0.15																														
	0.15																														
	0.10																														
	0.05																														
	0.25																														
	0.25																														
	0.05																														
Total Far Valley Score ³ =																															
		PEOPLE AT RISK PAR Value --- --- --- Total PAR = Pot loss of life ² = 0,5 x PAR																													
		PEOPLE AT RISK PAR Value --- --- --- Total PAR = Pot loss of life ⁴ = PAR ^{0,6}																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Combined Impact Score</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Score</th> <th>Factor</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Near Valley Score¹</td> <td></td> <td>100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Near Valley Pot Loss of Life²</td> <td></td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Far Valley Score³</td> <td></td> <td>30</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Far Valley Pot Loss of Life⁴</td> <td></td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Reservoir Impact Score =</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Combined Impact Score					Score	Factor	Total	Near Valley Score ¹		100		Near Valley Pot Loss of Life ²		1		Far Valley Score ³		30		Far Valley Pot Loss of Life ⁴		1		Reservoir Impact Score =			
Combined Impact Score																															
	Score	Factor	Total																												
Near Valley Score ¹		100																													
Near Valley Pot Loss of Life ²		1																													
Far Valley Score ³		30																													
Far Valley Pot Loss of Life ⁴		1																													
Reservoir Impact Score =																															

FONTE - MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT (1999)

- b) *Risk Assessment* (Avaliação do Risco): é baseada em uma abordagem do tipo FMECA em que se pode considerar os vários componentes de uma barragem (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999).

A aplicação da abordagem FMECA é estruturada em torno de um diagrama LCI (figura 9), assim chamado, pois é um diagrama cujas ramificações relacionam a **Localização L** do componente da barragem, a **Causa C** da falha e o **Indicador I** da falha (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999).

FIGURA 9 – EXEMPLO DE PARTE DE UM DIAGRAMA LCI



FONTE - MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT (1999)

As categorias de pontuação de um diagrama LCI são definidas por (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

- *consequence* (conseqüência): quão diretamente a falha deste elemento é relacionada com a parcial ou completa ruptura da barragem? (pontuação de 1 a 5: 1 baixa, 5 alta);

- *likelihood* (probabilidade): qual é a probabilidade de falha deste elemento? (pontuação de 1 a 5: 1 baixa, 5 alta);
- *confidence* (confiança): qual é a confiança dos avaliadores nas suas estimativas de conseqüência e probabilidade (levar em consideração a incerteza do conhecimento sobre a barragem e seus componentes)? (pontuação de 1 a 5: 5 baixa, 1 alta);

Para cada componente considerado o avaliador aloca as três pontuações relativas à conseqüência, à probabilidade e à confiança, sendo que existem diferentes diagramas LCI nos quais as pontuações diferem de acordo com a idade e com a altura da barragem (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999).

Após a execução do diagrama LCI, pontuações para a severidade (*criticality*) e para o risco (quadro 13) de cada componente podem ser definidas por (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999):

$$\text{pontuação de severidade} = \text{conseqüência} \cdot \text{probabilidade} \cdot \text{confiança} \quad (16)$$

$$\text{pontuação de risco} = \text{severidade} \cdot \text{impacto} \quad (17)$$

QUADRO 13 – EXEMPLO DE FICHA RESUMO DO RISCO

Risk Summary Table									
Site: Test Case #1						Date: Sept 99			
Sheet 1 of 4						By: mwm			
Element Ref.		Criticality Score	Crit. Rank	Cons. X Like.	C x S Rank	Conf. Score	Conf. Rank	Impact Score = 1,215	Risk Score (Impact x Criticality)
Location	Cause / Indicator								
Spillway and Components	Seepage / leakage	48	1	3 x 4 = 12	1	4	1	58,320	
Dam body	Internal erosion Wet patches. Springs, sinkholes	40	2	2 x 5 = 10	2	4	2	48,600	
Inlet / outlet works	Pipework damaged Seepage / leakage	30	3	2 x 5 = 10	3	3	4	36,450	
Dam body	Settlement Cracking	24	4=	2 x 3 = 6		4	3	29,160	
Dam body	Settlement Internal erosion	24	4=	4 x 2 = 8		3			
Dam body	Internal erosion Piping	24	4=	4 x 2 = 8		3			
Dam body	Settlement Seepage / leakage	18	5=	3 x 3 = 9	4	2		21,870	

FONTE - MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT (1999)

O valor da confiança, isoladamente, pode ser relacionado com a necessidade de investigações adicionais, enquanto que o produto da consequência pela probabilidade pode ser relativo a trabalhos de remediação, depende do julgamento do gerenciador do risco já na fase do *risk management* (MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT, 1999).

A partir das três últimas metodologias brasileiras, apresentadas a seguir, foram criadas Planilhas Eletrônicas de Cálculo dos indicadores de risco desenvolvidos pelos autores das metodologias. As Planilhas Eletrônicas de Cálculo encontram-se no Capítulo 4.

A primeira metodologia brasileira adotada nas Planilhas Eletrônicas de Cálculo é apresentada por MENESCAL et al. (2001) que propõem uma metodologia baseada em análise qualitativa aplicada a 35 açudes do Semi-árido sob responsabilidade da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH-CE).

A mesma metodologia é apresentada como um sistema alternativo para Avaliação do Potencial de Risco no Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, do Ministério da Integração Nacional (BRASIL, 2002).

A classificação das barragens, segundo esta metodologia, é baseada em um índice PR que significa Potencial de Risco e é calculado pela fórmula que segue (MENESCAL et al., 2001):

$$PR = (P + V)/2 \cdot I \quad (18)$$

onde,

P: Periculosidade da estrutura

V: Vulnerabilidade

I: Importância estratégica

O índice P é calculado pela soma dos índices (quadro 14) atribuídos aos seguintes critérios (MENESCAL et al., 2001):

- a) dimensão da barragem (altura e comprimento);
- b) volume total do reservatório (hm^3);
- c) tipo de barragem;
- d) tipo de fundação;
- e) vazão de projeto.

QUADRO 14 – PERICULOSIDADE P

DIMENSÃO DA BARRAGEM	VOL. TOTAL DO RESERVATÓRIO	TIPO DE BARRAGEM	TIPO DE FUNDAÇÃO	VAZÃO DE PROJETO
Altura \leq 10m Comprimento \leq 200m (1)	Pequeno $< 20\text{hm}^3$ (3)	Concreto (4)	Rocha (1)	Decamlenar (1)
Altura 10 a 20m Comprimento \leq 2000m (3)	Médio até 200hm^3 (5)	Alvenaria de pedra / Concreto rolado (6)	Rocha alterada / Saprolito (4)	Milenar (2)
Altura 20 a 50m Comprimento 200m a 3000m (6)	Regular 200 a 800hm^3 (7)	Terra / Enrocamento (8)	Solo residual / Aluvião até 4m (5)	500 anos (4)
Altura $>$ 50m Comprimento $>$ 500m (10)	Muito grande $> 800\text{hm}^3$ (10)	Terra (10)	Aluvião arenoso espesso / Solo orgânico (10)	Inferior a 500 anos ou Desconhecida (10)

FONTE - MENESCAL et al. (2001)

A Vulnerabilidade V exprime o estado de condição atual da barragem pela soma dos índices (quadro 15) atribuídos aos seguintes critérios (MENESCAL et al., 2001):

- a) tempo de operação;
- b) existência de projeto (*as built* – como construído);
- c) confiabilidade das estruturas vertedouras;
- d) tomada de água;
- e) percolação;
- f) deformações, afundamentos e assentamentos;
- g) deterioração dos taludes e paramentos;
- h) tipo de material acumulado no reservatório.

QUADRO 15 – VULNERABILIDADE V

TEMPO DE OPERAÇÃO	EXISTÊNCIA DE PROJETO	CONFIABILIDADE DAS ESTRUTURAS VERTE-DOURAS	TOMADA DE ÁGUA	PERCOLAÇÃO	DEFORMAÇÕES/ AFUNDAMENTOS ASSENTAMENTOS	DETERIORAÇÃO DOS TALUDES/ PARAMENTOS	TIPO DE MATERIAL ACUMULADO NO RESERVATÓRIO
> 30 anos (0)	Existem projetos "as built" e avaliação do Desempenho (1)	Muito Satisfatória (2)	Satisfatória Controle a montante (1)	Totalmente Controlada Pelo sistema de drenagem (1)	Inexistente (0)	Inexistente (1)	Inexistente (0)
10 a 30 anos (1)	Existem Projetos "as built" (3)	Satisfatória (3)	Satisfatória Controle a jusante (2)	Sinais de umedecimento nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras (4)	Pequenos abatimentos da crista (2)	Falhas no rip-rap e na proteção de Jusante (3)	Água (1)
5 a 10 anos (2)	Só projeto Básico (5)	Suficiente (6)	Aceitável (3)	Zonas úmidas em taludes de jusante, ombreiras, área alagada a jusante devida ao fluxo (6)	Ondulações pronunciadas, Fissuras (6)	Falha nas proteções – drenagens insuficiente e sulcos nos taludes, (7)	Água Poluída (3)
< 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 Escorregamentos – sulcos profundos de Erosão, Vegetação (10)	Resíduos Tóxicos ou Potencialmente Tóxicos (10)

FONTE - MENESCAL et al. (2001)

A Importância estratégica I é calculada pela soma dos índices (quadro 16) atribuídos aos três critérios a seguir, e depois dividida por três (MENESCAL et al., 2001):

- a) volume útil (hm^3 , volume regularizado anual a partir dos dados de operação);
- b) população a jusante;
- c) custo da barragem.

QUADRO 16 – IMPORTÂNCIA ESTRATÉGICA I

VOL. ÚTIL hm³	POPULAÇÃO A JUSANTE	CUSTO DA BARRAGEM
Grande > 800 (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
Médio 200 a 800 (1,5)	Média (2,0)	Médio (1,2)
Baixo < 200 (1)	Pequena (1,0)	Pequeno (1,0)

FONTE - MENESCAL et al. (2001)

Esta metodologia além de classificar as barragens segundo seu Potencial de Risco (quadro 17) de A (alto) até E (muito baixo), também fornece o Tipo de Inspeção (rotina, periódica, formal, especial) a ser realizada, para quais casos as anomalias observadas nas inspeções deverão ser corrigidas e também Critério indicativo para instrumentação (dispositivo obrigatório ou opcional) (MENESCAL et al., 2001).

QUADRO 17 – POTENCIAL DE RISCO PR

CLASSE	POTENCIAL DE RISCO - PR
A	> 65 (ou Vi=10) – alto
B	40 a 65 – médio
C	25 a 40 – normal
D	15 a 25 – baixo
E	< 15 – muito baixo

FONTE - MENESCAL et al. (2001)

O valor do Potencial de Risco PR corresponde à última coluna da Planilha Eletrônica de Cálculo da metodologia do indicador de risco Potencial de Risco que se encontra no Capítulo 4.

A segunda metodologia brasileira adotada nas Planilhas Eletrônicas de Cálculo foi desenvolvida por KUPERMAN et al. (2001). Esta metodologia apresenta os critérios adotados para a classificação das barragens da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) que é obtida através de valores numéricos para os seguintes parâmetros: **Periculosidade Potencial (PP)** e **Estado Real (ER)**, que, pela fórmula abaixo, resultam no **Índice de Comportamento (IC)**:

$$IC = 0,4 \cdot PP + 0,6 \cdot ER \quad (19)$$

A descrição, a seguir, dos fatores que compõem cada parâmetro é uma síntese da descrição apresentada pelos autores; alguns fatores foram descritos exatamente como explanado pelos autores, sem a citada síntese, com o intuito de não se perder o significado do fator; para aplicação da presente metodologia recomenda-se consultar a bibliografia, esta muito mais completa em detalhes, explicações e definições.

A **Periculosidade Potencial** é o somatório dos índices atribuídos aos fatores descritos no quadro 18 (KUPERMAN et al., 2001):

QUADRO 18 – CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A PERICULOSIDADE POTENCIAL PP

Importância para a Sabesp	Dimensão da barragem	Volume de água armazenada	Impacto a jusante			Tipo de barragem	Orgão vertente	Vazão de projeto
			social	ambiental	econômico			
pequena (10)	pequena (10)	baixo (5)	baixo (10)	baixo (10)	baixo (5)	concreto (15)	de superfície sem controle (15)	VMP ou 1000<Tr<10000 anos (20)
média (8)		pequeno (4)	pequeno (8)	pequeno (8)	pequeno (4)			
significativa (6)	média (6)	médio (3)	médio (6)	médio (3)	médio (3)	enrocamento (12)	de superfície com controle (10)	100<Tr<1000 anos (12)
grande (4)	grande (2)	grande (2)	grande (0)	grande (0)	grande (0)	terra (8)	de fundo (5)	Tr<100 ou desconhecido ou calculado há mais de 20 anos (2)
elevada (2)		elevado (1)						

FONTE - KUPERMAN et al. (2001)

A **importância** é classificada como (KUPERMAN et al., 2001):

- a) elevada: o não funcionamento implica em redução inaceitável da oferta de água;
- b) grande: o não funcionamento deve ser evitado implicando em custos elevados e obrigando a remanejamentos importantes para conseguir redução da oferta de água;
- c) significativa: o não funcionamento deve ser evitado implicando em custos significativos e obrigando a remanejamentos importantes para conseguir redução da oferta de água;

- d) média: o não funcionamento é possível, embora implique em custos razoáveis e em remanejamento para se conseguir redução aceitável da oferta de água;
- e) pequena: a redução da oferta é suportável sendo fácil supri-la de modo alternativo.

A dimensão da barragem é classificada segundo a altura e/ou volume do reservatório como mostra o quadro 19 (KUPERMAN et al., 2001):

QUADRO 19 – CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS SEGUNDO SUA ALTURA E/OU VOLUME DO RESERVATÓRIO

Categoria	H=altura (m)	V=volume (x 10⁶ m³)
pequenas	H < 15m	0,05 < V < 1
médias	15m < H < 30m	1 < V < 50
grandes	H > 30m	V > 50

FONTE - KUPERMAN et al. (2001)

O critério de classificação do **volume de água armazenada** (bruta) pelo reservatório foi (KUPERMAN et al., 2001):

- a) baixo: $V < 0,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3$;
- b) pequeno: $0,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3 < V < 1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$;
- c) médio: $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3 < V < 50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$;
- d) grande: $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3 < V < 100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$;
- e) elevado: $V > 100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

O **impacto a jusante** relativo à ocupação da região de jusante é subdividido de acordo com as conseqüências sociais, ambientais e econômicas (KUPERMAN et al., 2001).

O impacto **social** é caracterizado como (KUPERMAN et al., 2001):

- a) baixo: não é esperado que as populações a jusante sejam afetadas;
- b) pequeno: possibilidade de menos de 100 pessoas afetadas e/ou perda de capacidade produtiva menor que 10%;
- c) médio: possibilidade de 100 a 1000 pessoas afetadas e/ou perda da capacidade produtiva menor que 30%;
- d) grande: possibilidade de mais de 1000 pessoas afetadas e/ou perda maior que 30% da capacidade produtiva.

O impacto **ambiental** é definido pelas seguintes classes (KUPERMAN et al., 2001):

- a) baixo: área afetada inferior a 0,1km², a duração do impacto ambiental é inferior a um mês e nenhum efeito ecológico maior é esperado;
- b) pequeno: quando a área afetada é superior a 0,1km² mas inferior a 1 km², a duração do impacto varia de 1 mês a 1 ano, sendo que a inundação pode alterar a vegetação sem afetar significativamente a vida animal;
- c) médio: área afetada está entre 1 e 10km², a duração do impacto varia entre 1 a 10 anos, com várias espécies de vida animal na área afetada e os efeitos sobre o meio-ambiente sejam sensíveis;
- d) grande: área do impacto superior a 10km² e duração maior do que 10 anos com importantes efeitos ecológicos e com grandes impactos ao meio-ambiente.

As classes para caracterizar o impacto **econômico** são (KUPERMAN et al., 2001):

- a) baixo: sem danos a residências e/ou despesa com as reparações menor que R\$ 200 mil (incluindo reparos na barragem);
- b) pequeno: danificadas até 5 casas e/ou despesas entre R\$ 200 mil e R\$ 10 milhões (incluindo reparos ou reconstrução da barragem);

- c) médio: destruídas entre 6 e 49 casas ou danificadas muitas casas e/ou despesas entre R\$ 11 milhões e R\$ 50 milhões;
- d) grande: destruídas mais de 50 casas e/ou as despesas maiores do que R\$ 50 milhões.

Quanto ao **tipo de barragem**, serão considerados os materiais utilizados em sua construção (KUPERMAN et al., 2001):

- a) concreto: quando a totalidade da estrutura do barramento for constituída por barragem de concreto, seja qual for o tipo estrutural;
- b) enrocamento: quando houver maciços de enrocamento ou barragens mistas terra/enrocamento com talude de jusante em enrocamento, fazendo parte do barramento e com alturas da mesma ordem de grandeza das estruturas principais;
- c) terra: quando as estruturas principais do barramento, ou parte delas, forem constituídas por terraplenos de solo compactado.

Quanto ao tipo de órgão vertente, os autores esclarecem que ao citarem **órgão vertente**, referem-se ao dispositivo principal de descarga de cheias e não aos vertedores secundários ou auxiliares (KUPERMAN et al., 2001).

A **vazão de projeto**, que é a vazão de dimensionamento dos descarregadores de cheias, é classificada de acordo com a Vazão Máxima Provável (VMP), ou de acordo com os períodos de recorrência (Tr) recentemente verificados (KUPERMAN et al., 2001).

O **Estado Real** das barragens é o somatório dos fatores apresentados no quadro 20 (KUPERMAN et al., 2001):

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O ESTADO REAL DA BARRAGEM ER

Informações de projeto	Frequência na avaliação do comportamento	Percolação	Deformações	Nível de deterioração de paramentos ou taludes	Erosões a jusante	Condição dos equipamentos dos descarregadores
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)
				moderado (6)	moderadas (6)	
incompletas (2)	inadequada (2)	crítica (5)	críticas (5)	alto (4)	elevadas (4)	ruim (6)
inexistentes (0)	nenhuma (0)	desconhecida (0)	desconhecidas (0)	excessivo (3)	significativas (3)	inoperantes ou sem registro (3)

FONTE - KUPERMAN et al. (2001)

As **informações de projeto** são classificadas em (KUPERMAN et al., 2001):

- a) completas: quando a documentação de projeto está disponível ou acessível, embora na eventual falta da documentação original existam análises completas realizadas na fase de operação;
- b) parciais: somente parte da documentação do projeto e construção está disponível e acessível, existindo análises e estudos simplificados realizados durante a fase de operação;
- c) incompletas: parte da documentação não existe, apenas há alguns desenhos e relatórios incompletos;
- d) inexistentes: não existem documentos, análises do comportamento ou estudos sobre a barragem.

As **freqüências na avaliação do comportamento** são classificadas em (KUPERMAN et al., 2001):

- a) adequada: são realizadas inspeções rotineiras, periódicas e formais num tempo determinado, com utilização de banco de dados e emissão de relatórios e pareceres avaliando o comportamento, por meio de inspeções visíveis e instrumentação;

- b) razoável: são realizadas inspeções rotineiras e periódicas num tempo determinado e utilizado banco de dados sem a emissão de relatórios sobre as análises de comportamento por inspeção ou por instrumentação; última inspeção formal realizada há cinco anos;
- c) inadequada: quando as inspeções periódicas não seguem as frequências determinadas ou não são preenchidas as planilhas de inspeção nem são realizadas análises de comportamento; última inspeção formal realizada a mais de cinco anos;
- d) nenhuma: não são realizadas inspeções rotineiras ou periódicas; última inspeção formal realizada há mais de cinco anos.

Os autores esclarecem que inspeção rotineira é aquela que é executada por técnicos da operação, sendo que a visita a todas as partes da barragem é realizada, pelo menos, semanalmente. A inspeção periódica corresponde aquela que é efetuada por engenheiros ligados à área civil, na periodicidade pré-determinada. Já a inspeção formal é realizada por equipe multidisciplinar de especialistas, inicialmente a cada três anos podendo passar a ser feita a cada cinco anos para estruturas com índice de comportamento normal (KUPERMAN et al., 2001).

Quanto à **percolação** pelo corpo da barragem, pelas ombreiras e pelas fundações a classificação é feita da seguinte forma (KUPERMAN et al., 2001):

- a) conforme prevista 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;
- b) fora do previsto, mas não crítica: 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;
- c) crítica: constatadas anormalidades na distribuição das pressões ou das vazões, com implicações importantes para a segurança da unidade;
- d) desconhecida: nada se conhece acerca do acompanhamento da percolação.

As **deformações** são classificadas como foi classificada a percolação (KUPERMAN et al., 2001).

Classificação do **nível de deterioração de paramentos ou taludes**(KUPERMAN et al., 2001):

- a) mínimo ou inexistente: quando não houver degradação visível a olho nu dos materiais de proteção;
- b) baixo: quando não houver indícios importantes que denotem a degradação dos materiais de proteção;
- c) moderado: há evidentes indícios de degradação;
- d) alto: em áreas extensas os níveis de degradação dos materiais são grandes;
- e) excessivo: quando em áreas extensas os níveis de degradação dos materiais são muito elevados.

Quanto à presença de **erosões a jusante** a classificação é (KUPERMAN et al., 2001):

- a) mínimas ou inexistentes: se não ocorrem erosões visíveis, a olho nu, em nenhum ponto a jusante. As margens do rio imediatamente a jusante encontram-se em perfeitas condições;
- b) poucas: se ocorrem pontos localizados erodidos, principalmente nas margens, não havendo perigo de solapamento ou instabilização de quaisquer estruturas da barragem ou das vizinhanças, tais como estradas de acesso ou das margens do rio;
- c) moderadas: se ocorrem pontos localizados erodidos, entretanto não há perigo imediato de solapamento ou instabilização de quaisquer estruturas importantes para a barragem;
- d) elevadas: se ocorrem erosões em grandes áreas, susceptíveis de solapar e instabilizar estruturas da barragem ou provocar danos a terceiros;
- e) significativas: ocorrem erosões importantes em grandes áreas, susceptíveis de solapar e instabilizar estruturas da barragem ou provocar danos a terceiros. São necessárias intervenções imediatas para evitar acidentes.

Para efeitos de classificação, a **condição dos equipamentos dos descarregadores** pode ser (KUPERMAN et al., 2001):

- a) boa: operantes e em perfeito estado de conservação;
- b) razoável: se operantes, mas seu estado de conservação deixa a desejar, não sendo realizados testes periódicos nem manutenção preventiva; operados pela última vez há mais de um ano;
- c) ruim: se não foram operados nos últimos dois anos, encontrando-se sinais de deterioração e sem execução de manutenção preventiva;
- d) inoperantes ou sem registro: equipamentos inativos e não há registro de quando foram testados pela última vez.

Finalmente, segundo o valor do **Índice de Comportamento** (correspondente à última coluna da Planilha Eletrônica de Cálculo da metodologia do indicador de risco Índice de Comportamento que se encontra no Capítulo 4), cada barragem poderá ser classificada nas seguintes situações (KUPERMAN et al., 2001):

- a) $IC > 70$, 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;
- b) $70 > IC > 60$, atenção: há alguns defeitos que não comprometem o desempenho da unidade; as anomalias ou restrições existentes 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 o índice de comportamento da unidade. Não há, ainda, necessidade de priorizar eventuais intervenções corretivas;
- c) $60 > IC > 50$, alerta: existem anomalias que podem representar eventual risco à segurança da barragem e/ou à operação do sistema. Há necessidade de uma avaliação detalhada da real situação da barragem, reavaliação do índice de comportamento e estudo de alternativas para reparos. Devem ser tomadas providências para eliminação ou controle do problema;
- d) $IC < 50$, emergência: 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 apresentado a situação pode ficar fora de controle e haver risco de ruptura iminente, dependendo da operação do sistema. Pode haver

necessidade de rebaixamento imediato do reservatório, eventualmente de abandono do local e de acionamento de um plano de ação emergencial.

Os autores afirmam que a metodologia aqui descrita auxilia a Sabesp quanto a questões de manutenção e de segurança das barragens de maneira técnica e econômica (KUPERMAN et al., 2001).

A terceira metodologia brasileira adotada nas Planilhas Eletrônicas de Cálculo é a proposta por FUSARO (2003), aplicada em 51 barragens sob responsabilidade da Companhia de Energia de Minas Gerais (Cemig), baseada em análise qualitativa e tem seu enfoque no grau de deterioração das estruturas que é mensurado por uma adaptação do Método GUT (Gravidade, Urgência, Tendência) utilizado na Qualidade Total que prioriza a manutenção das estruturas.

A fórmula que resume a presente metodologia é apresentada abaixo (FUSARO, 2003):

$$\text{Risco} = (P + V) \cdot C \quad (20)$$

onde,

P: Potencial de risco;

V: Vulnerabilidade;

C: Conseqüência

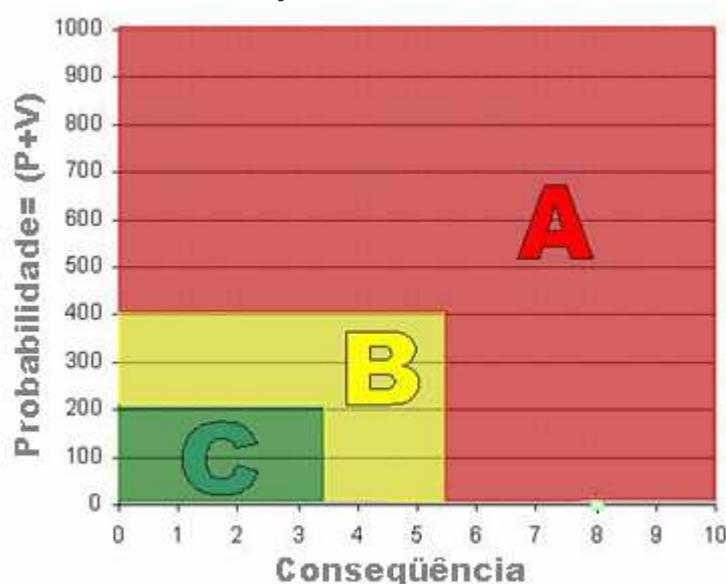
O Potencial de risco P é igual ao somatório dos índices atribuídos quanto ao tipo de barragem, tipo de fundação e idade da barragem (FUSARO, 2003).

A Vulnerabilidade V é calculada pela soma de índices relativos à adequação dos itens aos critérios de projeto atuais e relativos à condição atual das estruturas (grau de deterioração) (FUSARO, 2003).

A Conseqüência C atribui índices relativos à capacidade de geração, volume do reservatório e risco a jusante (FUSARO, 2003).

Ao final da metodologia, as barragens podem ser classificadas em A, B ou C (de acordo com a última linha da Planilha Eletrônica de Cálculo da metodologia do indicador de risco Risco encontrada no Capítulo 4) e plotadas em um gráfico com a Conseqüência C no eixo das abscissas e a probabilidade (P + V) no eixo das ordenadas, como mostra a figura 10 (FUSARO, 2003):

FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DAS BARRAGENS



FONTE - FUSARO (2003)

Segue um detalhamento da aplicação da metodologia (FUSARO, 2003):

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \cdot \text{Conseqüência (C)} \quad (21)$$

$$\text{Probabilidade} = \text{Potencial de risco (P)} + \text{Vulnerabilidade (V)} \quad (22)$$

Potencial de risco P é um parâmetro constante que depende da estrutura (FUSARO, 2003):

$$P = P_B + P_F + P_I \quad (23)$$

onde,

P_I : se a idade for menor que 10 anos, então $P_I = 100$, senão:

$$P_I = 8988,9 \cdot \text{idade}^{-1,9544} \quad (24)$$

P_B e P_F recebem índices de acordo com o quadro 21 (FUSARO, 2003):

QUADRO 21 – ÍNDICES DE P_B E P_F

Tipo de Barragem (P_B)	Tipo de Fundação (P_F)
concreto 20	rocha sã 10
CCR 40	rocha tratada 30
enrocamento 80	solo/aluvião tratado 80
terra 100	solo/aluvião 100

FONTE - FUSARO (2003)

Vulnerabilidade V é um parâmetro variável que depende da conservação da estrutura (FUSARO, 2003):

$$V = V_P + V_M \quad (25)$$

onde,

V_P : adequação aos critérios de projeto atuais

$$V_P = \Sigma (A_n \cdot PV_{Pn}) \quad (26)$$

A_n : adequação do item ao critério de projeto atual (quadro 22)

PV_{Pn} : peso do item a ser avaliado (quadro 23)

V_M : condição atual das estruturas determinada pela deterioração

$$V_M = \Sigma (D_G \cdot D_U) \quad (27)$$

D_G : gravidade da deterioração (quadro 24)

D_U : urgência com que a ação corretiva deve ser implementada (quadro 24)

QUADRO 22 – ADEQUAÇÃO DO ITEM AO CRITÉRIO DE PROJETO ATUAL A_n

A_n	Descrição
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 - FUSARO (2003)

QUADRO 23 – PESO DO ITEM A SER AVALIADO PV_{P_n}

PV_{P_n}	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
	Estruturas de Concreto (barragem e circuito hidráulico de geração)
5	Borda livre da estrutura
5	Estabilidade Global (deslizamento estrutura/fundação, tombamento, flutuação, tensões, vibrações)
5	Tratamentos de fundação adequados
	Extravasores
50	Vazão de projeto dos órgãos extravasores
5	Estabilidade Global (deslizamento estrutura/fundação, tombamento, flutuação, tensões, vibrações)
5	Tratamentos de fundação adequados
2	Regras operativas
1	Treinamento operador / barrageiro
2	Condição de operação dos órgãos extravasores

FONTE - FUSARO (2003)

QUADRO 24 – ÍNDICE DE GRAVIDADE D_G E DE URGÊNCIA D_U

GRAVIDADE		URGÊNCIA	
A deterioração, no grau em que se apresenta, ...		Esta deterioração requer ...	
50	afeta gravemente a segurança global do barramento	2,0	ação Imediata
20	afeta significativamente a segurança global do barramento		
10	afeta em menor grau a segurança global do barramento	1,5	ação programável para o próximo ciclo
6	afeta indiretamente a segurança global do barramento	1,0	acompanhamento periódico / monitoramento
5	afeta 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		
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 - FUSARO (2003)

A Conseqüência C é calculada pela fórmula a seguir (FUSARO, 2003):

$$C = C_G + C_R + C_J \quad (28)$$

onde,

C_G : capacidade de geração depende do custo de reconstrução e das perdas pela falta de geração (quadro 25)

C_R : volume do reservatório depende da capacidade de inundação e da destruição a jusante (quadro 25)

C_J : risco a jusante depende do tipo de ocupação a jusante (quadro 25)

QUADRO 25 – ÍNDICES PARA O CÁLCULO DA CONSEQÜÊNCIA C

GERAÇÃO (MW) C_G	VOLUME DO RESERVATÓRIO (hm ³) C_R	DANOS A JUSANTE C_J
$0 \leq x < 30$ 0	$0 \leq x < 5$ 0	Danos econômicos, sociais e ambientais mínimos / Nenhuma perda de vida humana 1
$30 \leq x < 250$ 1	$5 \leq x < 50$ 1	Danos econômicos, sociais e ambientais moderados 2
$250 < x < 500$ 2	$50 < x < 500$ 2	
$x \geq 500$ 3	$500 \leq x < 5000$ 3	Danos econômicos, sociais e ambientais elevados/excessivo 3
	$x \geq 5000$ 4	

FONTE - FUSARO (2003)

3.5.2.1 Árvores de eventos

SILVEIRA (1999) afirma que as análises de risco fundamentam-se essencialmente em árvores de eventos, pois estas simulam os meios mais prováveis de ruptura em potencial das barragens e as estimativas das probabilidades de ocorrência dos eventos.

O risco (probabilidade de carga . probabilidade de reação . conseqüência) é calculado em cada patamar ou ramificação da árvore de eventos. O risco total é a soma de todos os patamares ou ramificações (CYGANIEWICZ e SMART, 2000; USBR, 2003a).

Segundo CYGANIEWICZ e SMART (2000), árvores de eventos para cada modo de falha potencial são usadas para representar seqüências de eventos que podem resultar em conseqüências adversas quando a barragem ou parte da estrutura reagem a várias condições de carga (estática, hidrológica ou sísmica). Cada nó da representação gráfica da árvore resulta na possibilidade ou não do evento ocorrer.

Algumas técnicas de detalhamento da construção de árvore de eventos (CYGANIEWICZ e SMART, 2000):

- a) construir uma árvore para cada tipo de carga e uma árvore para cada variação desta mesma carga, mesmo que implique em árvores similares ou idênticas, pois assim, o processo fica melhor organizado;
- b) não há necessidade de dar seqüência a eventos que não resultam em liberação incontrolada do reservatório;
- c) identificar os elementos que podem ser expandidos e os que podem ser eliminados;
- d) limitar o número de variações de carga para os eventos iniciais.

É importante limitar os valores das cargas dos eventos iniciadores para que realmente resultem em reações estruturais e conseqüências significantes. O certo é iniciar com dois níveis de carga, um em que nenhum dano estrutural ou conseqüência adversa são esperados e outro em que uma falha estrutural certamente ocorrerá. Então, entre esses dois inícios, estará a variação da carga que poderá resultar em danos estruturais e conseqüências adversas (CYGANIEWICZ e SMART, 2000).

De acordo com CYGANIEWICZ e SMART (2000), ao final de uma análise de risco, pelo método da árvore de eventos, as seguintes questões devem ser respondidas:

- a) Quais modos de falha contribuem para um maior risco?
- b) Quais incertezas existem na estimativa do risco?
- c) Quais informações adicionais podem reduzir as incertezas?
- d) Quais conseqüências podem ser razoavelmente esperadas como resultado de todas as informações?
- e) Como poderia o risco ser afetado por cada uma dessas conseqüências?
- f) Quais são as alternativas de ações razoáveis?

3.6 PANORAMA INTERNACIONAL

KUPERMAN et al. (2001) afirmam que não existia e ainda não existe, a nível mundial, sistemática que permita quantificar as diversas características de cada barragem, incluindo seu comportamento ao longo do tempo.

MCGRATH (2000) apresenta estudo de como é realizada a avaliação de risco no Reino Unido, na França, nos Países Baixos, na Noruega, na Suécia, nos Estados Unidos e no Canadá.

No estudo de MCGRATH (2000), é citado que a segurança de barragens nos países pesquisados é alcançada principalmente pela aplicação de métodos padronizados (*standards based approach*), mas também é percebido que as técnicas de análise de risco estão sendo bastante difundidas e assim complementando as práticas normais de segurança de barragens.

A seguir, é apresentada uma rápida exposição da aplicação da análise de risco em alguns países.

3.6.1 Estados Unidos

Segundo MCGRATH (2000), o USBR, que possui sob sua responsabilidade 350 barragens, utiliza QRA como uma ferramenta de decisão, o USACE, com 569 barragens, está experimentando QRA, enquanto a FERC e a maioria dos estados aplica *standards based approach*.

Quanto a critérios de risco, o Bureau e os estados de Washington e Montana são os únicos a utilizar *societal risk criteria* como parte integrante de seus programas de segurança de barragens (MCGRATH, 2000).

3.6.1.1 Métodos de análise de risco

SILVEIRA (1999) apresenta os métodos de análise de risco utilizados nos Estados Unidos:

- a) método de análise de risco Stanford/FEMA: método que, após identificar os possíveis modos de ruptura, utiliza probabilidades de ruptura obtidas a partir de dados históricos. Ao final da aplicação do método, possui-se uma classificação das barragens baseada na unidade de custo para um incremento de benefício, pois considera o custo das alternativas mitigadoras disponíveis e o nível adicional de segurança obtido com elas;
- b) método de análise de risco baseado em índice básico: é um tipo de avaliação preliminar do risco aplicada a um grande número de barragens visando classificá-las ou estabelecer prioridades entre elas. O autor apresenta duas variantes do método: um é o método Hagen usado pelo USACE, e o outro é o *Safety Evaluation of Existing Dams – SEED* (Apreciação da Segurança de Barragens Existentes) usado pelo Bureau:

– Método de Hagen

Utiliza parâmetros que assumem valores inteiros de 1 a 5, sendo 1 a situação mais favorável e 5 a situação menos favorável.

O índice relativo de risco é calculado por:

$$R_r = O_t + S_t \quad (29)$$

onde,

$$O_t = O_1 + O_2 + O_3: \text{valor de ruptura por galgamento} \quad (30)$$

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3: \text{valor de ruptura estrutural} \quad (31)$$

O_1 : número de casas danificadas pela ruptura (nível de água no topo da barragem)

O_2 : capacidade de descarga da barragem em porcentagem da capacidade de descarga da cheia máxima provável

O_3 : capacidade de resistir à ruptura por galgamento

S₁: número de casas danificadas pela ruptura (nível d'água no nível máximo normal)

S₂: evidência de distensões estruturais

S₃: atividade sísmica em potencial do local

– *Safety Evaluation of Existing Dams (SEED)*

É levantado um Fator Local (*Site Rating - SR*) que resulta da soma de fatores, de uma escala de 1 a 9, atribuídos às condições da barragem e aos danos em potencial. Para tanto, é realizada uma revisão dos dados disponíveis sobre a barragem e dos dados obtidos nas inspeções de campo.

c) método de análise de risco do USBR

Os procedimentos do método são apresentados no *Guidelines to Decision Analysis* (USBR¹, apud SILVEIRA, 1999, p.16). Utilizado para barragens que apresentam os maiores riscos em potencial, o método fornece, ao final de sua aplicação, o custo do risco anual total para a estrutura, pois computa os custos envolvidos com as obras de recuperação diretamente na análise, facilitando as decisões relativas à aplicação dos recursos disponíveis para segurança.

3.6.2 Canadá

No Canadá, a British Columbia Hydro (BC Hydro), empresa do setor de energia elétrica, realiza uma revisão periódica de cada barragem, a cada seis anos, denominada *Comprehensive Inspection and Review*, se os resultados não forem satisfatórios, então uma análise de risco é aplicada (SILVEIRA, 1999).

¹ USBR **Guidelines to Decision Analysis**. ACER Technical Memorandum n° 7, USBR, Denver, Colorado, 1986.

Segundo MCGRATH (2000), o BC Hydro utiliza FMEA, FMECA e QRA como suporte ao seu programa de segurança de barragens. Utiliza o FMEA por ser uma base sólida para análises de risco qualitativas e semi-quantitativas e o FMECA por ser uma base sólida para ações de priorização e de remediação.

3.6.3 Noruega

Na Noruega, a maioria das barragens é de enrocamento com núcleo de moraina, logo a maior parte dos incidentes são causados por infiltrações devido a erosão interna. O potencial da análise de risco probabilística foi reconhecido a partir de 1995 quando de sua utilização por diversas empresas (SILVEIRA, 1999).

Segundo MCGRATH (2000), vários tipos de QRA estão sendo experimentados. As barragens sujeitas à regulamentação do país, também são classificadas quanto ao perigo que oferecem às casas residenciais segundo mapas de inundação levantados pelos donos das barragens:

- a) classe 1 – perigo alto: mais do que 20 casas residenciais são afetadas (260 barragens);
- b) classe 2 – perigo significativo: entre 1 e 20 casas atingidas (540 barragens);
- c) classe 3 – perigo baixo: nenhuma casa é afetada (1700 barragens).

3.6.4 Reino Unido

Segundo MCGRATH (2000), alguns donos de barragens usam FMEA, às vezes incluindo FMECA, esta entendida como tendo base semi-quantitativa, sem a utilização de probabilidades de falha especificamente, isto pela dificuldade de avaliar probabilidades de falha confiáveis. É aplicado neste país o conceito ALARP: o dono da barragem tem de provar que as medições do risco apresentam uma grande desproporção entre o esforço para reduzir riscos adicionais (alto) e a redução do risco que seria realizada com este esforço (baixo).

Segundo MORRIS, SAMUELS e ELLIOTT (1999), as barragens do Reino Unido estão sujeitas a inspeções de segurança regulares como requerido pelo *Reservoirs Act* de 1975. Desde a introdução da legislação de segurança de reservatórios, em 1930, nenhuma morte ocorreu como consequência de uma ruptura de barragem. Também afirmam que a abordagem FMECA é aplicada com sucesso nos reservatórios deste país.

3.6.5 França

Segundo MCGRATH (2000), experimenta várias metodologias, mas o cenário regulador atual utiliza *standards based approach*. Não utiliza QRA, mas alguns donos de barragens aplicam FMECA. Neste país, o *risk assessment* é o processo pelo qual se verifica se a barragem satisfaz aos padrões definidos pelos regulamentos, não resultando em um risco zero, mas num risco residual suficientemente baixo para ser negligenciado. Os levantamentos por instrumentação têm alta prioridade no território francês.

3.6.6 Países Baixos

A região dos Países Baixos tem um quarto de sua área abaixo do nível do mar, por isso é protegida por um sistema de diques. Sendo assim, a idéia de segurança do *risk assessment* está focada no risco de escoamentos em termos de probabilidade de vazões e consequências, onde o objetivo é considerar todos os fatores, inclusive, a integridade dos diques, para, então, determinar estratégias de redução do risco. Nestes países, técnicas de QRA estão sendo desenvolvidas, enquanto que padrões foram inseridos na legislação através do *Flood Protection Act* (MCGRATH, 2000).

3.6.7 Suécia

Segundo MCGRATH (2000), são utilizadas tanto análises do tipo QRA quanto FMECA para avaliar qual das metodologias é mais apropriada. O governo declarou que os donos de barragens são totalmente responsáveis pela segurança de

suas estruturas e pelas conseqüências de uma falha, logo os proprietários têm suas próprias normas.

3.6.8 Austrália

Segundo MCGRATH (2000), várias formas de *risk assessment* são utilizadas para uma melhor compreensão da segurança de barragens.

3.6.9 Portugal

Segundo RAMOS e MELO (1994), Portugal tem o valor de escoamento global *per capita* dos mais elevados no âmbito dos países da Comunidade Européia. Em 1990, entrou em vigor neste país o Regulamento de Segurança de Barragens, DL N°11/90, o qual estabelece um conjunto de disposições que visam a definição das formas de controle de segurança das barragens nas fases de projeto, construção, primeiro enchimento, exploração, abandono e demolição, contemplando observação e estabelecimento de medidas de proteção civil.

4 PLANILHAS ELETRÔNICAS DE CÁLCULO DOS INDICADORES DE RISCO

Tendo em vista o conteúdo apresentado na Revisão Bibliográfica, entre os métodos, metodologias e ferramentas de análise de risco pesquisados, destacaram-se três metodologias por serem mais completas e abrangentes quanto aos fatores analisados que influenciam na segurança de uma barragem: a proposta para obter uma classificação das barragens sob responsabilidade da COGERH (MENESCAL et al., 2001), a desenvolvida para a Sabesp (KUPERMAN et al., 2001) e a utilizada para a classificação e para o gerenciamento da segurança das barragens operadas e mantidas pela Cemig (FUSARO, 2003).

Cada uma das três metodologias citadas, descritas mais detalhadamente no subitem 3.5.2, apresenta uma forma de mensurar o valor do risco por meio de diferentes indicadores: o **Potencial de Risco** proposto por MENESCAL et al. (2001), o **Índice de Comportamento** proposto por KUPERMAN et al. (2001) e o **Risco** proposto por FUSARO (2003).

Com base nas três metodologias, propõem-se as planilhas eletrônicas de cálculo dos indicadores de risco:

O **Potencial de Risco** PR classifica as barragens de A (alto) até E (muito baixo) e é calculado pela fórmula que segue (MENESCAL et al., 2001):

$$PR = (P + V)/2 \cdot I \quad (18)$$

O índice P é a Periculosidade da estrutura que depende da dimensão da barragem, do volume total do reservatório, do tipo de barragem, do tipo de fundação e da vazão de projeto (MENESCAL et al., 2001).

O índice V é a Vulnerabilidade que depende do tempo de operação, da existência de projeto, da confiabilidade das estruturas vertedoras, da tomada de água, da percolação, das deformações, afundamentos e assentamentos, da deterioração dos

taludes e paramentos, e do tipo de material acumulado no reservatório (MENESCAL et al., 2001).

O índice I é a Importância estratégica que depende do volume útil, da população a jusante e do custo da barragem (MENESCAL et al., 2001).

AS BUILT	Confiabilidade Vertedouros	Tomada d'água	Percolação	deformações afundamentos assentamentos	deterioração taludes/paramentos	tipo material acumulado no reservatório	V	volume útil (hm³)	i volume útil	população jusante	custo barragem	I	Potencial de Risco PR		
													valor PR	definição	classe
							3	1				0,33	2,83	muito baixo	E

VULNERABILIDADE

0 inexistentes
 1 água
 3 água poluída
 10 resíduos tóxicos ou potencialmente tóxicos

IMPORTÂNCIA ESTRATÉGICA

2,5 grande
 2,0 média
 1,0 pequena

1,5 elevado
 1,2 médio
 1,0 pequeno

2 muito satisfatória
 3 satisfatória
 6 suficiente
 10 não satisfatório

1 satisfatória, controle a montante
 2 satisfatória, controle a jusante
 3 aceitável
 5 deficiente

1 inexistente
 3 falhas no rip-rap e na proteção de jusante
 7 falha nas proteções - drenagem insuficiente e sulcos nos taludes
 10 depressão no rip-rap escorregamentos - sulcos profundos de erosão, vegetação

1 existem projetos "as built" e avaliação do desempenho
 3 existem projetos "as built"
 5 só projeto básico
 7 não existe projeto

0 inexistentes
 2 pequenos abatimentos da crista
 6 ondulações pronunciadas, fissuras
 10 depressão na crista - afundamentos nos taludes, ou na fundação/ trincas

1 totalmente controlada pelo sistema de drenagem
 4 sinais de umedecimento nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras
 6 zonas úmidas em taludes de jusante, ombreiras, área algada a jusante devida ao fluxo
 10 surgência de água em taludes, ombreiras e área de jusante

O **Índice de Comportamento** IC, que classifica as barragens desde uma situação de normalidade (IC >70) até uma situação de emergência (IC <50), é calculado pela fórmula abaixo (KUPERMAN et al., 2001):

$$IC = 0,4 \cdot PP + 0,6 \cdot ER \quad (19)$$

O parâmetro PP é a Periculosidade Potencial que depende da importância da barragem para a Sabesp, da dimensão da barragem, do volume de água armazenada, do impacto social, ambiental e econômico a jusante, do tipo de barragem, do órgão vertente e da vazão de projeto (KUPERMAN et al., 2001).

O parâmetro ER é o Estado Real que depende das informações de projeto, da frequência na avaliação do comportamento, da percolação, das deformações, do nível de deterioração de paramentos ou taludes, das erosões a jusante e da condição dos equipamentos descarregadores (KUPERMAN et al., 2001).

METODOLOGIA INDICADOR DE RISCO: Índice de Comportamento IC													
BARRAGEM			importância	altura (m)	i altura	volume reservatório (hm³)	i volume reservatório	i dimensão	volume armazenado (hm³)	i volume armazenado	Impacto a Jusante		
Nº	Nome	Localização									social	ambiental	econômico
1				10			volume não definido pela metodologia	10		5			

digitar dados
cálculo automático (não digitar)
digitar dados de acordo com o comentário
pontuação parcial (não digitar)
pontuação total (não digitar)

10 pequena
8 média
6 significativa
4 grande
2 elevada

10 baixo
8 pequeno
6 médio
0 grande

10 baixo
8 pequeno
3 médio
0 grande

5 baixo
4 pequeno
3 médio
0 grande

tipo barragem	orgão vertente	vazão de projeto	PP	Informações de projeto	Frequência na avaliação do comportamento	Percolação	Deformações	Nível de deterioração de parâmetros/taludes	Erosões a jusante	Condição dos equipamentos dos descarregadores	ER	Índice de Comportamento IC	
												valor IC	definição
			15								0	6	emergência

15 concreto
12 enrocamento
8 terra

5 completas
4 parciais
2 incompletas
0 inexistente

10 adequada
6 razoável
2 inadequada
0 nenhuma

15 mínimo ou inexistente
12 baixo
6 moderado
4 alto
3 excessivo

15 boa
8 razoável
6 ruim
3 inoperantes ou sem registro

20 conforme previstas em projeto ou inexistentes
15 fora do previsto, mas não críticas
5 críticas
0 desconhecidas

20 conforme prevista em projeto ou inexistente
15 fora do previsto, mas não crítica
5 críticas
0 desconhecida

15 de superfície sem controle
10 de superfície com controle
5 de fundo

20 VMP ou $1000 < Tr < 10000$ anos
12 $100 < Tr < 1000$ anos
2 $Tr < 100$ ou desconhecido ou calculado há mais de 20 anos

PERICULOSIDADE POTENCIAL

ESTADO REAL

A fórmula do **Risco**, que classifica as barragens em A, B ou C, é apresentada a seguir (FUSARO, 2003):

$$\text{Risco} = (P + V) \cdot C \quad (20)$$

O Potencial de risco P depende do tipo de barragem, do tipo de fundação e da idade da barragem (FUSARO, 2003).

A Vulnerabilidade V depende da adequação dos itens da barragem aos critérios de projeto atuais e da condição atual das estruturas (grau de deterioração) (FUSARO, 2003).

A Conseqüência C depende da capacidade de geração, do volume do reservatório e do risco oferecido a jusante (FUSARO, 2003).

METODOLOGIA INDICADOR DE RISCO: Risco		
Barragem	Nº	1
	Nome	
	Localização	
Tipo de barragem P _B		
Tipo de fundação P _F		
Idade (anos)		
P _I		100
Potencial de risco P		100
Estruturas de Terra	Borda livre da estrutura	
	Estabilidade ao escorregamento dos taludes montante/jusante e fundação	
	Dimensionamento do sistema de drenagem e transições do maciço de terra	
	Tratamento de fundação adequado	
V _P Estruturas de Terra		0
Estruturas de Concreto (barragem e circuito hidráulico de geração)	Borda livre da estrutura	
	Estabilidade Global (deslizamento estrutura/fundação, tombamento, flutuação, tensões, vibrações)	
	Tratamentos de fundação adequados	
V _P Estruturas de Concreto		0
Extravasores	Vazão de projeto dos órgãos extravasores	
	Estabilidade Global (deslizamento estrutura/fundação, tombamento, flutuação, tensões, vibrações)	
	Tratamentos de fundação adequados	
	Regras operativas	
	Treinamento operador / barrageiro	
	Condição de operação dos órgãos extravasores	
V _P Extravasores		0
Adequação aos critérios de projeto atuais V _P		0

20 concreto
40 CCR
80 enrocamento
100 terra

10 rocha sã
30 rocha tratada
80 solo/aluvião tratado
100 solo/aluvião

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

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

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

Encontra-se no Apêndice 1 deste trabalho uma apresentação resumo da análise de risco e das três metodologias, no Apêndice 2 a listagem das fórmulas das planilhas eletrônicas de cálculo dos indicadores de risco e, no Apêndice 3, um CD contendo o arquivo digital das planilhas eletrônicas de cálculo criadas.

As planilhas eletrônicas de cálculo desenvolvidas foram testadas para os valores limites das metodologias, estando prontas para receber dados reais.

5 CONCLUSÕES

Tendo como base os métodos, as metodologias e as ferramentas de análise de risco apresentados no subitem 3.5.2 desta dissertação, três metodologias de cálculo dos indicadores de risco sobressaíram-se em relação às outras por serem mais completas e abrangentes nos quesitos analisados: a proposta para obter uma classificação das barragens sob responsabilidade da COGERH (MENESCAL et al., 2001), a desenvolvida para a Sabesp (KUPERMAN et al., 2001) e a utilizada para a classificação e para o gerenciamento da segurança das barragens operadas e mantidas pela Cemig (FUSARO, 2003).

Seguindo as três metodologias citadas, foram desenvolvidas planilhas eletrônicas de cálculo do Potencial de Risco proposto por MENESCAL et al. (2001), do Índice de Comportamento proposto por KUPERMAN et al. (2001) e do Risco proposto por FUSARO (2003), para aplicação em um conjunto de barragens.

Então, foram solicitados os dados necessários para a aplicação das planilhas eletrônicas de cálculo dos indicadores de risco a empresas que tivessem, sob sua responsabilidade, um *portfolio* de barragens.

Apesar dos esforços (reuniões, telefonemas e *e-mails*) e do tempo despendido a espera de que tais dados fossem disponibilizados para o desenvolvimento da pesquisa, percebeu-se um grande receio, tanto por parte dos funcionários, como por parte da diretoria das empresas, em fornecer as informações necessárias, mesmo cientes de que o uso dos dados seria restrito à pesquisa e de que os nomes das barragens poderiam ser omitidos, impedindo, desta forma, que elas pudessem ser identificadas.

Embora as empresas consultadas demonstrassem boa vontade e interesse pela pesquisa, ficou evidente que não permitiriam a exposição dos pontos vulneráveis das barragens sob sua responsabilidade, que pessoas externas à empresa acabassem por

apontar a fragilidade de suas estruturas, e, ainda, que fosse criada a possibilidade de que tais informações pudessem ser divulgadas à imprensa.

Quanto à situação exposta, cabe lembrar que existem empresas cujos funcionários são impedidos de publicar trabalhos técnico-científicos provenientes de suas atividades, pois tal atitude é interpretada como uma ameaça à empresa.

Com estes exemplos, fica evidenciada a necessidade de uma legislação com um procedimento que torne obrigatório o cadastro das barragens existentes em todo o território nacional e o livre acesso aos dados e às informações a toda a sociedade como prevê o Projeto de Lei Nº 1.181, de 2003, ao criar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Afinal, se é possível existir um registro de imóveis (casas, terrenos, prédios, por exemplo), muito mais importante será o cadastro, por órgão oficial, de estruturas que oferecem à sociedade benefícios essenciais à sobrevivência (por exemplo, armazenamento de água) e ao desenvolvimento (geração de energia elétrica, por exemplo). A legislação deveria obrigar, também, não só o cadastro de barragens com altura maior ou igual a 15 metros, pois se deve levar em consideração o caso de rupturas em série de barragens com menos de 15 metros a montante que ocasionam a ruptura de uma barragem de mais de 15 metros a jusante.

Devido a grande dificuldade e impossibilidade, pelas razões mencionadas, de obtenção de dados que fossem confiáveis para a aplicação das três metodologias, restam, como produto desta dissertação, as planilhas eletrônicas como ferramenta de cálculo dos indicadores de risco, sendo que as citadas planilhas foram testadas com dados limites (casos extremos), estando prontas para receber os dados.

O cálculo dos indicadores de risco tem por objetivo identificar, por meio de diferentes metodologias, o nível de segurança em que se encontra a barragem, assim conscientizando do aumento necessário da segurança e da necessidade da inspeção.

A facilidade de utilização desta ferramenta permite a qualquer pessoa, que possua os dados necessários, fazer o cálculo dos indicadores de risco e, então, poder compará-los entre si, mostrando, assim, sua eficiência e praticidade.

A ferramenta desenvolvida pode ser instrumento de auditoria, pois coloca ao alcance de uma empresa fazer a própria análise com os dados de suas barragens, permitindo fazer uma avaliação de seus riscos.

A ferramenta também pode ser de interesse de uma seguradora, pois é um instrumento capaz de avaliar seus seguros, principalmente, quando da aprovação do Projeto de Lei Nº 436, de 2.007, que tornará obrigatória a contratação de seguro contra o rompimento de barragens.

Temos convicção de que a futura utilização da ferramenta de cálculo por empresas e órgãos públicos, que têm por atividade o gerenciamento de barragens, cumprirá com seu objetivo ao oferecer o benefício do cálculo do risco através das três metodologias que têm destaque no meio técnico e que devem ser divulgadas.

A pesquisa realizada coloca ao alcance do leitor o estado da arte a um bom nível de tal forma que contribui com pesquisas futuras, isto porque este trabalho foi inspirado numa corrente atual direcionada à segurança de barragens, que vem crescendo a cada dia, devendo ser levado adiante.

Ao final deste trabalho, percebeu-se ainda a grande importância do desenvolvimento tecnológico sobre barragens, que apenas a pontuação do risco que elas oferecem não é suficiente, mas apenas uma etapa do processo de segurança.

5.1 RECOMENDAÇÕES

Citam-se como dificuldades encontradas que impediram o normal desenvolvimento desta dissertação:

- a) a grande quantidade de dados necessários a serem fornecidos pelas empresas para a aplicação das planilhas eletrônicas das três metodologias de cálculo dos indicadores de risco;
- b) a necessidade de um especialista em inspeção de barragens para fazer o levantamento dos dados necessários à aplicação das metodologias;
- c) a autorização das empresas para fornecer as informações solicitadas;
- d) como a instituição é uma universidade pública, a dissertação é aberta ao público, não podendo ser sigilosa, tornando mais difícil a obtenção dos dados.

Qualquer desenvolvimento futuro desta pesquisa necessitará de informações de campo para seu aperfeiçoamento, aconselha-se então trabalhar em conjunto com um órgão oficial que possua os dados e tenha interesse na pesquisa a ser realizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A.B. de. **Segurança e risco nos vales a jusante de barragens.** In: CONGRESSO DA ÁGUA, 4, 1998, Lisboa. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) – Eventos do ano de 1998. Disponível em: <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/c_autor.htm> Acesso em: jan. 2006.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Pró-água/Semi-Árido – UGPO. Departamento de Projetos e Obras Hídricas (DPOH). **Manual de segurança e inspeção de barragens.** Brasília, DF: jul. 2002, 148 p.

BRASIL. Projeto de Lei Nº 1.181, de 03 de junho de 2003. Estabelece diretrizes para a verificação da segurança de barragens de cursos de água para quaisquer fins e para aterros de contenção de resíduos líquidos industriais. Autor: Deputado Leonardo Monteiro. Disponível em: <http://www.camara.gov.br/sileg/Prop_Detalhe.asp?id=118248> Acesso em jan. 2006.

BRASIL. Projeto de Lei Nº 436, de 14 de março de 2007. Torna obrigatória a contratação de seguro contra o rompimento de barragens. Autora: Deputada Elcione Barbalho. Disponível em: <http://www.camara.gov.br/sileg/Prop_Detalhe.asp?id=344746> Acesso em mar. 2007.

CNPGB – Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens. Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens. **1º Relatório de Progresso.** jan. 2005, Portugal, 13 p. Disponível em: <<http://cnpgb.inag.pt/port/actividades.html#grupos>> Acesso em: jan. 2006.

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: ICOLD, 20th Congress, Question 76, set. 2000, Beijing, China, 19 p. Disponível em: <http://www.usbr.gov/ssle/dam_safety/risk/references.html> Acesso em: jan. 2006.

FONTENELLE, A. de S.; OLIVEIRA, Y.C. de; VIEIRA, V.P.P.B.; MIRANDA, A.N. de. **Ações de segurança de barragens do Estado do Ceará com ênfase em inspeções e risco.** [2005?] 16p. Disponível em: <http://www.cogerh.com.br/versao3/segur_barragens.asp> Acesso em: jan. 2006.

FUSARO, T.C. Metodologia de classificação de barragens baseada no risco. Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), 12 p. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 25., out. 2003, Salvador, BA. **XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens – Anais.**

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). 29 Apr. 2004, 42 p. Disponível em: <<http://www.gwu.edu/~icdrm/publications/>> Acesso em: jan. 2006.

HARTFORD, D.N.D. **Emerging principles and practices in dam risk management.** In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON RISK ANALYSIS IN DAM SAFETY ASSESSMENT, 1999, Taipei, Taiwan. Risk Analysis in dam safety assessment. Taiwan: Water Resources Publications, LLC, 1999. p. 1-34.

KUPERMAN, S.C.; RE, G.; FERREIRA, W.V.F.; TUNG, W.S.; VASCONCELOS, S.E.; ZÚÑIGA, J.E.V. RABELLO, M. 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., nov. 2001, Fortaleza, CE. **XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens - Anais.** Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 2001. v. 02. p. 535-548.

MACHADO, B.P.; RABELLO, M. Alocação de riscos em contratos EPC de barragens e obras hidrelétricas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 24., nov. 2001, Fortaleza, CE. **XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens - Anais.** Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 2001. v. 02. p. 527-534.

MCGRATH, S. **To study international practice and use of risk assessment in dam management.** The Winston Churchill Memorial Trust of Australia: Dec. 2000, 57 p. Disponível em: <http://www.usbr.gov/ssle/dam_safety/risk/references.html> Acesso em: jan. 2006.

MENESCAL, R. de A.; CRUZ, P.T.; CARVALHO, R.V.de; FONTENELLE, A de S.; OLIVEIRA, S.K.F. de. Uma metodologia para a avaliação do potencial de risco em barragens do semi-árido. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 24., 2001, Fortaleza, CE. **A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil.** Brasília: Ministério da Integração Nacional, jan. 2005, 2. ed., p. 137-153.

MENESCAL, R. de A.; VIEIRA, V. de P.P.B.; OLIVEIRA, S.K.F. de. Terminologia para a análise de risco e segurança de barragens. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 24., 2001, Fortaleza, CE. **A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, jan. 2005, 2. ed., p. 31-53.

MORRIS, M.; SAMUELS, P.; ELLIOTT, C. **Risk and Reservoirs in the UK**. In: CADAM Meeting, nov. 1999, Zaragoza, Spain, 10p. (p. 441-450) Disponível em: <<http://www.hrwallingford.co.uk/projects/CADAM/CADAM/index.html>> Acesso em: jan. 2006.

PINTO, N.L. de S. **Hidráulica Aplicada**. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica. Curitiba, set. 1987. 270 p. Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR), Universidade Federal do Paraná (UFPR).

RAMOS, C.M.; MELO, J.F. de. **Segurança de Barragens. Aspectos hidráulicos e operacionais**. Texto policopiado de uma conferência proferida na EPUSP, São Paulo, Brasil, 1994. 19 p. Disponível em: <<http://www.dha.lnec.pt/nre/portugues/funcionarios/papers/ramos/seguranca%20barragens%20aspectos%20hidraulicos%20operacionais.pdf>> Acesso em: jan. 2006.

SILVEIRA, J.F.A. **A análise de risco aplicada a segurança de barragens**. Revista Brasileira de Engenharia, ed. especial, nov. 1999. p. 1-42.

USBR. **Dam Safety Risk Analysis Methodology**. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado: Technical Service Center, May 2003a, 48 p. Disponível em: <http://www.usbr.gov/ssle/dam_safety/risk/methodology.html> Acesso em: jan. 2006.

USBR. **Guidelines for achieving public protection in dam safety decisionmaking**. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado: 15 June 2003b, 19 p. Disponível em: <http://www.usbr.gov/ssle/dam_safety/risk/references.html> Acesso em: jan. 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – APRESENTAÇÃO RESUMO DA ANÁLISE DE RISCO E DAS METODOLOGIAS

APÊNDICE 2 – LISTAGEM DAS FÓRMULAS DAS PLANILHAS ELETRÔNICAS DE CÁLCULO DOS INDICADORES DE RISCO

APÊNDICE 3 – CD CONTENDO ARQUIVO DIGITAL DAS PLANILHAS ELETRÔNICAS DE CÁLCULO

APÊNDICE 1 – APRESENTAÇÃO RESUMO DA ANÁLISE DE RISCO E DAS
METODOLOGIAS

**APÊNDICE 2 – LISTAGEM DAS FÓRMULAS DAS PLANILHAS ELETRÔNICAS
DE CÁLCULO DOS INDICADORES DE RISCO**

Listagem da Metodologia do Indicador de Risco: Potencial de Risco PR

dimensão	= SE(E(altura>50;comprimento>500);10;SE(E(E(altura>20;altura<50);E(comprimento>200;comprimento<3000));6;SE(E(E(altura>10;altura<20);comprimento<=2000);3;SE(E(altura<=10;comprimento<=200);1;"metodologia não definida para os valores digitados"))))
i volume reservatório	= SE(volume r<20;3;SE(E(volume r>20;volume r<200);5;SE(E(volume r>200;volume r<800);7;SE(volume r>800;10;"metodologia não definida p/ o volume digitado"))))
i Qp	= SE(Qp=10000;1;SE(Qp=1000;2;SE(Qp=500;4;SE(OU(Qp<500;Qp="d");10;"metodologia não definida para o valor digitado"))))
P	= dimensão+i volume reservatório+tipo barragem+tipo fundação+ iQp
i tempo operação	= SE(tempo>30;0;SE(E(tempo>10;tempo<30);1;SE(E(tempo>5;tempo<10);2;SE(tempo<5;3;"metodologia não definida p/ o tempo digitado"))))
V	= i_tempo_operação+asbuilt+confiabilidade+tomada+percolação+deformações+deterioração+tipo material
i volume útil	= SE(volume u>800;2;SE(E(volume u>200;volume u<800);1,5;SE(volume u<200;1;"metodologia não definida p/ o volume útil digitado"))
I	= (i volume útil+população+custo)/3
valor PR	= (P+V)*I/2

Listagem da Metodologia do Indicador de Risco: Índice de Comportamento IC

i altura = SE(altura<15;10;SE(E(altura>15;altura<30);6;SE(altura>30;2;"altura não definida pela metodologia"))))

i volume reservatório = SE(E(volume reservatório>0,05;volume reservatório<1);10;SE(E(volume reservatório>1;volume reservatório<50);6;SE(volume reservatório>50;2;"volume não definido pela metodologia"))))

i dimensão = MÍNIMO(i altura;i volume reservatório)

i volume armazenado = SE(volume armazenado<0,05;5;SE(E(volume armazenado>0,05;volume armazenado<1);4;SE(E(volume armazenado<50);3;SE(E(volume armazenado>50;volume armazenado<100);2;SE(volume armazenado>100;1;"volume não definido pela metodologia")))))

PP = SOMA(importância;i dimensão;i volume armazenado;Impacto social;Impacto ambiental;Impacto econômico;tipo barragem;orgão vertente;vazão de projeto)

ER = SOMA(Informações;Frequência;Percolação;Deformações;Deterioração;Erosões;Equipamentos descarregadores)

valor IC = 0,4*PP+0,6*ER

Listagem da Metodologia do Indicador de Risco: Risco

PI	=	$SE(\text{Idade} < 10; 100; 8988,9 * \text{Idade}^{(-1,9544)})$
Potencial de risco P	=	Tipo de barragem PB + Tipo de fundação PF + PI
VP Estruturas de Terra	=	$5 * (\text{Borda livre} + \text{Estabilidade escorregamento} + \text{Dimensionamento} + \text{Tratamento fundação})$
VP Estruturas de	=	$5 * (\text{Borda livre} + \text{Estabilidade global} + \text{Tratamento fundação})$
VP Extravadores	=	$50 * \text{Vazão projeto} + 5 * \text{Estabilidade Global} + 5 * \text{Tratamento Fundação} + 2 * \text{Regras operativas} + 1 * \text{Treinamento} + 2 * \text{Condição operação}$
Adequação aos critérios de projeto atuais VP	=	SOMA(VP Estruturas de Terra; VP Estruturas de Concreto; VP Extravadores)
Condição atual das estruturas determinada pela deterioração VM	=	SOMA(A deterioração, no grau em que se apresenta i * Esta deterioração requer i)
Vulnerabilidade V	=	Adequação aos critérios de projeto atuais VP + Condição atual das estruturas determinada pela deterioração VM
i Geração CG	=	$SE(E(\text{Geração} \geq 0; \text{Geração} < 30); 0; SE(E(\text{Geração} \geq 30; \text{Geração} < 250); 1; SE(\text{Geração} = 250; \text{"Geração não definida pela metodologia"}; SE(E(\text{Geração} > 250; \text{Geração} < 500); 2; 3))))$
i Volume do reservatório CR	=	$SE(E(\text{Volume} \geq 0; \text{Volume} < 5); 0; SE(E(\text{Volume} \geq 5; \text{Volume} < 50); 1; SE(\text{Volume} = 50; \text{"Volume não definido pela metodologia"}; SE(E(\text{Volume} > 50; \text{Volume} < 500); 2; SE(E(\text{Volume} \geq 500; \text{Volume} < 5000); 3; 4))))$
Consequência C	=	i Geração CG + i Volume do reservatório CR + Danos a jusante CJ
Probabilidade	=	Potencial de risco P + Vulnerabilidade V
Risco	=	Probabilidade * Consequência C

APÊNDICE 3 – CD CONTENDO ARQUIVO DIGITAL DAS PLANILHAS
ELETRÔNICAS DE CÁLCULO