

CURSO SEGURANÇA DE BARRAGENS

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

MÓDULO III: GESTÃO E DESEMPENHO DE BARRAGENS

UNIDADE 1: ANÁLISE E GESTÃO DE RISCOS

FICHA TÉCNICA

Realização:



PTI
Parque Tecnológico
Itaipu



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

Ministério do
Meio Ambiente



EQUIPE TÉCNICA

Tereza Cristina Fusaro
Elaboração de conteúdo

Glauco Gonçalves Dias
Revisor Técnico Geral

Alexandre Anderáos

Revisor técnico ANA

Etore Funchal de Faria

Revisor técnico Itaipu

Carlos Leonardi

Revisor técnico Itaipu

Fabio Luiz Willrich

Revisor técnico Itaipu

Cesar Eduardo b. Pimentel

Revisor técnico ANA

Josiele Patias

Revisora técnica Itaipu

Claudio Neumann

Revisor técnico Itaipu

Josimar Alves de Oliveira

Revisor técnico ANA

Claudio Osako

Revisor técnico Itaipu

Ligia Maria Nascimento de Araújo

Revisora técnica ANA

Dimilson Pinto Coelho

Revisor técnico Itaipu

Silvia Frazão Matos

Revisora técnica Itaipu

Coordenação Executiva
Celina Lopes Ferreira (ANA)

Revisão Ortográfica

ICBA – Centro de Línguas

www.cursodeidiomasicba.com.br



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-
NãoComercial-SemDerivados 3.0 Não Adaptada

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

CURRICULO RESUMIDO

Prof: Teresa Cristina Fusaro



Graduada em Engenharia Civil pela UFMG em 1984 e Mestre em Geotecnia de Barragens pela UFOP em 2005.

Trabalha na Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig desde 1986, atuando nas atividades de inspeções e análise da instrumentação de barragens e manutenção civil de estruturas civis de geração.

Gerente de Segurança de Barragens e Manutenção Civil da Cemig GT desde 2004.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| LISTA DE FIGURAS..... | 06 |
| LISTA DE TABELAS..... | 07 |
| 1 INTRODUÇÃO AOS CONCEITOS DE RISCOS..... | 08 |
| 2 PORQUE FALAR SOBRE RISCOS ASSOCIADOS A BARRAGENS..... | 11 |
| 3 FONTES DE RISCOS EM BARRAGENS..... | 14 |
| 3.1 Riscos ligados a fatores naturais ou ambientais..... | 16 |
| 3.1.1 Riscos Hidrológicos | 16 |
| 3.1.2 Sismicidade..... | 21 |
| 3.1.3 Escorregamento de massa em reservatórios..... | 24 |
| 3.1.4 Ações agressivas..... | 24 |
| 3.2 Riscos associados a fatores dependentes da barragem..... | 25 |
| 3.2.1 Riscos na operação do reservatório..... | 25 |
| 3.2.2 Riscos geológicos..... | 27 |
| 3.2.3 Riscos estruturais..... | 29 |
| 3.2.4 Riscos associados ao monitoramento..... | 30 |
| 3.2.5 Riscos técnico-organizacionais..... | 31 |
| 3.2.6 Riscos associados gestão de emergências..... | 32 |
| 3.2.7 Riscos de ruptura de barragens em cascata..... | 32 |
| 3.3 Riscos ligados a fatores socioeconômicos | 33 |
| 4 GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS..... | 35 |
| 5 GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS SEGUNDO A LEI 12.334/2010.... | 44 |
| 6 AVALIAÇÃO DE RISCOS EM BARRAGENS SEGUNDO A LEI 2.334/2010 | 46 |
| 7 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS..... | 49 |
| 7.1 Altura..... | 49 |
| 7.2 Comprimento..... | 51 |
| 7.3 Tipo da Barragem quanto ao material de construção..... | 53 |
| 7.4 Tipo de fundação..... | 54 |
| 7.5 Idade da Barragem..... | 56 |
| 8 ESTADO DE CONSERVAÇÃO..... | 58 |
| 9 ATENDIMENTO AO PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS..... | 63 |
| 10 CATEGORIA DE DANO POTENCIAL ASSOCIADO..... | 66 |
| 10.1 Volume total do reservatório..... | 67 |
| 10.2 Potencial de perda de vidas | 68 |
| 10.3 Impacto ambiental..... | 71 |
| 10.4 Impacto socioeconômico..... | 71 |
| 11 ANÁLISE FINAL DE RISCOS..... | 72 |
| CONCLUSÕES..... | 74 |
| 12 AGRADECIMENTOS..... | 75 |
| REFERÊNCIAS..... | 76 |

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gerenciamento de riscos em projetos

Figura 2 – Pilares básicos da segurança de barragens

Figura 3 – Incertezas em segurança de barragens, com destaque para os fatores de incertezas internos, ou seja, dependentes da barragem.

Figura 4 - Amortecimento da Cheia de Projeto em Reservatórios

Figura 5 - Dados sobre tremores de terra, com magnitude 3.0 ou mais, ocorridos no Brasil até 1996.

Figura 6 - A água pressionada para baixo preenche os poros das rochas ou infiltra-se lentamente pelas fraturas existentes na região abaixo do reservatório, produzindo um desordenamento no balanço das forças geológicas preexistentes. Outro efeito que se deve levar em consideração é o peso do reservatório.

Figura 7 - Efeito do tremor de terra ocorrido na UHE Cajuru no dia 21/01/72: o afloramento em rocha trincou em toda sua extensão.

Figura 8 - Modelo geral de operação de um reservatório

Figura 9 - Etapas do processo de gestão de riscos em barragens

Figura 10 – Análise de Efeitos e Modos de Falha (FMEA)

Figura 11 – Árvore de Eventos (ETA)

Figura 12 – Árvore de Falhas (FTA)

Figura 13 – Modelagem probabilística de riscos em barragens

Figura 14 – Tabela de Índices do GRI

Figura 15 – Tabela do LCI

Figura 16 – Elementos para gestão de riscos em barragens segundo a Lei 12.334/2010.

Figura 17- Correlações entre número de barragens rompidas até 1988 e sua altura

Figura 18- Correlações entre número de barragens rompidas até 1988 e tipo de material de construção

Figura 19- Causas de ruptura de barragens

Figura 20- Idade de ruptura de barragens

Figura 21- Árvore lógica de estados que condicionam a árvore de eventos, mostrando o primeiro enchimento do reservatório como um possível evento iniciador ou gatilho

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Figura 22- Causas de ruptura de barragens de terra/enrocamento

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proposta de definição de termos associados a riscos geológicos

Tabela 2: Critérios para classificação de barragens segundo a Lei 12.334/2010

Tabela 3 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco

Tabela 4 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco

Tabela 5 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco

Tabela 6 - Matriz de classificação quanto ao Dano Potencial Associado – DPA

Tabela 7 – Casos de Ruptura de Barragens

Tabela 8– Definição das consequências do risco hidrodinâmico

Tabela 9 – Alguns exemplos de distâncias a ser avaliadas a jusante

Tabela 10 – Classificação das barragens de acumulação de água quanto à categoria de risco e dano potencial.

Prezado Aluno,

no decorrer desta unidade você deverá desenvolver competência para:

- Examinar técnicos dados de classificação categorizando o grau de risco da barragem;
- Estimar riscos de ruptura e suas consequências.

1. INTRODUÇÃO AOS CONCEITOS DE RISCOS

Falar de “risco” é falar, simultaneamente, de oportunidade e de incerteza. Esta grandeza possui múltiplos significados na linguagem corrente e na terminologia técnico-científica, é um indicador de segurança e um operador de decisão.

Quando falamos de barragens, estamos tratando de um **risco tecnológico**, usualmente definido como as consequências esperadas associadas à ocorrência de um evento adverso. Em linguagem matemática:

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$$

Ou ainda:

$$\text{Risco} = \text{P(evento)} \times \text{P(reação adversa para dado evento)} \times \text{Consequência do evento}$$

Num primeiro momento, a definição acima pode nos parecer uma novidade. Entretanto, de forma intuitiva, fazemos “análises de risco” a todo o momento, associando mentalmente eventos, sua probabilidade e consequências.

Se você vai atravessar uma rua, por exemplo:

- O que pode dar errado (evento)? – pode não dar tempo para você atravessar a rua e você pode ser atingido por um veículo
- Quanto isso é provável (probabilidade do evento)? – você verifica mentalmente se há grande movimento de veículos na via e se há algum se aproximando

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

- Que perdas isto causará (consequências)? –você pode ser atropelado e isto custar a sua saúde ou, até mesmo, a sua vida.

Com base nestes três elementos, evento, probabilidade e consequências, tomamos uma decisão, estabelecemos controles e, até mesmo, delineamos planos de contingência para esta ameaça.

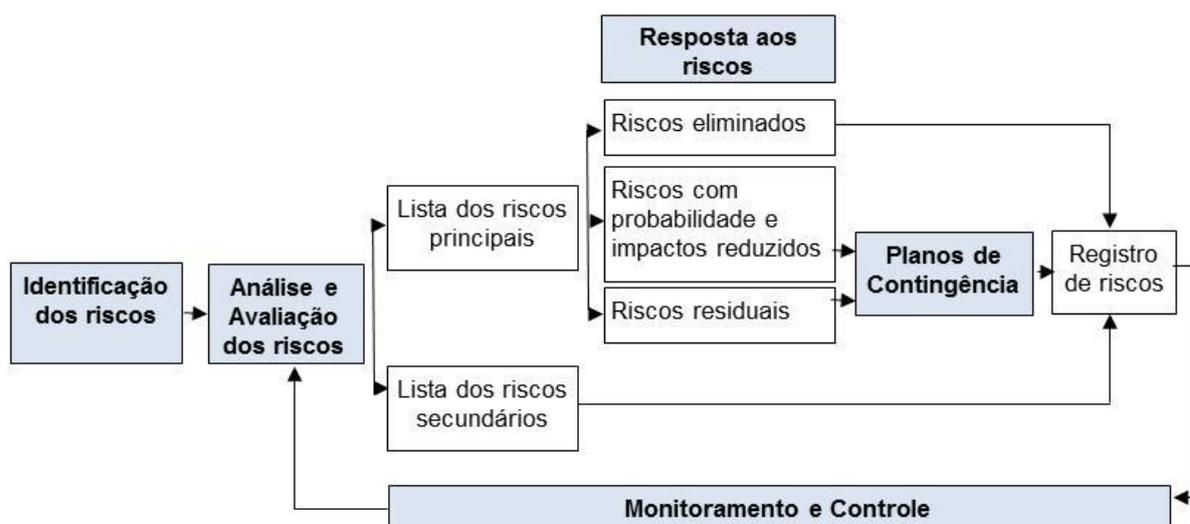
Voltando ao exemplo, após a avaliação do risco de atravessar a rua, tomamos uma decisão:

- Aceitar o risco, atravessando a rua imediatamente.
- Minimizar o risco, atravessando a rua quando não houver nenhum veículo próximo.
- Eliminar o risco, apenas atravessando a rua apenas na faixa para pedestres quando o sinal de pedestres estiver verde e todos os veículos parados.

Também estabelecemos controles e até mesmo planos de contingência (se um veículo se aproximar rapidamente, posso correr).

Estes elementos são as bases do **Gerenciamento de Riscos em Projetos**, conforme apresentado na figura 1 e descrição das etapas a seguir:

Figura 1 – Gerenciamento de riscos em projetos



Fonte: Modificado de Mulcahy, 2010.

Identificação de riscos: Processo de determinação do que pode dar errado, porque e como e quais as consequências.

Análise dos riscos: Processo de quantificação da probabilidade de ocorrência e gravidade das consequências.

Avaliação dos riscos: Processo de exame e julgamento do significado dos riscos.

Resposta aos riscos: Processo decisório de como tratar os riscos identificados, sendo que as respostas às ameaças podem ser (Mulcahy, 2010):

- Evitar: eliminar a ameaça eliminando a causa;
- Mitigar ou controlar: reduzir o valor monetário esperado do risco, reduzindo o impacto ou a probabilidade de ocorrência;
- Transferir: transferir o risco para outros através de subcontratação ou seguro;
- Aceitar passivamente (se acontecer, aconteceu) ou ativamente (criação de um plano de contingência).

Planos de Contingência: Estabelecimento de plano de ação para tratar os riscos não eliminados.

Monitoramento e Controle: Processo periódico de reavaliação dos riscos e do plano geral de gerenciamento. Usualmente utiliza controles para garantir que os objetivos do projeto sejam atingidos e que eventos indesejáveis sejam prevenidos ou detectados e corrigidos.

Assim, verificamos como os conceitos básicos de riscos são de fácil compreensão, por fazerem parte do nosso cotidiano e por serem aplicáveis à gestão de projetos de qualquer natureza.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

2. PORQUE FALAR SOBRE RISCOS ASSOCIADOS A BARRAGENS

A segurança deve constituir o objetivo fundamental no projeto, construção e operação de barragens. Este deve ser referencial a ser buscado, uma vez que a ruptura de uma barragem pode ter consequências imensuráveis em termos de impactos socioeconômicos e ambientais.

Apesar de reduzido, o risco de ruptura de uma barragem constitui uma realidade potencial para tais empreendimentos. De acordo com o Boletim 99 do ICOLD (1995), a percentagem de ruptura de grandes barragens é de 2,2% para as barragens construídas antes de 1950 e de cerca de 0,5% para as construídas após esta data. A maior parte das rupturas, cerca de 70%, ocorreu com barragens nos seus primeiros 10 anos de operação e, mais especialmente, no primeiro ano após o comissionamento.

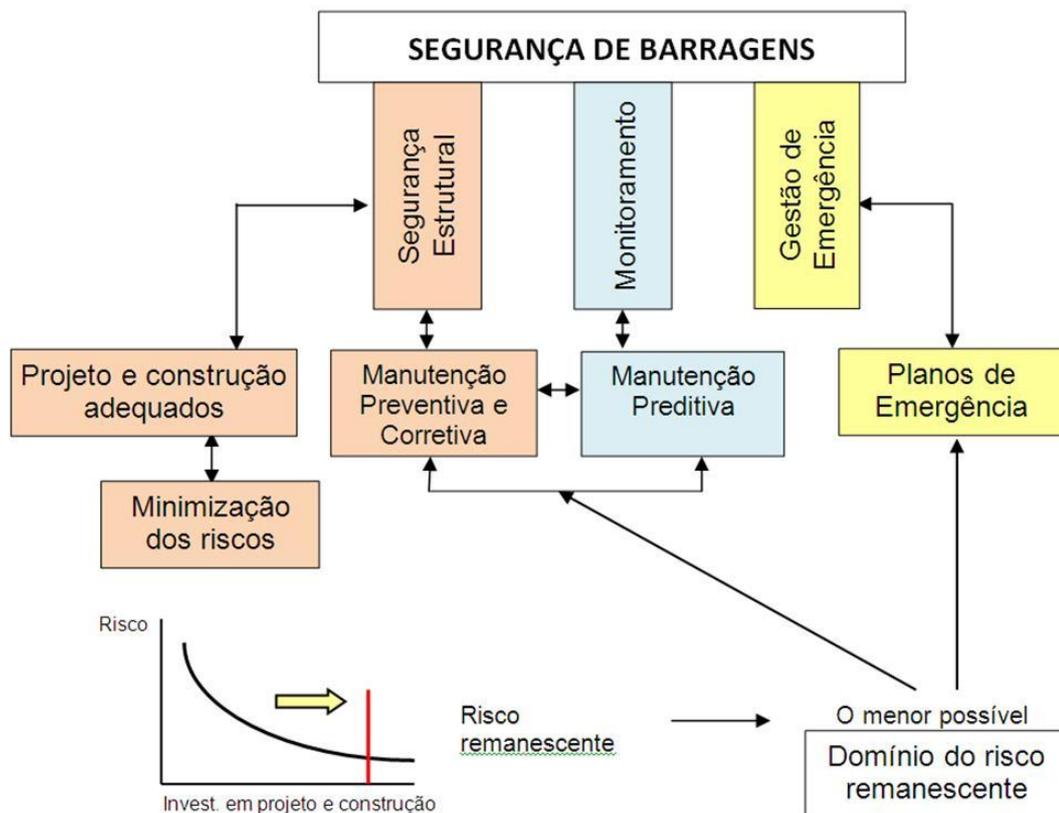
Foster et al. (1998) analisaram um total de 11.192 grandes barragens de enrocamento construídas até 1986, registrando 136 casos de ruptura neste universo. A frequência média de ruptura (n° total de rupturas / n° total de barragens) foi de 0,012, ou 0,011 se consideradas apenas as barragens que estavam em operação, ou seja, de cada 100 barragens construídas, uma se rompe. A frequência anual histórica foi de $4,5 \times 10^{-4}$. Assim, para o mesmo grupo de 100 barragens, a probabilidade de ruptura anual é de 0,045, portanto, a cada 22 anos, uma barragem se romperia.

Sabendo-se então da existência de uma probabilidade, ainda que baixa, de ruptura de uma barragem e do alto impacto que este evento teria a jusante, a questão é como este risco pode ser reduzido. Biedermann (1997) considera que a segurança de barragens pode ser obtida apoiando-se em três pilares básicos: segurança

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

estrutural (projeto, construção e manutenção adequados), monitoramento e gestão de emergência, como apresentado na figura a seguir.

Figura 2 – Pilares básicos da segurança de barragens



Fonte: Biedermann, 1997, adaptado.

Nas fases de projeto e construção, devem ser feitos investimentos de forma que os riscos associados a cada estrutura civil sejam minimizados. Entretanto, sabe-se que alguns riscos são inerentes à construção de uma barragem, como transbordamento por falha na operação dos extravasores ou envelhecimento dos materiais de construção.

Assim, mesmo sendo o projeto e construção adequados, existe um risco remanescente a ser controlado através de um processo de acompanhamento e avaliação permanentes do desempenho das estruturas. Este processo é usualmente denominado de auscultação de barragens, e engloba as atividades de observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que possam aumentar o potencial de risco de uma estrutura (Fonseca, 2003). O objetivo final da auscultação Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

é fornecer elementos para as avaliações do comportamento de barragens e indicar a necessidade de reparos para o restabelecimento das condições de segurança desejadas ou mesmo a necessidade de adoção de medidas emergenciais.

A auscultação de barragens tem como ferramentas as inspeções visuais e a instrumentação. O olho humano treinado é geralmente o melhor instrumento para avaliar a performance de uma barragem. Segundo o *Corps of Engineers* (2000), “apesar das inspeções visuais certamente terem limitações, nenhum outro método tem o mesmo potencial de integrar rapidamente toda a situação do comportamento”. A instrumentação agrega valor a estas avaliações, como um meio de fazer medidas da aferição do comportamento de uma barragem. Estas medidas (leituras dos instrumentos) não eliminam a necessidade do julgamento de engenharia, mas fornecem informações importantes sobre o comportamento das estruturas e permitem uma visão ‘de dentro’ sobre a existência ou não de determinado problema.

Entretanto, pouca importância terá o monitoramento se, quando detectadas necessidades de manutenção (reparo ou melhorias), estas não forem realizadas em tempo hábil para que sejam restaurados os níveis de segurança estrutural desejados. Em outras palavras. “medidas estruturais” devem ser tomadas para o restabelecimento da segurança.

Nem sempre essas medidas são suficientes para eliminar o perigo a que está submetido o sistema vale-barragem. Passou-se, então, a conceber a adoção de “medidas não estruturais”, como a instalação de sistemas de alerta e planos de atendimento a emergências como formas de gerenciamento de riscos. Constituiu-se, assim, o terceiro pilar da segurança, a gestão de emergências, considerando que a segurança do sistema vale-barragem só pode ser garantida por meio da adoção de medidas integradas de gerenciamento de risco e emergências por parte dos responsáveis por ambos os conjuntos do sistema. Os documentos que consolidam os procedimentos para o gerenciamento do risco e as respostas a situações de emergência são os Planos de Ações Emergenciais ou Planos de Atendimento a Emergências.

3. FONTES DE RISCOS EM BARRAGENS

Como dito anteriormente, apesar de toda a atenção geralmente dedicada às grandes obras de engenharia, é impossível considerar que o risco associado às barragens seja nulo. Castro (2008) destaca que consideramos a Engenharia como uma ciência exata, quando, na verdade, engenharia é a “arte de aplicar conhecimentos científicos e empíricos e certas habilitações específicas à criação de estruturas, dispositivos e processos utilizados para converter recursos naturais em formas adequadas ao atendimento das necessidades humanas” (Dicionário Aurélio).

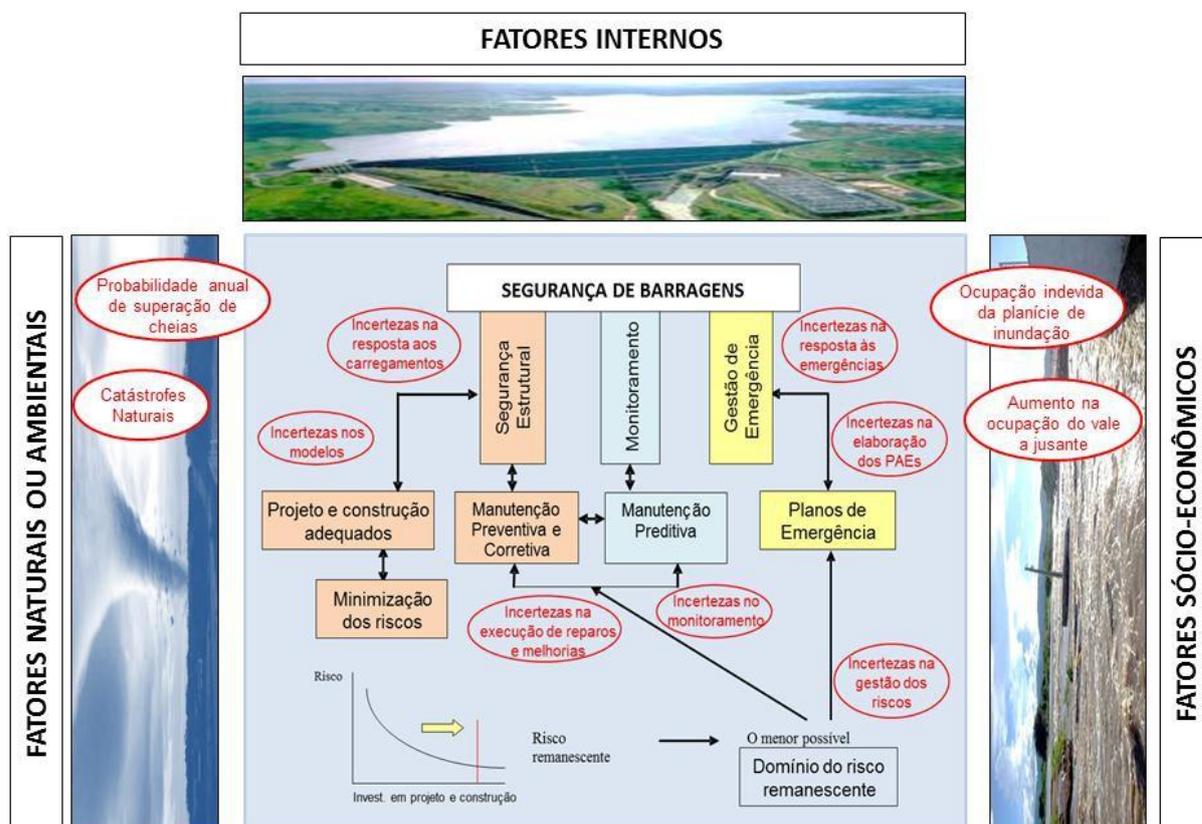
Em outras palavras, a engenharia, na maioria das situações, utiliza modelos simplificados para representar a realidade e, com isso, sempre haverá inexatidões e incertezas envolvidas nesta representação.

Desta forma, **podemos considerar que a gestão da segurança de barragens é uma questão de controle de riscos e tomada de decisões sob condições de incertezas**. Estas incertezas são intrínsecas aos processos de engenharia e, não reconhecê-las explicitamente reflete na confiabilidade dos resultados obtidos.

Existem várias abordagens possíveis para a categorização das fontes de incertezas em barragens. Neste trabalho, faremos uma reflexão acerca das incertezas e riscos classificando-os em:

- fatores naturais ou ambientais
- fatores internos (dependentes da barragem)
- fatores socioeconômicos.

Figura 3 – Incertezas em segurança de barragens, com destaque para os fatores de incertezas internos, ou seja, dependentes da barragem.



Fonte: Nota do autor.

Uma vez que é reduzida a possibilidade de atuação ou mesmo previsão da ocorrência dos eventos naturais e externos, a segurança da barragem fica condicionada ao bom desempenho dos fatores internos (projeto, construção, operação e manutenção). Entretanto, observamos que existem incertezas nos três pilares da segurança de barragens, as quais precisamos compreender para que possamos tomar as decisões adequadas de gestão para a redução dos riscos.

3.1 – RISCOS LIGADOS A FATORES NATURAIS OU AMBIENTAIS

Classificaremos neste grupo os riscos associados a fenômenos naturais e que estariam, de certa forma, fora do nosso controle direto.

- Risco Hidrológico
- Sismicidade
- Escorregamento de massa em reservatórios
- Ações agressivas

3.1.1- Risco hidrológico

O conceito de risco é frequentemente associado à probabilidade de ocorrência de eventos adversos. Em hidrologia, esses são os chamados eventos extremos, cheias e estiagens prolongadas, os quais podem produzir sérios prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Desta forma, ao projetar, instalar e operar um aproveitamento de recursos hídricos, o engenheiro deve presumir a coexistência desse empreendimento com um vale já sujeito a cheias e estiagens, em decorrência da variabilidade climática e seu nível de ocupação, muitas vezes com população e infraestrutura significativas e, portanto, vulneráveis ao impacto de uma falha estrutural ou de funcionamento da obra hidráulica que venha a ser implantada a montante.

Em análise de segurança de barragens, **risco hidrológico é a probabilidade de falha de uma estrutura hidráulica face à ocorrência de vazão superior àquela para a qual foi dimensionada.** Costuma ser avaliado como o produto entre a probabilidade de ocorrência de uma cheia associada a um determinado período de retorno e os danos que se espera dessa ocorrência.

Vejamos como ocorre, de forma bem simplificada, a operação de um reservatório num período chuvoso:

O volume de uma onda de cheia chega ao reservatório de uma barragem aumentando o volume de água acumulado e elevando seu nível. A

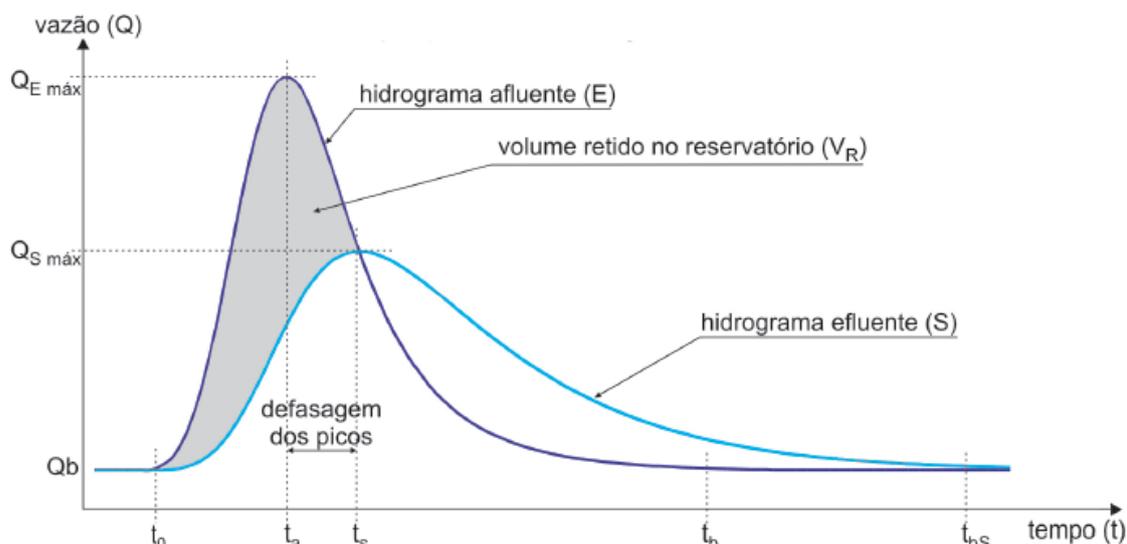
Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

transferência ou saída de água para jusante, no retorno ao leito natural do rio, ocorrerá através dos órgãos extravasores (geralmente vertedores de superfície e/ou descarregadores de fundo) implantados junto ao barramento. Portanto, essas importantes estruturas hidráulicas devem ser dimensionadas para permitir a passagem da cheia de projeto pelo reservatório, com elevação do nível de água até o N.A. máximo maximorum. Ou seja, suas dimensões deverão ser suficientes para evitar que o nível do reservatório ultrapasse o nível máximo maximorum estabelecido em projeto, impedindo o galgamento do maciço, o que poderia colocar em risco tanto a estabilidade da barragem, quanto a segurança do vale a jusante.

No projeto de estruturas hidráulicas admite-se a probabilidade de falha durante sua vida útil, aceitando-se certo nível de convivência com o risco de ocorrência de vazões maiores do que aquela adotada no dimensionamento. Isto porque o custo dessas estruturas é elevado e, em alguns casos, pode ser economicamente inviável dimensioná-las para a maior cheia possível. Assim, a probabilidade de falha pode ser maior ou menor, dependendo do tipo de estrutura e do grau de proteção que se pretende dar ao próprio empreendimento e às áreas em seu entorno. Se a falha desta estrutura provocar grandes prejuízos materiais, ambientais e a possibilidade de perdas de vidas, esse risco deve ser bastante reduzido.

Segundo o *Guia para Cálculo de Cheia de Projeto de Vertedores*, publicado pela Eletrobrás em 1987, “entende-se por Cheia de Projeto a hidrógrafa afluyente ao aproveitamento tal que a capacidade dos vertedores e os efeitos de amortecimento do reservatório sejam definidos conjuntamente para garantir a segurança da barragem na hipótese de ocorrência deste evento”.

Figura 4 - Amortecimento da Cheia de Projeto em Reservatórios



Fonte: Guia Prático Para Projetos De Pequenas Obras Hidráulicas, Departamento de Águas e Energia Elétrica da Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento de São Paulo, 2005.

Existem duas metodologias usualmente empregadas na definição das cheias de projeto:

- **Abordagem Física ou Hidrometeorológica**
Cheia Máxima Provável (CMP) - Limite meteorológico/físico de produção de cheia numa bacia.
- **Abordagem Estatística**
Cheia associada a uma probabilidade de excedência (período de retorno) durante a vida útil da estrutura - Tempo de Recorrência (TR).

Faremos uma revisão rápida dos conceitos envolvidos nestes métodos, para conseguirmos identificar as incertezas envolvidas nas duas metodologias.

Cheia Máxima Provável (CMP) é um indicador de vazão máxima baseado na aplicação da Precipitação Máxima Provável (PMP) sobre uma bacia já saturada de umidade. A PMP, por sua vez, é entendida como a altura máxima de precipitação fisicamente possível de ocorrer, com duração, distribuição temporal e espacial críticas para bacia hidrográfica. É estimada através da maximização da umidade de uma tempestade numa dada bacia, para uma duração específica, numa determinada época do ano, com base em registros históricos. Representaria desta forma, a maior

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

cheia fisicamente possível de ocorrer em uma bacia e tem a pretensão de resultar em um “risco zero” de falha e, assim, assegurar à proteção das populações a jusante em relação às consequências da ruptura de uma barragem.

No entanto, o critério de projeto que recomenda o uso da CMP para dimensionamento de vertedores tem sido questionado por várias razões:

- As estimativas da PMP e CMP são mais complexas, demandam mais tempo e recursos na sua elaboração, e os resultados podem alterar ao longo do tempo em decorrência da incorporação de novos dados, da variabilidade climática e das mudanças no uso e ocupação da bacia. Esta alteração fragiliza sua premissa conceitual de que um projeto que cumpra esta diretriz assegura “risco zero”.
- A disponibilidade de recursos de órgãos estatais ou investidores privados financiadoras de projetos com risco zero, por isso de custos vultuosos, estão cada vez mais escassos e a metodologia da CMP não permite flexibilização da análise econômica, com avaliações de custos, benefícios associados a diversos riscos.
- A utilização de um método sofisticado pode levar à falsa impressão de estarmos obtendo bons resultados. Na realidade, estes estudos são complexos e, para que resultados de qualidade sejam obtidos, necessitam de:
 - Dados históricos de variáveis meteorológicas (precipitação e temperatura de ponto de orvalho) para determinação da Precipitação Máxima Provável – PMP.
 - Modelagem dos processos de transformação Chuva-Vazão, que demanda dados fisiográficos da bacia e séries concomitantes de chuva, vazão e evaporação, para as etapas de calibração e verificação do modelo e determinação da CMP.
 - Tempo maior no desenvolvimento do estudo (disponibilidade de tempo).

Devido a essas questões, análises baseadas no risco têm sido frequentemente adotadas como proposta alternativa de critério de projeto de órgãos extravasores.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Nessa abordagem, o risco admitido no dimensionamento de uma obra hidráulica associa-se ao período de retorno a ser adotado e ao tempo de vida útil previsto para o empreendimento. Aqui, a metodologia se baseia na **análise de frequência de vazões máximas**, onde são úteis os conceitos de probabilidade de excedência e de tempo de retorno de uma dada vazão. A probabilidade anual de excedência de uma determinada vazão é a probabilidade que esta vazão venha a ser igualada ou superada num ano qualquer. O tempo de retorno desta vazão é o intervalo médio de tempo, em anos, que decorre entre duas ocorrências subsequentes de uma vazão maior ou igual. O tempo de retorno é o inverso da probabilidade de excedência. Essas metodologias são descritas com detalhes em publicações de hidrologia estatística.

A aplicação deste método tem como requisitos:

- A existência de série de vazões diárias (período histórico > 30 anos).
- Dados históricos representativos do regime hidrológico da bacia hidrográfica da barragem em avaliação.
- Aplicativo estatístico para análise de frequência de variáveis aleatórias, com ajuste a distribuições de probabilidades de extremos.

É importante lembrar que a escolha do período de retorno para o dimensionamento de uma obra deve ser precedida de análises relativas aos prejuízos tangíveis e intangíveis que possam vir a ser causados por eventos críticos que levem à ruptura de barragem ou a sua operação em condições extremas. Maior rigor na segurança é obtido pela adoção de menores probabilidades de excedência (maiores TRs).

Em resumo, a abordagem a ser adotada depende do grau de proteção que se pretende para o vale a jusante, mas também das informações e ferramentas disponíveis, para que tenhamos um produto de qualidade: Qualquer que seja a abordagem utilizada existe incertezas no processo de determinação da cheia de projeto e, portanto, estaremos sempre nas mãos dos processos naturais.

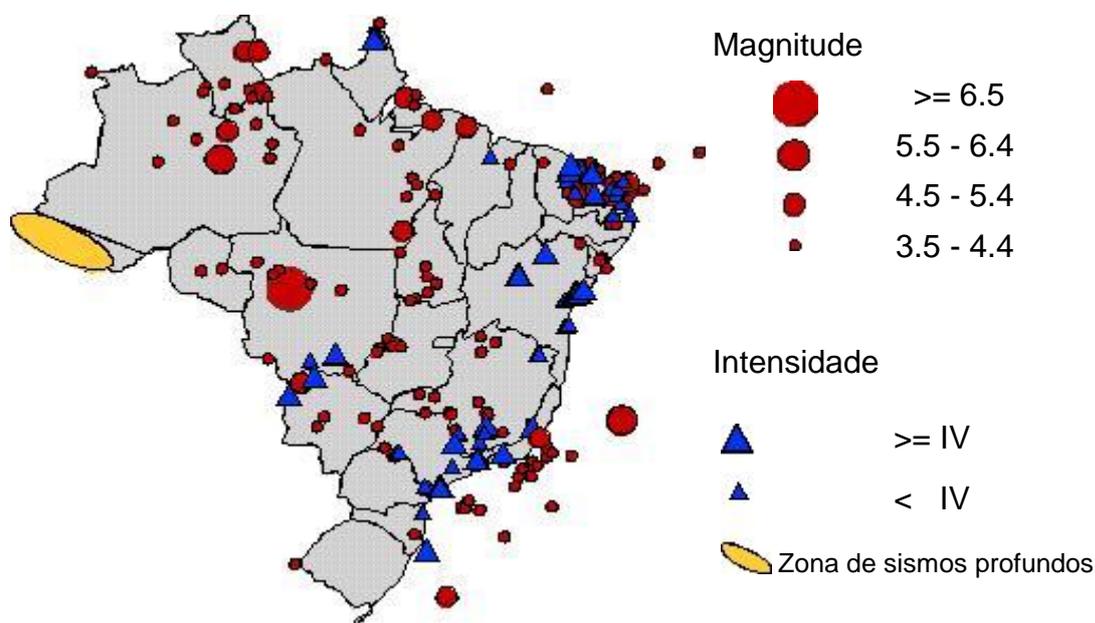
3.1.2- Sismicidade

“A ideia propagada por muito tempo de um Brasil essencialmente estável, livre da ocorrência de terremotos é errônea. A sismicidade brasileira é modesta se comparada a da região andina, mas é significativa porque aqui já ocorreram vários tremores com magnitude acima de 5,0 indicando que o risco sísmico em nosso país não pode ser simplesmente ignorado” (UnB, 2012-1).

Existem dezenas de relatos históricos sobre abalos de terra sentidos em diferentes pontos do país. Afortunadamente, tremores maiores como o de Mato Grosso (1955/mb=6.6), litoral do Espírito Santo (1955/mb=6.3) e Amazonas (1983/mb=5.5) ocorreram em áreas desabitadas.

O Brasil situa-se no interior da Placa Sul-Americana e, portanto, distante das bordas das placas, onde ocorrem mais terremotos. Por isso, a grande parte dos sismos brasileiros é de pequena magnitude (até 4.5), ocorrendo à baixa profundidade (30 km) e, portanto, sentidos até poucos quilômetros do epicentro. O estado do Acre é o que apresenta maior nível de atividade sísmica, devido ao processo de subducção da Placa de Nazca em relação à Placa Sul-Americana, que gera uma área de instabilidade na fronteira entre o Peru e Acre.

Figura 5 - Dados sobre tremores de terra, com magnitude 3.0 ou mais, ocorridos no Brasil até 1996. As informações mais antigas, indicadas por triângulos, são chamadas históricas. Os dados epicentrais, indicados por círculos, são mais novos e obtidos por equipamentos sismográficos.



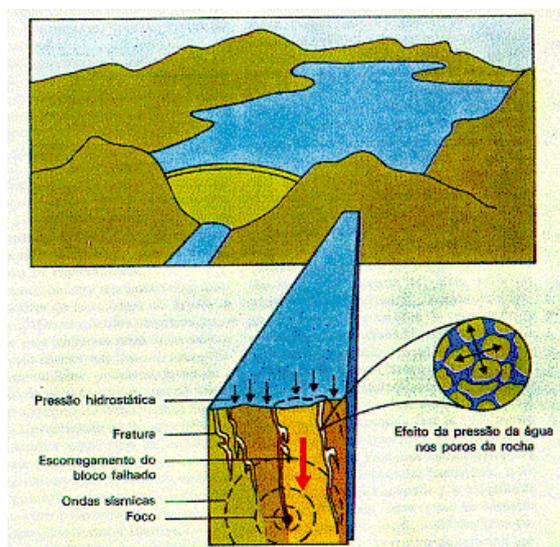
Fonte: Adaptado de Berrocal, 1984 apud UnB, 2012.

“Além das forças naturais, certas ações do homem podem produzir terremotos localizados como as explosões nucleares. A formação de lagos artificiais, com o propósito de gerar energia, também pode gerar tremores de terra e este fenômeno é denominado sismicidade induzida por reservatórios (SIR).” (UnB, 2012-2).

A construção da barragem cria um novo lago, que irá alterar as condições estáticas das formações rochosas do ponto de vista mecânico (em virtude do próprio peso da massa d’água), e do ponto de vista hidráulico (em consequência da infiltração do fluido na subsuperfície, que causa pressões internas nas camadas rochosas profundas). A combinação das duas ações pode desencadear distúrbios tectônicos e, eventualmente, gerar sismos, caso as condições locais sejam propícias.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Figura 6 - A água pressionada para baixo preenche os poros das rochas ou infiltra-se lentamente pelas fraturas existentes na região abaixo do reservatório, produzindo um desordenamento no balanço das forças geológicas preexistentes. Outro efeito que se deve levar em consideração é o peso do reservatório.



Fonte: Adaptado de UnB, 2012.

No Brasil, a preocupação com os efeitos sísmicos se manifestou pela primeira vez na Usina Hidrelétrica de Peti (1948). Cajuru foi a primeira usina a receber instrumentação sismográfica no país, em 1975, e se mantém desde então operando normalmente.

Figura 7 - Efeito do tremor de terra ocorrido na UHE Cajuru no dia 21/01/72: o afloramento em rocha trincou em toda sua extensão.



Fonte: Nota do autor.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Atualmente, é recomendável que, ao construir uma usina hidrelétrica com grande reservatório, se avalie a necessidade de instalação de uma estação sismográfica antes do início do enchimento do reservatório, para que se possa conhecer a atividade sísmica do local antes e pós enchimento.

A ocorrência de um sismo natural ou induzido pode ter como consequências:

- Queda de blocos de rocha e escorregamento de taludes, podendo danificar comportas, estruturas da casa de força, equipamentos eletromecânicos, condutos etc.;
- Movimentos de massa para dentro do reservatório, formando ondas que podem vir a galgar a barragem;
- Assentamentos e recalques por liquefação, adensamento do solo ou enrocamento, causando deformações na barragem.

3.1.3- Escorregamento de massa em reservatórios

Possibilidade de escorregamento de taludes de terra ou rochosos nas margens dos reservatórios, movimentando uma massa significativa para dentro do lago, podendo vir a causar ondas significativas no reservatório e o galgamento da barragem.

3.1.4- Ações agressivas

Atuação das intempéries (chuva, vento, calor, frio) alternadamente sobre a barragem e estruturas associadas podendo causar, ao longo do tempo, desagregação, envelhecimento, erosão e corrosão, dentre outros fenômenos térmicos, mecânicos e químicos.

Como exemplo, podemos citar o processo físico de fragmentação das rochas devido a variações da temperatura, a ação do gelo e dos ventos, pelo enfraquecimento de suas estruturas e pela fragmentação devido aos diferentes coeficientes de dilatação dos minerais que as compõem.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Destaca-se ação da água da chuva carregada de elementos atmosféricos, como o CO₂, que resulta em reações químicas nos materiais de construção: oxidação, hidratação, dissolução, hidrólise e acidólise.

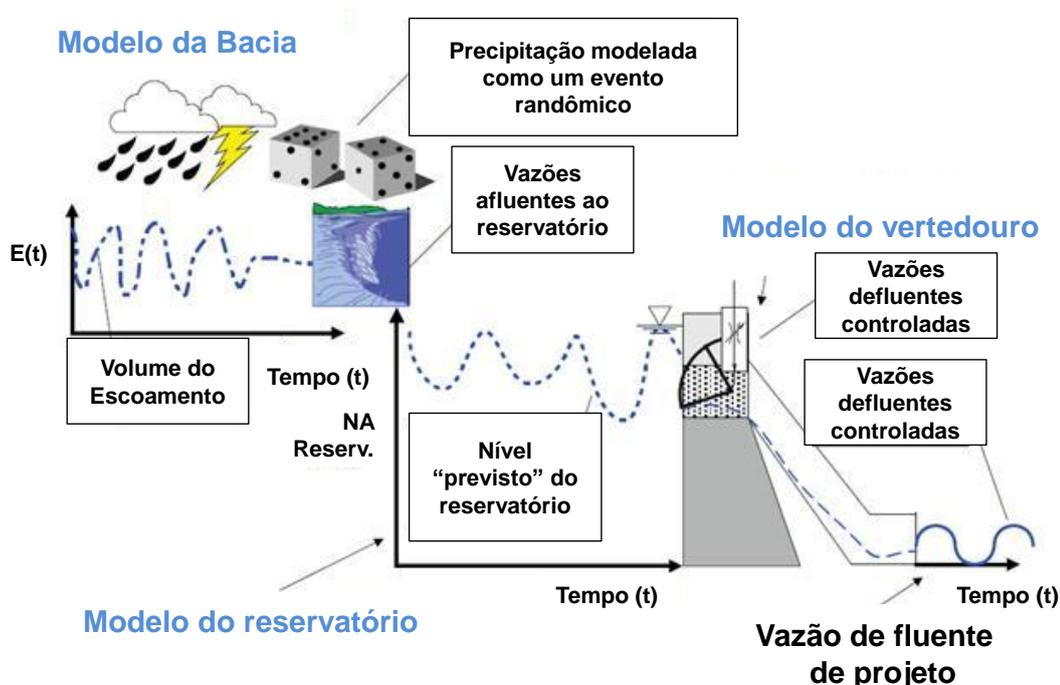
3.2 – Riscos associados a fatores dependentes da barragem

São riscos internos ao sistema barragem e impostos pela construção da estrutura do barramento, presentes nas fases de projeto, construção e operação.

3.2.1- Riscos na operação do reservatório

Além dos riscos hidrológicos (risco natural), existem fatores determinados pelo reservatório e órgãos extravasores que impõem riscos adicionais à segurança do sistema vale-barragem, como mostrado na figura a seguir.

Figura 8 - Modelo geral de operação de um reservatório



Fonte: Traduzido de Hartford e Baecher, 2004.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Mesmo com valores de cheias de projeto adequados, podemos ter vertedouros hidrológicamente subdimensionados e/ou apresentando grau de incerteza na determinação da capacidade de descarga devido a dimensionamento por critérios empíricos, dados cadastrais e informações geométricas inconsistentes e ações hidrodinâmicas não consideradas no projeto.

Devemos ter em mente a necessidade de regras operativas adequadas e a necessidade de manutenção dos dispositivos extravasores. O mau funcionamento das comportas coloca em risco todos os esforços e investimentos feitos no cálculo de cheias e construção de órgãos extravasores adequados. São causas frequentes de falha no funcionamento de comportas:

- Falta de energia
- Obstruções provocadas por material transportado especialmente em períodos de cheia
- Emperramento do equipamento de manobra
- Impossibilidade de acesso do pessoal de operação ao comando dos equipamentos em situações de tempestade
- Manutenção deficiente.

Além disso, durante a estação chuvosa, o reservatório deverá ser operado de tal modo que a Cheia de Projeto possa ser seguramente controlada. Para controlar esses riscos, a operação da barragem deve ser executada por pessoal qualificado e treinado, de modo a garantir um nível aceitável de condições de segurança, seguindo orientação de um manual contendo instruções e documentação com todos os requisitos para operação segura.

3.2.2- Riscos geológicos

A enorme variabilidade e surpresas dos maciços rochosos têm requerido o aparecimento de diversas metodologias associadas à definição de riscos geológicos. Atualmente existem duas componentes do risco geológico normalmente aceitas. A primeira diz respeito à ocorrência de fenômenos geológicos naturais que podem ameaçar um projeto, de maneira semelhante ao risco que afeta encostas, cidades e estradas. A segunda é a probabilidade da geologia efetivamente encontrada na obra se afastar das condições inicialmente previstas.

Na contratação e execução de obras de engenharia o conceito risco geológico está mais ligado a esta segunda componente, ou seja, à possibilidade de ocorrência de condições geológicas durante uma obra, diferentes daquelas previstas nos estudos de projeto, gerando impactos nas soluções adotadas no projeto, no prazo de execução e no custo da obra.

Normalmente associa-se o risco geológico a ocorrências imprevisíveis e/ou inevitáveis, sendo muitas vezes utilizados os termos **Incidente, Surpresa e Imprevisto Geológico** como sinônimos. Visando um entendimento comum destes termos para as obras de engenharia civil, Brito apud Castro (2008) propõe as definições resumidas na tabela a seguir:

Tabela 1 – Proposta de definição de termos associados a riscos geológicos (adaptado de Castro, 2008).

| | | |
|---------------------------------------|--|--|
| Feição geológica conhecida / prevista | Mudança geométrica: feição identificada, mas com dimensões ou orientação diferentes das previstas. | Incidente Geológico: modificações de quantitativos relativos a feições conhecidas |
| | Mudança de qualidade ou de comportamento feição encontrada, mas com propriedades ou comportamento diferentes dos previstos. | |

| | | |
|-------------------------------|---|---|
| Feição geológica desconhecida | <p>Feição previsível:</p> <p>a feição é comum, seja por associação com o tipo de maciço, seja por experiência regional.</p> | <p>Surpresa Geológica:</p> <p>ocorrência de feições geológicas não identificadas previamente, mas comumente associadas ao tipo de maciço em questão</p> |
| | <p>Feição Inesperada:</p> <p>a feição nunca foi encontrada associada ao tipo de maciço ou na região.</p> | <p>Imprevisto Geológico:</p> <p>ocorrência de uma feição geológica que não poderia ser prevista (imprevisível), ou por não estar normalmente associada às condições locais ou regionais ou por se tratar de algo não conhecido pelo meio técnico.</p> |

Internacionalmente, os casos de mudanças de condições do contrato, devido a ocorrências geológicas imprevistas e inevitáveis, já contam com uma grande experiência e jurisprudência. Analisando diversos casos de mudança de condições de contrato e pleitos ou “claims” de construtores, verifica-se que os casos de condições inesperadas do subsolo perfazem menos de 20% dos casos, mas são responsáveis por 35% dos valores pagos aos construtores. Por isso, é interessante que as definições do que será considerado como riscos geológicos estejam explícitas nos contratos de construção de barragens.

Segundo Castro (2008), dois princípios básicos devem nortear o projeto e a construção, visando minimizar os riscos:

- “Na fase de projeto”, apoiar-se no conhecimento geral da área, baseando-se em todo o arcabouço de informações locais e na experiência global em maciços semelhantes; utilizar as mais modernas técnicas de prospecção, além das tradicionais, para definir exatamente o risco em regiões localizadas;
- Na fase de construção, aplicar as técnicas mais modernas de construção associadas a mapeamentos geológicos, monitoração e controle, de maneira a assegurar que não houve negligência, e se a preocupação com a implantação técnica e bem controlada foi à diretriz primordial da obra.”

Durante a operação do empreendimento deve ser constantemente monitorada a evolução das feições identificadas nas fases anteriores do projeto, bem como a Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

integridade de tratamentos e suportes aplicados, com especial atenção às estruturas subterrâneas.

São fatores de risco geológico nas fases de projeto e construção:

- Estudos geológicos e geotécnicos insuficientes
 - Mapa geológico-geotécnico, excessivamente geológico, sem devida atenção aos parâmetros geotécnicos, com detalhamento insuficiente para o planejamento do programa de sondagens e demais etapas do projeto;
 - quantidade e qualidade das sondagem e demais investigações insuficientes, aliados a falta de interpretação dos dados geológico estruturais, levando a erros na formulação do modelo geomecânico, compreendendo desde erros de representação dos contatos e/ou interfaces, atitudes, compartimentação do maciço e descontinuidades até a desconsideração de dados relevantes, para a simplificação do modelo.
- Possibilidade de mudança nas condições geológicas de uma feição geológica prevista, ou seja, feição conhecida com condições diferentes das antecipadas nos modelos propostos. Isto pode ocorrer por mudanças geométricas (extensão e/ou orientação são diferentes das previstas), por mudança de qualidade (propriedades ou comportamento diferentes do previsto).
- Possibilidade de ocorrência de feição geológica nunca associada ao tipo de maciço e na região encontrada ou não relatada na bibliografia (desconhecida pelo estado da arte).

3.2.3- Riscos estruturais

Serão aqui considerados os principais fatores ligados ao dimensionamento estrutural e geotécnico, que podem levar a falha de estruturas da barragem na resposta aos carregamentos a elas impostas:

- Definição incorreta de carregamentos e de parâmetros de projeto.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

- Incertezas nas propriedades dos materiais, materiais estes criados pela natureza por processos randômicos. Marr (2001) nos lembra da variabilidade e limitações dos resultados de ensaios. Na maioria das vezes não é possível fazer todas as investigações e estudos pertinentes no sentido de se eliminar todas as incertezas sobre os parâmetros geotécnicos a serem utilizados no projeto. Existem limitações financeiras, físicas, de tempo e mesmo inexistência ou limitações dos ensaios existentes. Desta forma, os parâmetros de projeto são extraídos de campanhas de investigações e ensaios via de regra limitados e, muitas vezes, são extraídos de bibliografia ou de informações relativas a obras similares.
- Variabilidade natural das propriedades dos materiais de construção, adicionando-se as introduzidas pelos métodos construtivos nas características dos materiais de construção do maciço.
- Simplificações inadequadas nos modelos matemáticos.
- Falta de aplicação da tecnologia disponível por baixo conhecimento ou desatualização técnica.
- Utilização de métodos construtivos inadequados.

3.2.4- Riscos associados ao monitoramento

São aqueles relativos ao controle permanente do comportamento das estruturas por meio das atividades de auscultação de barragens (manutenção preditiva), ou seja, das inspeções visuais e da análise dos dados da instrumentação instalada:

- Inspeções visuais sem conhecimento dos aspectos de projeto e construção
- Insuficiência de instrumentação ou instrumentação não condizente com os possíveis modos de falha da barragem
- Falhas na coleta dos dados na instrumentação, com a introdução de erros nas leituras
- Demora ou falta de análise dos dados da instrumentação
- Deficiência na avaliação e gestão permanente dos riscos
- Simplificação de avaliação e gestão de riscos em PCHs (correlacionando indevidamente pequena geração com estruturas pequenas)

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

- Falta de profissionais habilitados

3.2.5- Riscos técnico-organizacionais

Tratam-se dos fatores associados à gestão dos riscos pelas empresas de projeto, construção e operação dos empreendimentos. Considerando que a gestão de riscos engloba as fases de identificação, análise, apreciação, tratamento e monitoramento dos riscos, o estabelecimento de processos organizacionais que permitam esta gestão é de suma importância.

Nas fases de Projeto e Construção, Medeiros (2008) destaca as falhas do “sistema”, infelizmente bem conhecidas, que levam ao aumento dos riscos:

- Adoção de prazos curtos como símbolo de eficiência
- Foco obsessivo na economia a qualquer preço
- Avaliação simplista do grau de complexidade e inabilitação técnica para os desafios do empreendimento
- Ingerência sobre as atividades inerentes à fiscalização e supervisão,
- Omissão em assuntos relevantes
- Problemas de comunicação entre os atores responsáveis pelo empreendimento, dentre outros.

Como exemplos de falhas técnico-organizacionais na fase de operação, podemos citar:

- Nível deficiente de avaliação e gestão permanente dos riscos
- Ingerência sobre atividades de monitoramento e controle,
- Falta de treinamento dos operadores nas regras de operação dos órgãos extravasores
- Equipe técnica pouco habilitada
- Protelação de medidas corretivas.

3.2.6- Riscos associados gestão de emergências

São aqueles relativos às respostas às emergências para se evitar uma ruptura ou, se esta for inevitável, reduzir as suas consequências na área industrial e no vale a jusante:

- Incertezas na elaboração dos PAEs (incertezas nos parâmetros de ruptura, nas propagações das ondas de cheia, nos dados topográficos, nas avaliações dos danos a jusante)
- Falhas no planejamento das ações de resposta, como na avaliação da vulnerabilidade e exposição
- Falha nos sistemas de comunicação, alerta e aviso
- Falta de mapas de zoneamento de risco para planejamento e ordenamento do uso e ocupação do solo
- Deficiência na manutenção do estado de prontidão

3.2.7- Riscos de ruptura de barragens em cascata

São aqueles causados pela possibilidade de ruptura de uma barragem, causando uma onda de cheia e transbordamento de barragens existentes a jusante, podendo levá-las à ruptura.

Quando existem várias barragens em um mesmo curso d'água, é necessário que cada empreendedor trate adequadamente os riscos impostos pelas barragens de sua propriedade, para não impor riscos adicionais às outras barragens na cascata. A onda de cheia causada por uma ruptura é, na grande maioria dos casos, maior do que as vazões de projeto dos órgãos extravasores da barragem imediatamente a jusante, pois o volume do reservatório é liberado em um pequeno intervalo de tempo. Assim, esta onda de cheia pode causar o transbordamento (“overtopping”) da barragem a jusante e ameaçar a sua estabilidade.

Este risco dependerá principalmente de:

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Volume dos reservatórios e volumes armazenados pelo conjunto de barragens no momento da ruptura, capacidade de defluência dos órgãos extravasores das barragens a jusante, amortecimento da cheia de ruptura ao longo do vale e no reservatório, tempo de viagem da onda de cheia gerada pela ruptura, tempo de identificação e notificação do evento, existência de ações previstas no PAE para esta situação de risco.

3.3 – RISCOS LIGADOS A FATORES SÓCIO-ECONÔMICOS

São riscos externos ao sistema barragem e associados às consequências humanas e econômicas no caso de ruptura.

Lembramos que, dentro o conceito de Risco ($R = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$), estes fatores são usualmente analisados como consequências da ruptura hipotética de uma barragem.

A determinação destas consequências diferencia-se de outros ramos de negócio devido ao grande impacto que exerce fora dos limites da área onde está instalada. Além dos prejuízos ao próprio negócio, os danos provocados se estendem por todo o vale a jusante onde está instalado, o que torna complexa a mensuração e agrava substancialmente o risco percebido. (Dias, 2010).

Nos estudos de riscos associados a barragens, geralmente são considerados os seguintes três grandes grupos de consequências:

- Consequências para a Segurança Pública: Mortes, lesões e doenças;
- Consequências para o Meio Ambiente: Perda de espécies e perda de habitat
- Consequências Econômicas:
 - Perda da barragem (custo de reconstrução e perda de geração)
 - Danos à propriedade (edificações, indústria, comércio e agricultura);

Danos à infraestrutura (transporte terrestre, navegação, suprimento de energia, água e esgoto);

De maneira geral, as consequências são mais altas, quanto mais próximas estiverem às ocupações humanas a jusante da barragem em questão, ou seja, o número de perda de vidas esperado é tanto maior quanto menor for o tempo para a retirada da população exposta ao risco das planícies de inundação. Segundo Dias (2010), populações em risco (PAR) que dispõem de menos quinze minutos de alerta até a chegada de uma onda de cheia sofrem danos severos; quando o tempo fica entre quinze e noventa minutos, o número de perda de vidas (LOL) se reduz estatisticamente de maneira não linear; e quando o tempo de alerta é superior a noventa minutos a taxa de auto salvamento é próxima de 100%.

Estes mesmos fatores, que são tratados como consequências de uma ruptura, também podem ser vistos como riscos ao sistema vale-barragem, uma vez que podem apresentar variações no tempo após a construção da barragem, fora do controle dos empreendedores:

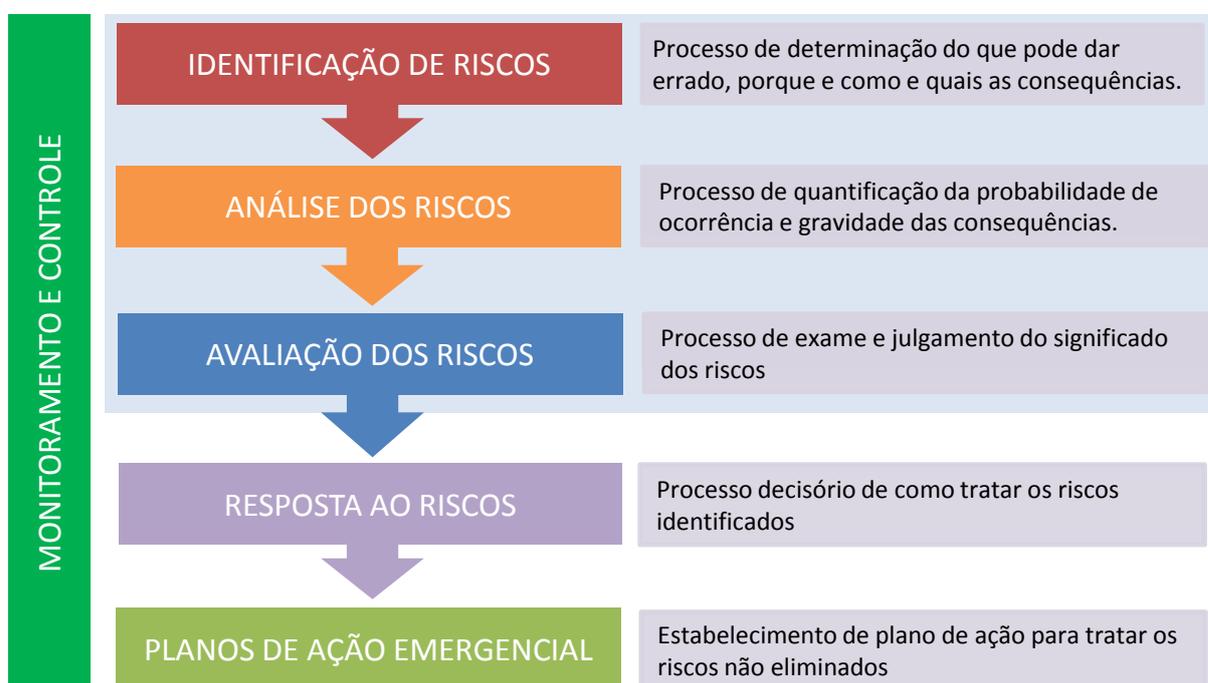
- **Aumento da população no vale a jusante**
- Ocupação indevida de áreas da planície de inundação ao longo do curso do rio a jusante da barragem.
- Aumento da infraestrutura existente a jusante (vias de acesso, instalações residenciais, agrícolas e industriais) devido ao crescimento econômico, crescimento populacional, crescimento de áreas urbanas e industriais.

4. GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS

Agora que conhecemos as principais fontes de riscos para uma barragem, vejamos como gerenciá-las dentro de processo de **operação de barragens**.

Neste contexto, a análise de risco pode ser considerada um processo sistemático composto pelas seguintes etapas:

Figura 9 - Etapas do processo de gestão de riscos em barragens



Fonte: Modificado Bowles, 2001 apud Perini, 2009.

No meio técnico de barragens, podemos verificar que as três primeiras etapas são, muitas vezes, denominadas de **Análise de Risco em Barragens**, como mostrado na definição a seguir:

“Por análise de riscos entende-se o conjunto de procedimentos referentes à identificação dos acontecimentos indesejáveis, que conduzem a materialização dos riscos, à análise dos mecanismos que desencadeiam esses acontecimentos e à determinação das respostas das estruturas e das respectivas consequências (estimativa da extensão, da amplitude e da probabilidade da ocorrência de perdas).” (Pinto, 2008).

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Neste treinamento também consideraremos estes três itens que tornam possível o exame da categorização do grau de risco de uma barragem conforme a Lei 12.334 e suas regulamentações, e a estimativa qualitativa da probabilidade de ruptura e suas consequências.

Na fase de operação, os riscos são identificados através das inspeções visuais e análise dos dados da instrumentação, informações estas analisadas nas Inspeções Regulares e nas Revisões da Segurança de Barragens, objeto de estudo anterior. Depois de identificados os riscos, iniciamos o processo de quantificação da probabilidade de ocorrência do evento indesejado e da gravidade das consequências.

Uma análise de riscos pode ser realizada de forma qualitativa, quantitativa, ou como variações destas. Segundo Perini (2009), tal escolha dependerá do detalhamento desejado, dos tipos de risco estudados, do propósito da análise e, principalmente, das informações, dados e recursos disponíveis. Na análise quantitativa as probabilidades e consequências são descritas por palavras. Na semiquantitativa, associamos valores numéricos a essas descrições. Já nas análises quantitativas, as quantificações são numéricas.

Os métodos quantitativos não devem ser tomados como mais corretos ou adequados. A análise qualitativa pode ser suficiente para alguns tipos de decisão e, muitas vezes, a única possível, seja por falta de informações numéricas sobre determinado modo de falha, seja por insuficiência de recursos e tempo. Por outro lado, a qualidade das análises quantitativas depende da precisão e qualidade dos valores numéricos e modelo de análise adotado.

Os métodos de índices e matrizes de riscos têm sido os mais utilizados nas análises de risco de barragens. A estes, somam-se algumas metodologias trazidas da engenharia mecânica que também têm tido aceitação na avaliação da probabilidade na análise do risco de barragens: Análise de Efeitos e Modos de Falha (FMEA), Análise de Árvore de Eventos (ETA) e Análise de Árvore de Falhas (FTA).

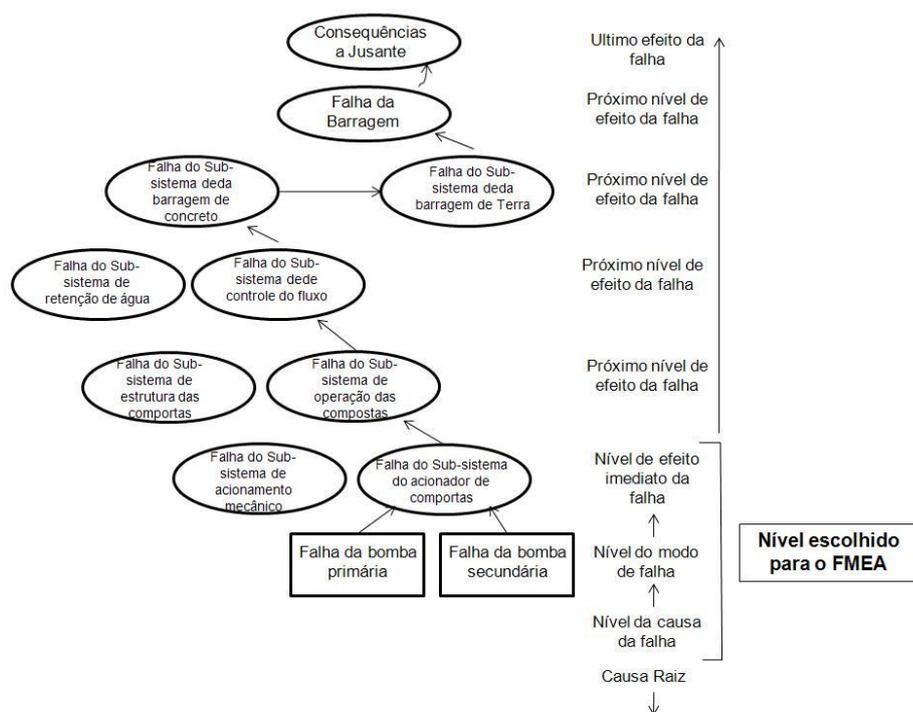
Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Análise de Efeitos e Modos de Falha (FMEA) é uma forma de análise de confiabilidade (reliability) usada para mapear as consequências de eventos específicos que podem ocorrer durante a operação de qualquer sistema de engenharia e usa essas informações para identificar e priorizar ações necessárias.

FMEA é uma técnica desenvolvida originalmente para projetos, que encontrou aplicações na análise do potencial de falha de sistemas existentes. Seu uso não fica restrito a sistemas de engenharia e já vem sendo aplicado em diversas áreas de atividades sociais, sendo a saúde um exemplo.

As técnicas do FMEA são estruturadas num fluxograma lógico que permite a operadores e especialistas usarem seus conhecimentos e informações de maneira sistemática para compreender os riscos dos sistemas. Os principais benefícios da técnica são a transparência e facilidade de auditoria.

Figura 10 – Análise de Efeitos e Modos de Falha (FMEA)



Fonte; Adaptado de ANCOLD (2003).

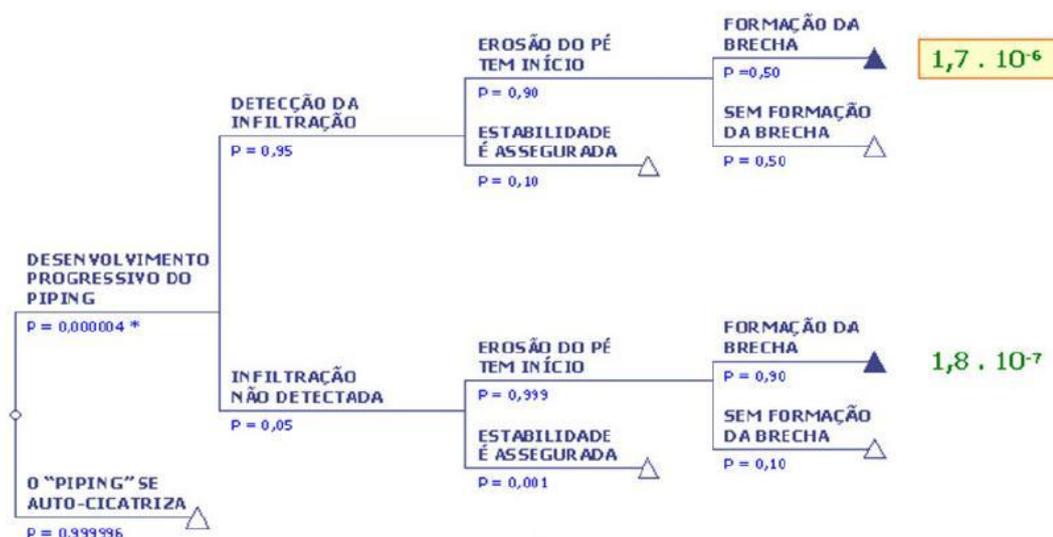
Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Análise por Árvore de Eventos (ETA) é uma das técnicas usadas por engenheiros para conduzir análises de segurança ou confiabilidade de barragens.

O método é indutivo, procura estabelecer relações entre eventos, a partir de um evento iniciador. Ele foi desenvolvido no início da década de 1970 em apoio à implementação de análises de riscos em centrais nucleares. Atualmente, é utilizado nas mais diversas áreas técnico-científicas (Ladeira, 2007).

ETA é um método lógico, qualitativo ou quantitativo, usado para identificar as possíveis saídas e, se necessário, suas probabilidades dada à ocorrência de um evento inicial (figura 11). Trata-se de uma análise indutiva, na qual as questões básicas são conduzidas para perguntas do tipo 'o acontece se...'. Por exemplo, 'o que acontece se tiver início um processo de retro erosão numa barragem de terra?'

Figura 11 – Árvore de Eventos (ETA)



Fonte: Modificado de Silveira e Machado (2005) *apud* Ladeira (2007).

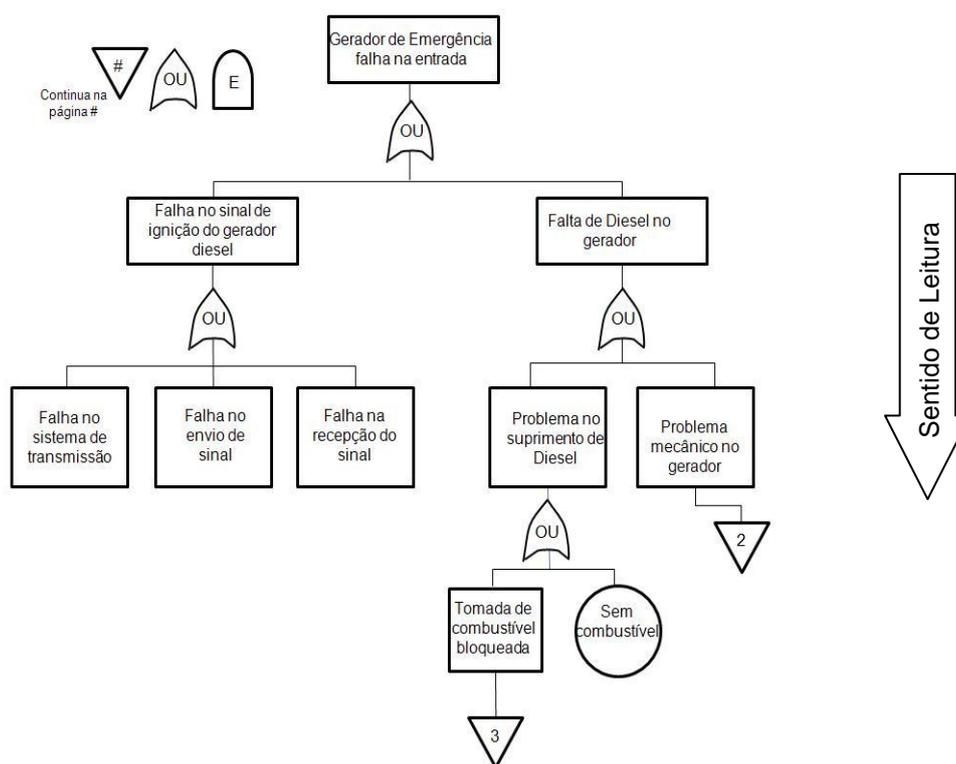
Análise da Árvore de Falha (FTA) é um método de análise de sistemas pelo qual condições e fatores que podem contribuir para um evento indesejado específico são identificados de maneira dedutível, organizados de forma lógica e representados graficamente. Diferencia-se da ETA, que é uma metodologia indutiva, ou seja, o analista conduz os eventos para uma ocorrência indesejada.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

O componente principal da FTA é a árvore de falhas, uma construção gráfica que apresenta como as interações lógicas entre os elementos de um sistema que falha por inteiro, parcialmente ou em combinação pode contribuir para uma ocorrência indesejada, como a falha do sistema.

Segundo Hartford (2004), FTA foi desenvolvida em 1961 por H. A Watson da *Bell Telephone Laboratories*. Watson e sua equipe da *Bell Labs* foram motivadas pela necessidade de avaliar a confiabilidade de sistemas de controle de sistemas de lançamento de mísseis. Posteriormente, o método foi modificado pela *Boeing* por meio do uso do computador. A técnica utilizada tem fundamentação teórica bem desenvolvida e têm sido aplicados extensivamente na avaliação de segurança e confiabilidade de sistemas como base de mísseis, processos químicos, usinas nucleares, barragens, sistemas de controle e computadores.

Figura 12 – Árvore de Falhas (FTA)



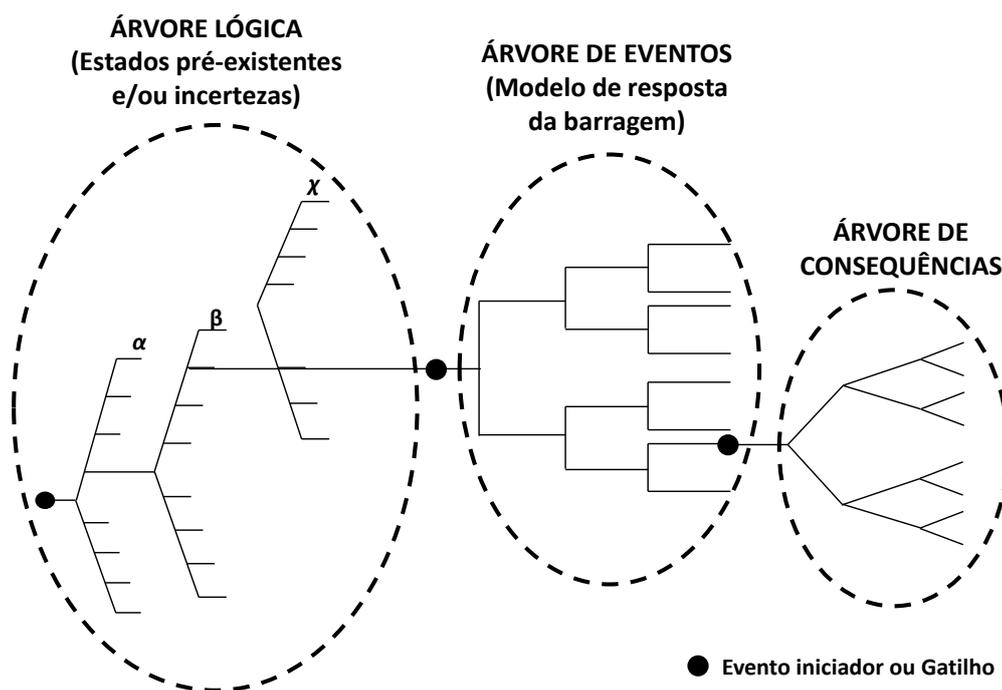
Fonte: Traduzido de ANCOLD (2003).

As análises quantitativas de riscos por métodos probabilísticos são bastante complexas, pois envolvem a análise das probabilidades em três esferas:

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

- A existência de incertezas externas e internas que possam ser o evento iniciador para um determinado modo de falha.
- A existência de fragilidades internas na resposta a este evento iniciador
- A avaliação probabilística das consequências no vale à jusante

Figura 13 – Modelagem probabilística de riscos em barragens



Fonte: Adaptado de Hartford e Baecher, 2004.

Dada à relativa complexidade dos métodos de análise quantitativa de riscos, os métodos mais usuais de análise de risco qualitativas ou semi-quantitativas são os **métodos de índices, associados ou não a matrizes de riscos**. Têm sido utilizados na análise de risco de um portfólio de barragens, assumindo diferentes formas não padronizadas, podendo ser citados como exemplos (Pimenta, 2011):

- Risk Based Profiling System (USBR, 2001)
- The global risk index (ICOLD, 1982)
- Lafitte index (Lafitte, 1996).

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Os riscos são avaliados de forma simplificada, utilizando índices, criados especificamente para cada necessidade. O “Global Risk Index”, por exemplo, utiliza três índices parciais:

- Índice externo e ambiental (sismicidade, instabilidade de taludes no reservatório, cheias superiores a de projeto, operação do reservatório e ações ambientais agressivas)
- Índice de confiabilidade (dimensionamento estrutural, fundações, capacidade de descarga e manutenção)
- Índice de consequências humanas e econômicas no caso de ruptura (capacidade de armazenamento do reservatório e instalações a jusante)

Figura 14 – Tabela de Índices do GRI

| Índices | Fatores (descritores) | |
|--|-----------------------|---|
| Índices externos ou ambientais (E): (Fatores externos ou de casualidade) | α_1 | Sismicidade (em função da aceleração sísmica) |
| | α_2 | Escorregamento de taludes no reservatório (probabilidade) |
| | α_3 | Cheias superiores às de projeto (probab.) |
| | α_4 | Gerenciamento do armazenamento do reserv. |
| | α_5 | Ações ambientais agressivas (clima, água, etc.) |
| Índices de Confiabilidade (F): (Fatores internos ou de vulnerabilidade) | α_6 | Dimensionamento estrutural |
| | α_7 | Fundações (características) |
| | α_8 | Órgãos de descarga (confiabilidade) |
| | α_9 | Manutenção (qualidade) |
| Consequências potenciais humanas e econômicas em caso de ruptura (R): | α_{10} | Volume do reservatório (m3) |
| | α_{11} | Instalações a jusante (tipo de ocupação) |

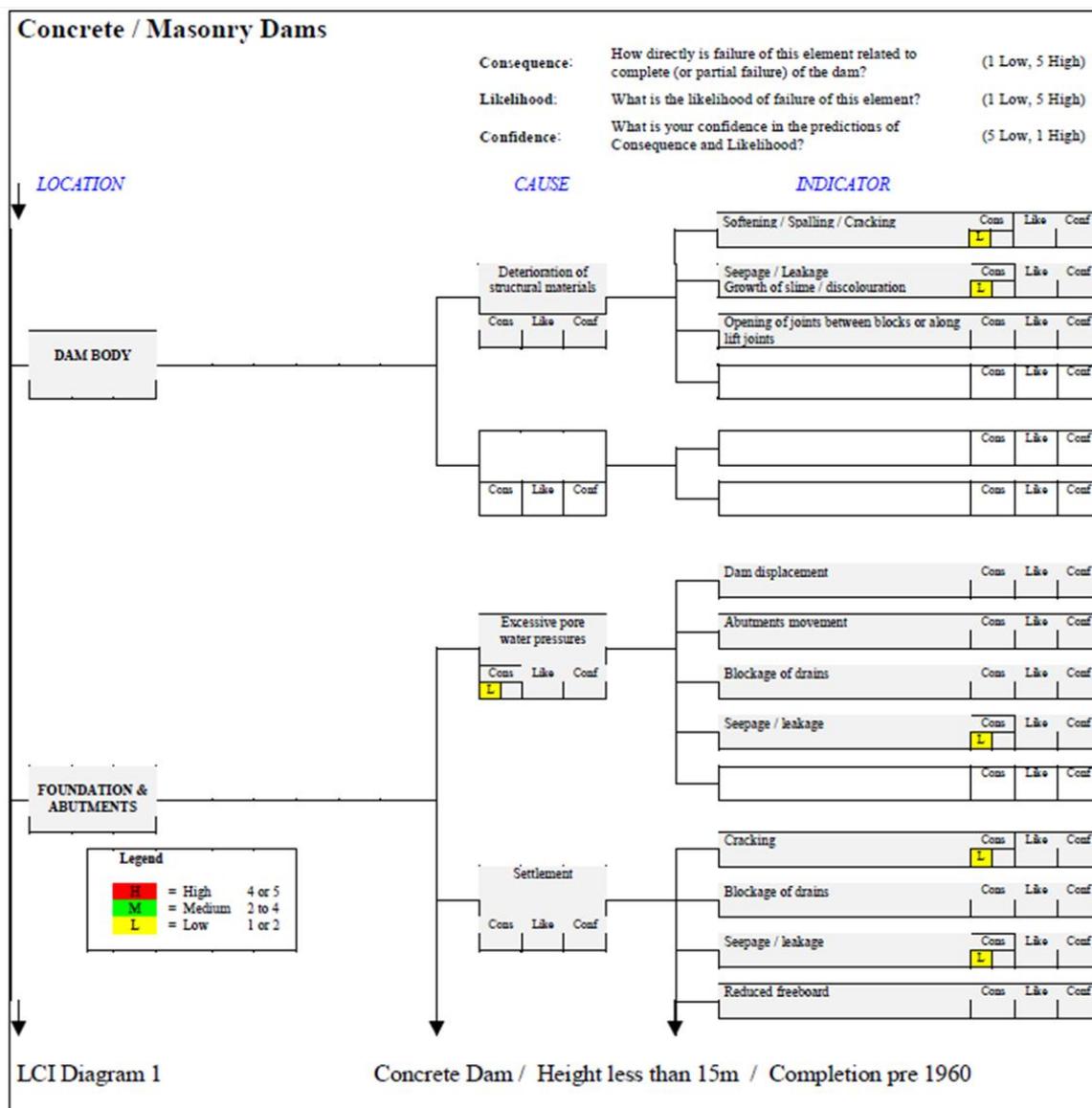
Fonte: ICOLD, 1995

Este método, por sua simplicidade de utilização e por permitir uma visão macro dos riscos associados a um portfólio de barragens, é o proposto e que vem sendo regulamentado para atendimento à Lei 12.334/2010, que estabelece a Política Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Nacional de Segurança de Barragens. Como este método é particularizado para aplicações específicas, passaremos a seguir a estudá-lo já dentro do contexto da Lei e respectiva regulamentação.

Podemos citar ainda outra metodologia qualitativa de análise de risco, conhecida pela sigla LCI, de Localização, causa e indicadores de falha. Nesta metodologia o responsável pela inspeção ou pela análise de risco determina, para cada anomalia apontada, sua localização, a causa provável e qual a importância do elemento afetado para a segurança da estrutura, a probabilidade dele realmente falhar e a confiabilidade do meio de detecção da anomalia (Figura 15). Então, o índice não fornece uma informação quantitativa, mas aponta de maneira qualitativa a importância da anomalia para o sistema, como também subsidia a tomada de decisão.

Figura 15 – Tabela do LCI



Fonte: Risk and Reservoirs in the UK. Mark Morris, Henry Hewlett2 Craig Elliott

5. GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS SEGUNDO A LEI 12.334/2010

Segundo a lei 12.331/2010, a gestão do risco de barragens em âmbito nacional será conduzida de acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens (artigo 6º) e, especificamente para cada barragem, através do Plano de Segurança da Barragem (artigo 8º). Estes dois artigos são apresentados a seguir:

Art. 6º São instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens:

- I - o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;**
- II - o Plano de Segurança de Barragem;
- III - o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB);
- IV - o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima);
- V - o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
- VI - o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;
- VII - o Relatório de Segurança de Barragens.

Art. 8º O Plano de Segurança da Barragem deve compreender, no mínimo, as seguintes informações:

- I – identificação do empreendedor;
- II – dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, inclusive, no caso de empreendimentos construídos após a promulgação desta Lei, do projeto como construído, bem como aqueles necessários para a operação e manutenção da barragem;
- III – estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem;

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

- IV – manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem;
- V – regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;
- VI – indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da barragem;
- VII – Plano de Ação de Emergência – PAE, quando exigido;
- VIII – relatórios das inspeções de segurança;
- IX – revisões periódicas de segurança.

Como podemos observar, os itens necessários uma gestão adequada de riscos está contemplada no dispositivo legal, em especial na fase de operação. Apesar de não citados explicitamente, o projeto, construção e manutenção adequados estão incluídos nas Revisões de Segurança, tornando completo o conjunto de elementos necessários:

Figura 16 – Elementos para gestão de riscos em barragens segundo a Lei 12.334/2010.



Fonte: Nota do autor.

6 AVALIAÇÃO DE RISCOS EM BARRAGENS SEGUNDO A LEI 12.334/2010

A classificação de barragens segundo o risco tem como finalidades principais:

- Servir como ferramenta de análise preliminar das condições de segurança da barragem: a análise é capaz de identificar as características e condições da barragem que contribuem para sua vulnerabilidade;
- Identificar informações adicionais necessárias para reduzir as incertezas;
- Possibilitar o estabelecimento das periodicidades de monitoramento das estruturas através das inspeções regulares e revisões de segurança.
- Avaliar as opções de redução de risco.
- Comunicar o risco: a quantificação do risco informa aos tomadores de decisão a gravidade do risco e suas potenciais consequências;
- Servir como motivador para a implementação de ações de segurança de barragens;
- Apoiar na alocação de recursos, pois indica as prioridades de acordo com a classificação relativa do risco.

A Lei 12.334/2010 determina a classificação das barragens no artigo 7º, a seguir:

Seção I – Da Classificação

Art. 7º As barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

§ 1º A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento do plano de segurança de barragem.

§ 2º A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas

humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

Podemos observar que o texto da Lei de certa forma conduz à utilização do método de análise de risco por índices ou matrizes de classificação, visto por nós anteriormente. Os índices a serem utilizados para atendimento à Lei seriam:

Tabela 2: Critérios para classificação de barragens segundo a Lei 12.334/2010

| Índices principais | | Índices |
|---------------------------------------|-----|--|
| Categoria de risco | CT | Características Técnicas |
| | EC | Estado de Conservação |
| | PS | Atendimento ao Plano de Segurança |
| Categoria de dano potencial associado | DPA | Potencial de perdas de vidas humanas |
| | | Impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura |
| Volume do reservatório | | Volume do reservatório |

Estes critérios foram regulamentados pelo CNRH por meio da **Resolução nº 143**, de 10 de julho de 2012, que “Estabelece os critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume em atendimento ao art. 7º da Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010”.

Esta regulamentação confere operacionalidade a determinados dispositivos da Lei de Segurança de Barragens, tornando efetiva a classificação das barragens de acordo com os três critérios definidos.

Para o atendimento ao parágrafo 1º do art.7º, foram estabelecidas as Matrizes de Características Técnicas, Estado de Conservação e Atendimento ao Plano de Segurança de Barragens. Para o atendimento ao parágrafo 2º do mesmo artigo, foi estabelecida a Matriz de Dano Potencial Associado.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Retomando o conceito básico de risco:

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$$

Neste caso, os índices CT, EC e OS teriam a função de quantificar a probabilidade de falha da barragem (observa-se a utilização de certa forma errônea do termo Categoria de Risco), ou seja:

$$\text{Risco} = \text{Categoria de risco} \times \text{Categoria de dano potencial associado}$$

$$\text{Risco} = (\text{CT} + \text{EC} + \text{PS}) \times \text{DPA}$$

Concluimos que a proposta de classificação proposta pela Lei e regulamentada pelo CNRH é uma ferramenta de análise de riscos simples, mas que permite uma visão panorâmica da segurança das barragens brasileiras, abrindo o caminho para decisões de estudos mais aprofundados nesta área.

Passaremos agora a analisar cada índice incluído nas Matrizes de Classificação de Barragens regulamentadas pelo CNRH, dando uma visão crítica dos fatores definidos na matriz e apresentando uma proposta de como avaliá-los, de forma a permitir a análise de riscos de uma barragem utilizando esta ferramenta.

7. CATEGORIA DE RISCO

Os fatores relacionados para determinação da Categoria de Risco das barragens são aqueles que buscam estimar por meio de aspectos técnicos e organizacionais a probabilidade de ruptura da estrutura, separados em Características Técnicas, Estado de Conservação e Atendimento ao Plano de Segurança de Barragens.

7.1. Características Técnicas

Iniciaremos pelo índice CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, cujo objetivo seria identificar características das barragens que determinariam, a priori, estruturas mais ou menos seguras. Em outras palavras, independentemente dos riscos associados ao projeto, construção ou manutenção das estruturas, uma barragem apresentaria determinado **potencial de risco** dadas as suas características técnicas básicas.

Tabela 3 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco (acumulação de água) –
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT

| Altura (a) | Comprimento (b) | Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c) | Tipo de Fundação (d) | Idade da Barragem (e) | Vazão de Projeto (f) |
|---------------------------|------------------------------|---|--|--|--|
| Altura ≤ 15m (0) | Comprimento ≤ 200m (2) | Concreto Convencional (1) | Rocha sã (1) | entre 30 e 50 anos (1) | Decamilenar ou CMP (Cheia Máxima Provável) - TR = 10.000 anos (3) |
| 15m < Altura < 30m (1) | Comprimento > 200m (3) | Alvenaria de Pedra / Concreto Ciclópico / Concreto Rolado - CCR (2) | Rocha alterada dura com tratamento (2) | entre 10 e 30 anos (2) | Milenar - TR = 1.000 anos (5) |
| 30m ≤ Altura ≤ 60m (2) | - | Terra Homogenea /Enrocamento / Terra Enrocamento (3) | Rocha alterada sem tratamento / Rocha alterada fraturada com tratamento (3) | entre 5 e 10 anos (3) | TR = 500 anos (8) |
| Altura > 60m (3) | - | - | Rocha alterada mole / Saprolito / Solo compacto (4) | < 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4) | TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10) |
| - | - | - | Solo residual / aluvião (5) | - | - |

$$CT = \sum (a \text{ até } f)$$

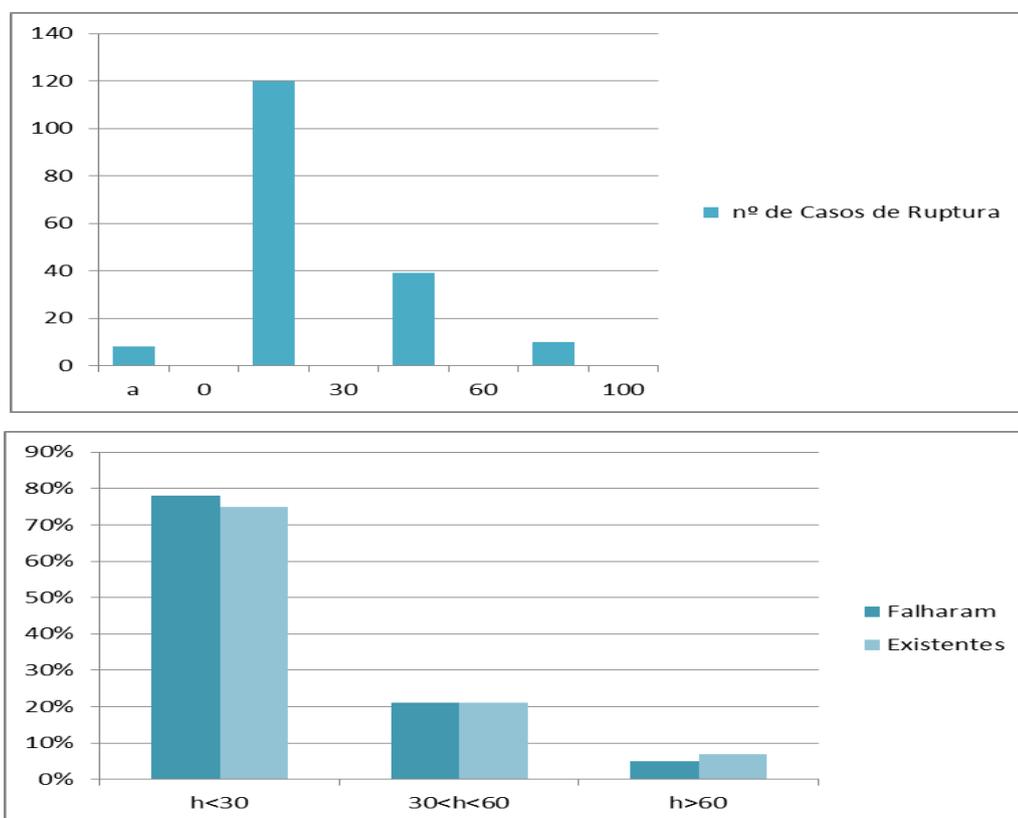
Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Vamos analisar detalhadamente cada um dos fatores da matriz de Características Técnicas, que determinariam um “potencial de risco” associado à determinada barragem.

Altura

Os gráficos a seguir, extraídos do Boletim 99 (ICOLD, 1995), mostram o número de rupturas pela altura da barragem. Constatamos que ocorrem mais casos de rupturas em barragens de pequena altura. Possivelmente isto se explicaria pela baixa percepção do risco em estruturas menores, levando ao projeto e construção de qualidade inferior e ao monitoramento insuficiente na fase de operação. Entretanto, comparando o percentual de barragens existentes por altura, verificamos que o percentual de ruptura praticamente independe deste fator.

Figura 17- Correlações entre número de barragens rompidas até 1988 e sua altura



Fonte: ICOLD (1995).

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

No caso da Matriz, quanto maior a altura, maior a pontuação, ou seja, uma estrutura maior implicaria num maior potencial de risco. Este raciocínio é aceitável, considerando o potencial de dano a jusante é maior no caso de barragens mais altas.

Como avaliar: A altura é geralmente definida como a diferença entre a elevação nominal da crista e a elevação do ponto mais baixo da fundação, mesmo que este não esteja sob a crista, não sendo considerados muros, mesmo quando utilizados como parte do freeboard (Critério do Registro Mundial de Barragens, do ICOLD).

Quando não existirem informações de projeto e construção da barragem, a altura poderá ser calculada como a diferença entre a cota da crista e a cota mais baixa da linha da barragem, cota mais baixa da fundação medida no local.

Comprimento

Este tipo de associação não é usual nos estudos estatísticos de ruptura de barragens. Entretanto, dentro da mesma lógica anterior, barragens mais longas estariam sujeitas a um potencial de risco maior pela sua extensão permitir uma maior variabilidade nos materiais de fundação e de construção.

Como avaliar: Considerar a extensão total do barramento, de ombreira a ombreira sobre a crista da barragem. No caso um barramento único (contínuo) constituído por mais de um tipo de barragem (por exemplo, barragem de concreto no leito do rio e barragens de terra nas ombreiras), considerar a soma dos comprimentos, ou seja, o comprimento total do barramento.

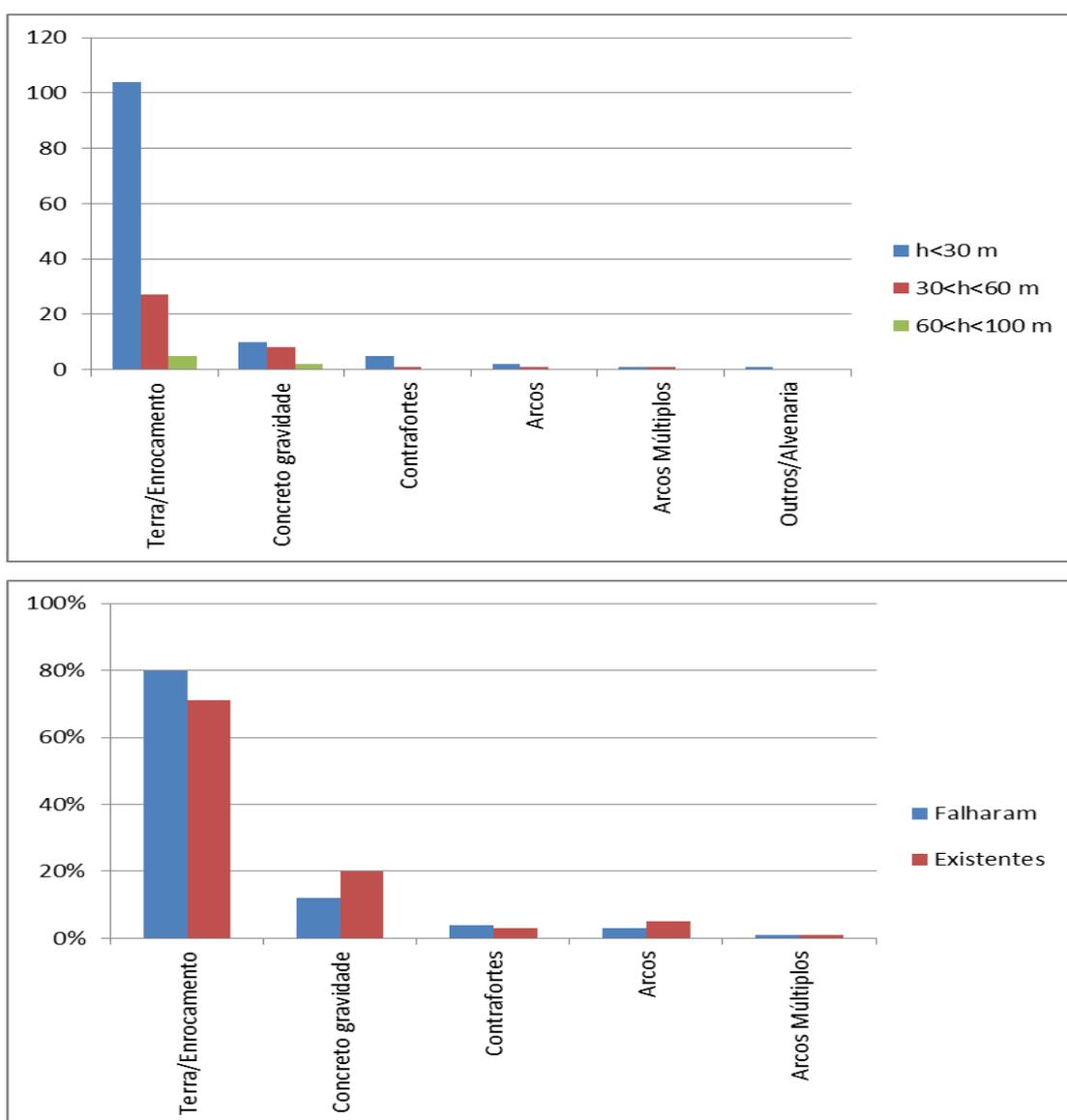
7.2 Tipo da Barragem quanto ao Material de Construção

Este é um fator que sempre é analisado nos estudos estatísticos de rupturas de barragens. O maior número de casos de ruptura ocorre em barragens de terra e enrocamento, levando a uma falsa percepção de que este tipo de barragens seria muito mais “insegura” que barragens de concreto.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Entretanto, raciocinando em termos de percentual de barragens existentes de cada tipo e incluindo o fator altura nesta análise, observamos que esta não é uma verdade absoluta. Estatisticamente, o percentual de falhas em barragens de terra e enrocamento é realmente maior, mas esta diferença é em parte compensada pela quantidade e altura das estruturas, como mostrado nas figuras a seguir:

Figura 18- Correlações entre número de barragens rompidas até 1988 e tipo de material de construção



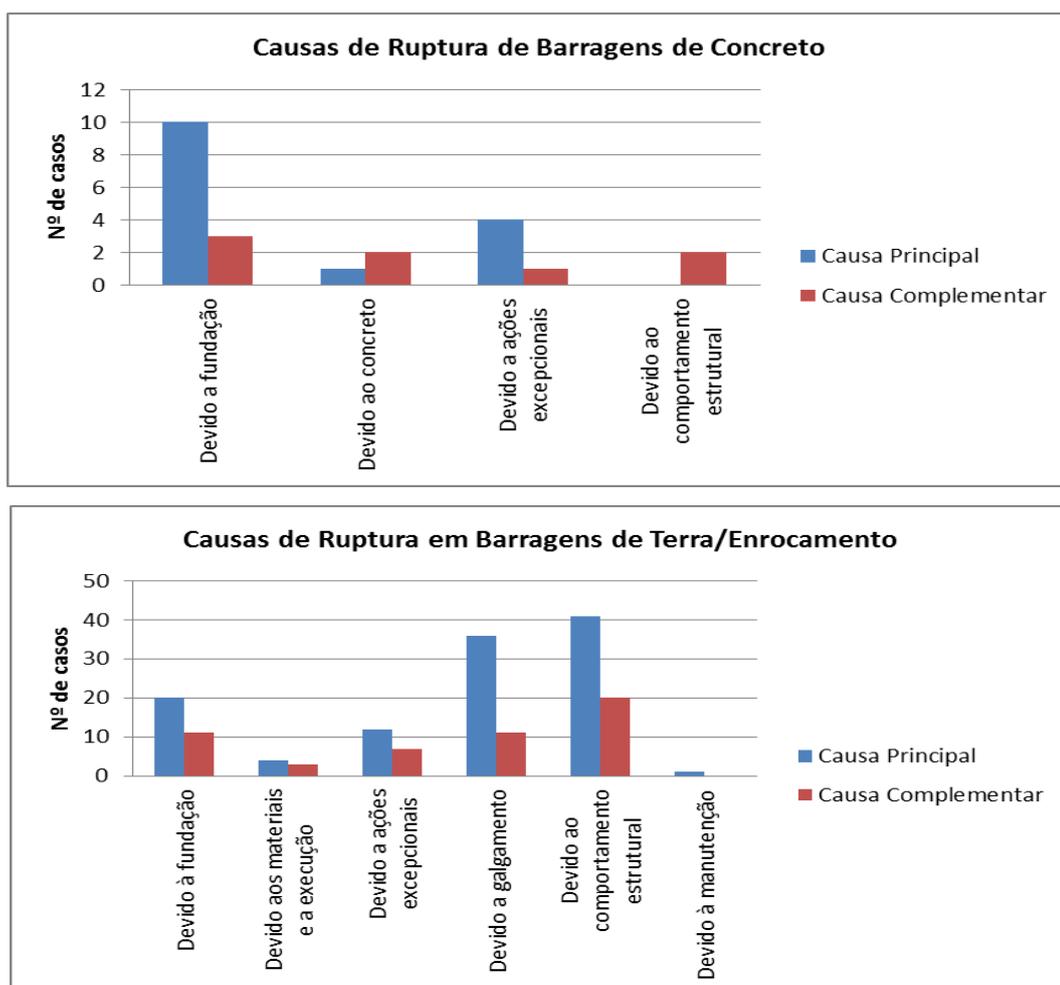
Fonte: Segundo o ICOLD (1995).

Como avaliar: Como, no caso de uma ruptura, esta ocorrerá no ponto mais frágil da barragem, considerar a combinação mais desfavorável do Tipo de barragem x Altura. Assim, ao preencher a planilha, considerar a altura da barragem considerada.

7.3 Tipo de Fundação

Todos os estudos de causas de ruptura em barragens mostram a importância do tipo de fundação e seu tratamento para a segurança. No caso de barragens de concreto, a causa principal de ruptura está associada a problemas de fundação, com destaque para resistência ao cisalhamento e erosão interna. No caso de barragens de terra/enrocamento, a fundação também se destaca como causa de rupturas, embora os maiores “vilões” sejam o galgamento (*overtopping*) e erosão interna.

Figura 19- Causas de ruptura de barragens



Fonte: Adaptado de ICOLD, 1995.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

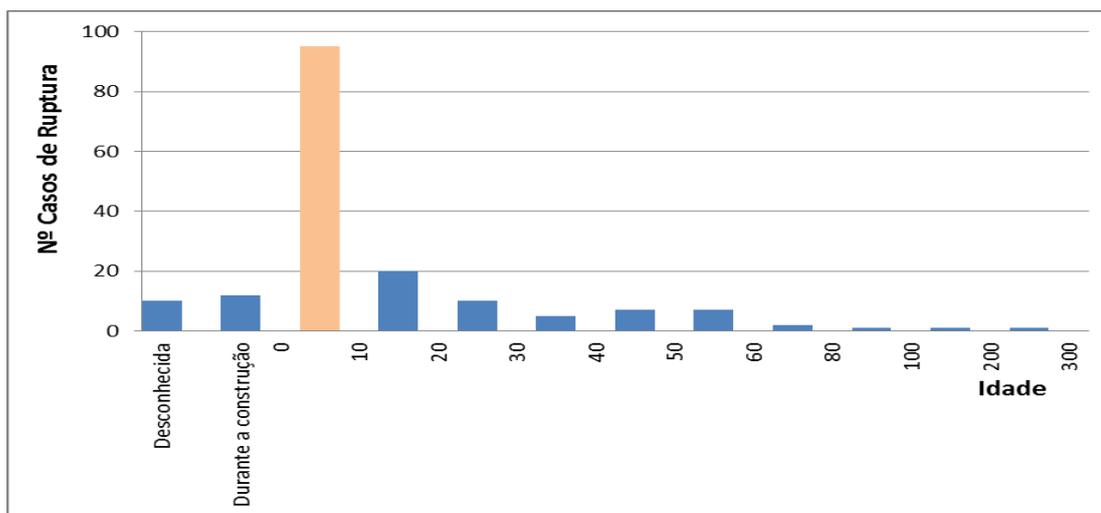
Logo, concluímos que este fator é adequado, pois podemos correlacionar o tipo de fundação de uma barragem com a sua probabilidade de ruptura.

Como avaliar: Dada a importância deste fator e considerando que a ruptura de uma barragem se dará sempre no ponto de maior fragilidade, deverá ser considerado o tipo de fundação mais desfavorável.

7.4 Idade da Barragem

Este é um fator bastante interessante, no sentido que as estatísticas indicam claramente que o maior risco existe para as barragens com até 10 anos de idade. Entretanto, as barragens com idade inferior a 5 anos ou superior a 50 anos são as pontuadas mais desfavoravelmente na matriz de Características Técnicas.

Figura 20- Idade de ruptura de barragens



Fonte: Adaptado de ICOLD, 1995.

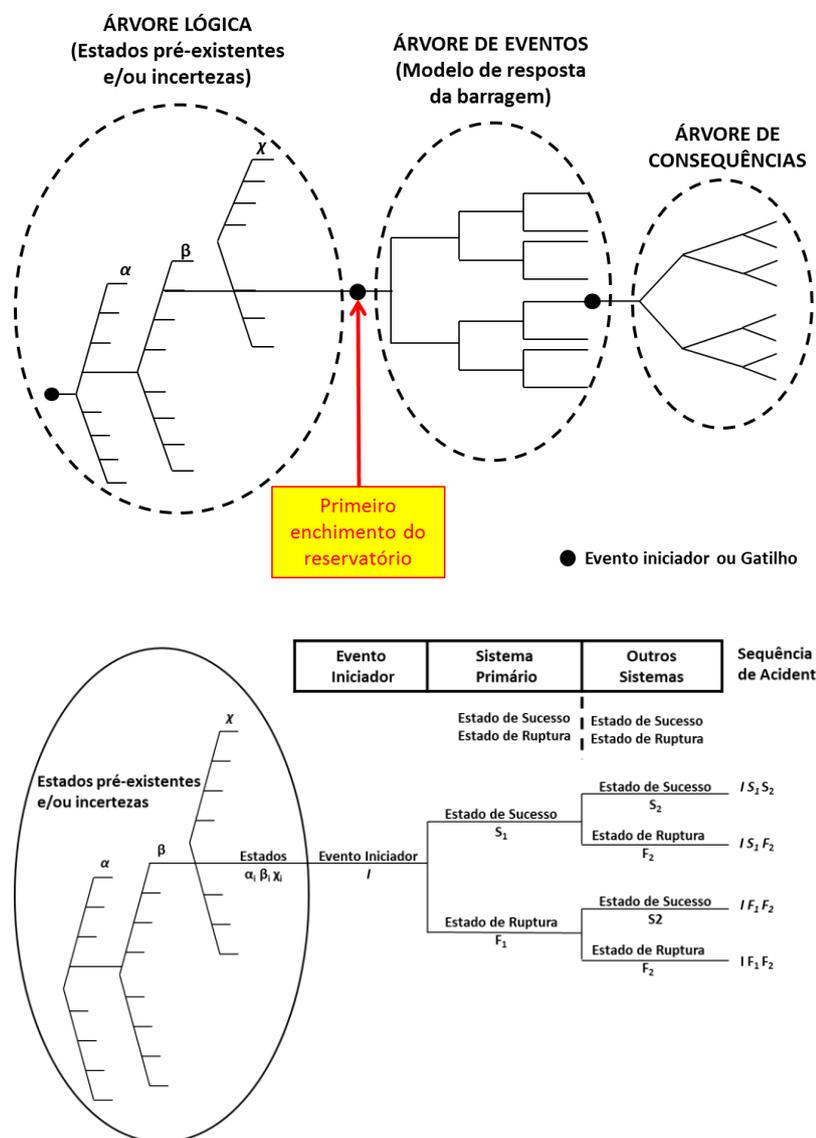
O grande número de rupturas nos primeiros anos de operação pode ser explicado pelo fato do carregamento da barragem e suas fundações ocorrer durante o primeiro enchimento do reservatório. Este carregamento poderá ser o gatilho para um modo de falha associado a eventuais deficiências de projeto e construção. Adicionalmente, as equipes de monitoramento muitas vezes ainda não detêm todo o conhecimento necessário sobre a barragem e podem subestimar a necessidade de uma ação

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

emergencial.

De forma esquemática, a figura a seguir mostra a existência de estados e/ou incertezas intrínsecos ao sistema barragem/fundação, dados por limitações no conhecimento, projeto e construção. Um evento, como o primeiro enchimento do reservatório, poderá se o gatilho para o desenvolvimento de um modo de falha que poderá levar à ruptura da barragem.

Figura 21- Árvore lógica de estados que condicionam a árvore de eventos, mostrando o primeiro enchimento do reservatório como um possível evento iniciador ou gatilho



Fonte: Modificado de Hartford e Baecher, 2004.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

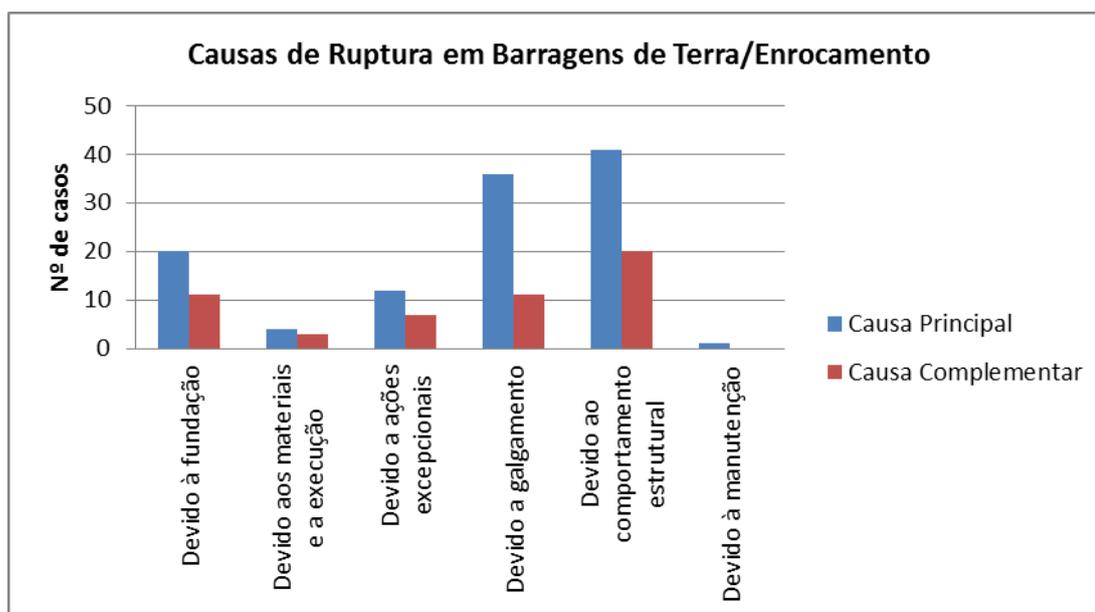
Como avaliar: Contar a idade da barragem a partir do início do enchimento do reservatório ou, caso esta informação seja inexistente, do início de operação.

7.5 Vazão de Projeto

Como já discutido amplamente nos fatores de risco, os riscos hidrológicos são de grande relevância, especialmente para as barragens de terra, incapazes de suportar galgamento. A partir das estatísticas do ICOLD sobre ruptura de barragens Ramos e Melo, 2006 *apud* Colle, 2008, o mais antigo citado pelo mais recente conclui que a insuficiente capacidade de vazão ou o mau funcionamento dos órgãos de descarga de cheias representam cerca de 42% das causas de rupturas de barragens. No caso das barragens de aterro com altura inferior a 15 metros esta proporção sobe para 77%.

Daí a importância da inclusão deste índice na matriz de classificação, em especial para as barragens de terra e/ou enrocamento, onde o galgamento se apresenta como uma das principais causas de ruptura.

Figura 22- Causas de ruptura de barragens de terra/enrocamento



Fonte: Adaptado de ICOLD, 1995

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Como avaliar: Considerar a vazão de projeto dos órgãos extravasores, incluindo a capacidade do vertedouro principal, descarregadores de fundo e vertedouros auxiliares, quando existentes. A capacidade de amortecimento da cheia de projeto poderá ser considerada.

8 ESTADO DE CONSERVAÇÃO

Este índice tem por objetivo mensurar a **vulnerabilidade (ou confiabilidade)** das estruturas, ou seja, avaliar a probabilidade de ruptura de uma barragem com base nas inspeções visuais, dados da instrumentação e avaliação geral do comportamento das estruturas.

A maioria dos estudos de risco publicada sobre segurança de barragens foca em três categorias de possíveis modos de falha Lafitte, 1993 *apud* HARTFORD, 2004:

- Falha hidráulica devido a níveis anormais:
Inclui galgamento e subsequente erosão do aterro da barragem, tombamento de barragens tipo gravidade e deslizamento pela fundação. Falhas hidráulicas incluem, ainda, danos a comportas de vertedouros ou erros de operação associados a comportas e vertedouros.
- Movimentação de Massa:
Causada por carregamentos extraordinários, propriedades inadequadas de materiais ou falhas geológicas não detectadas. Inclui limite de estabilidade dos aterros de barragem, liquefação dos solos de fundação, percolação ou instabilidade de fundações, deslizamento da face de montante devido a rebaixamento rápido.
- Deterioração e erosão interna:
Inclui desenvolvimento de caminhos preferenciais no aterro e “piping” (retroerosão ou erosão interna) no núcleo da barragem e erosão de solos de fundação ou juntas.

Estes principais modos de falha são comprovados estatisticamente, como verificado por Ramos e Melo, 2006 *apud* COLLE 2008 analisando as estatísticas do ICOLD sobre ruptura de barragens:

- cerca de 42% do número total de rupturas de barragens é devida à insuficiente capacidade de vazão ou o mau funcionamento dos órgãos de descarga de cheias
- cerca de 23% das rupturas estão relacionadas com as fundações (percolação, erosão interna), com as erosões localizadas e com o deficiente comportamento estrutural.

Assim, os principais modos de falha justificam a escolha dos fatores definidos na matriz regulamentada pelo CNRH, apresentada na Tabela 4:

Tabela 4 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco (acumulação de água) – ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC

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

$$EC = \sum (g \text{ até } m)$$

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Concluimos que os fatores escolhidos para a avaliação do estado de conservação da barragem são satisfatórios, com as seguintes considerações e ressalvas:

- **Confiabilidade das estruturas extravasoras:** fator que busca avaliar o risco de ruptura por falha hidráulica, ou seja, pelo galgamento das estruturas. É de grande importância, pois não adiantaria termos vertedouros bem dimensionados se não estiverem em condições de operação quando solicitados. Os principais problemas que podem ser encontrados são falhas nos equipamentos eletromecânicos (incluindo manutenções deficientes, avarias nos equipamentos ou sistemas de alimentação e de comando), falta de energia para abertura de comportas, obstruções provocadas por materiais transportados em períodos de cheia e erosões nas estruturas ou a jusante que impeçam sua operação.
- **Confiabilidade das estruturas de adução:** fator que busca avaliar o risco de ruptura de uma estrutura de adução, permitindo a liberação de volume significativo do reservatório para jusante. Este fator é especialmente importante quando não existem estruturas de controle de vazão a montante de canais de adução e de condutos enterrados, implicando na impossibilidade de fechar a entrada de água quando detectado qualquer problema. Portanto, apesar de não explicitado na matriz, devemos atentar para a existência de tubulações e galerias enterrados no corpo da barragem e o posicionamento das estruturas de controle de vazão destes condutos (a montante ou a jusante do corpo da barragem). A existência de um conduto enterrado dificulta a compactação na sua proximidade, podendo criar um caminho preferencial de percolação, além de um possível recalque do maciço ou fundação poder causar a ruptura do próprio conduto.
- **Percolação:** este fator visa avaliar a possibilidade de ruptura por *piping* pelo maciço ou fundação (risco de ruptura por erosão interna) ou por vazamentos sem controle por juntas de construção ou entre blocos. A matriz apresenta, de

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

forma explícita, apenas evidências visuais como umidade e surgências com ou sem carreamento para avaliação de falhas por percolação. Entretanto, indiretamente propõe a instrumentação de barragens como forma de diagnóstico e acompanhamento de alterações nas poropressões e/ou nas vazões percoladas, para análise da probabilidade de ocorrência deste modo de falha.

- **Deformações e recalques:** este fator busca avaliar a existência de problemas estruturais associados a deformações, tanto em estruturas de terra quanto em concreto e avaliar o risco de ruptura por movimentação de massa. No caso de barragens de terra, está incluída neste fator a avaliação de trincas e deformações causadas por deslizamentos, por recalques do maciço ou fundação, por deslocamentos diferenciais, dentre outros. No caso de barragens de concreto, inclui-se neste fator a avaliação de deformações do concreto por reações expansivas (reação álcali-agregado por exemplo) e a avaliação de trincas estruturais causadas por esforços de tração, insuficiência de armadura, recalques diferenciais, recalque de fundação, dentre outros.
- **Deterioração de taludes/paramentos:** este fator busca avaliar a probabilidade de ruptura por erosão superficial de um talude ou deterioração do concreto dos paramentos. Em barragens de terra, avalia a existência de falha na proteção superficial de taludes, presença de vegetação sobre o maciço e junto ao pé da barragem, que poderiam criar caminhos preferenciais de percolação ou causar a obstrução de sistema de drenagem, a existência de sulcos de erosão causados por águas pluviais, depressões causadas pela movimentação ou degradação de blocos de enrocamento, depressões no talude de montante causadas por ondas no reservatório. Em barragens de concreto, avalia a existência de erosões no concreto, eventualmente com a presença de ferragem exposta, trincas de retração.

- **Eclusa:** a existência de uma eclusa, por si só, não torna uma estrutura mais ou menos segura. Eventuais problemas associados à existência de uma
- Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

eclusa já poderiam ser avaliados pelos demais fatores existentes na matriz: possibilidade de percolações indevidas no contato estrutura da eclusa/barragem de terra e/ou enrocamento (já avaliado pelo fator Percolação), recalques diferenciais entre as estruturas (já avaliado pelo fator Deformações e recalques) etc. Entretanto, a matriz de classificação propõe uma análise à parte desta estrutura, uma vez que sua ruptura também poderia levar à liberação de vazão significativa para jusante.

Como avaliar: Utilizar a pontuação da matriz, a partir da inspeção de campo e avaliação da gravidade das deteriorações observadas e das medidas de controle que estão sendo tomadas para cada uma delas.

Os dados da instrumentação civil instalada deverão ser utilizados para avaliar os valores absolutos, evolução e tendências dos níveis d'água, poropressões, vazões percoladas, deformações, movimentos diferenciais, abertura/fechamento de juntas e trincas. Estudos de tensão e deformação, de percolação e de estabilidade poderão ser necessários para o diagnóstico da gravidade de determinado problema identificado.

A nota máxima deverá ser dada quando a deterioração impactar diretamente a segurança das estruturas, ou seja, quando o problema observado colocar em risco sua estabilidade estrutural.

Podemos concluir que a análise de riscos utilizando a matriz de Estado de Conservação é de certa forma simplista, pois não explicita a necessidade de informações aprofundadas sobre o projeto e construção (critérios de projeto, materiais empregados, técnicas construtivas, por exemplo). Entretanto, pode ser considerada satisfatória devido à facilidade de utilização e por forçar uma reflexão sobre os possíveis modos de falha de cada estrutura componente de uma barragem.

9 ATENDIMENTO AO PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

Este índice tem por objetivo avaliar a qualidade da gestão dos riscos associados à barragem pelo empreendedor, utilizando seguintes fatores, apresentados na matriz Plano de Segurança de Barragens:

Tabela 5 - Matriz de classificação quanto à categoria de risco (acumulação de água) –
PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS – PS

| Existência de documentação de projeto (n) | Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem (o) | Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p) | Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q) | Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r) |
|--|--|--|--|---|
| Projeto executivo e "como construído" (0) | Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0) | Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0) | Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0) | Emite regularmente os relatórios (0) |
| Projeto executivo ou "como construído" (2) | Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4) | Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3) | Não (6) | Emite os relatórios sem periodicidade (3) |
| Projeto Básico (4) | Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8) | Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5) | - | Não emite os relatórios (5) |
| Anteprojeto ou Projeto conceitual (6) | - | Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6) | - | - |
| Inexiste documentação de projeto (8) | - | - | - | - |

$$PS = \sum (n \text{ até } r)$$

Vamos conhecer e analisar como avaliar cada um destes fatores:

- **Existência de documentação de projeto:** a disponibilidade de informações sobre projeto e construção é essencial para o entendimento do comportamento das estruturas e para permitir análises e avaliações de segurança.

Como avaliar: Utilizar a pontuação da matriz. No caso de barragens antigas, onde inexitem ou são desconhecidos os projetos, o empreendedor poderá fazer

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

um levantamento cadastral das estruturas para obter: a geometria, informações sobre as fundações e materiais de construção. O grau de detalhamento deste levantamento depende da complexidade das estruturas, mas deve permitir a análise de estabilidade global do barramento e a determinação da capacidade dos órgãos extravasores. O conjunto destes estudos poderá ser considerado como “projeto básico” (“*as is*”) para fins de pontuação, ou, no caso pouco provável da obtenção de um volume substancial de informações, até mesmo um “projeto como construído” (“*as built*”).

- **Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem:** o fluxo de informações sobre a segurança da barragem deve estar estruturado, para que o monitoramento contínuo das estruturas seja assegurado e para que medidas corretivas, quando necessárias, sejam tomadas em tempo hábil. É importante que as responsabilidades dos diversos atores (leituristas, engenheiros responsáveis pelas inspeções regulares, responsáveis pela análise da instrumentação, auditores e consultores externos, proprietário) estejam bem definidas, bem como os fluxos de informação e tomada de decisão.

Como avaliar: Utilizar a pontuação da matriz. A Lei 12.334/2010, no Artigo 17, inciso V trata de manter serviço especializado em segurança de barragem e entendemos que não exige que os técnicos responsáveis pela segurança da barragem façam parte do quadro da empresa, mas sim que exista uma estrutura que assegure a gestão dos riscos, com responsabilidades bem definidas.

- **Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento:** estes procedimentos devem ser específicos para cada barragem e englobam as atividades de manutenção preditiva, visando antecipar possíveis riscos para o empreendimento.

Como avaliar: Deverá ser verificada a existência de procedimentos documentados para os roteiros de inspeção e monitoramento da barragem

(locais a serem inspecionados e itens a serem verificados). No caso de barragens instrumentadas, deverão existir procedimentos documentados para coleta dos dados da instrumentação. Deverá ser verificada a realização das atividades conforme metodologia e periodicidades previstas nestes procedimentos.

- **Regra operacional dos dispositivos de descarga:** define as regras de operação das comportas, visando proteger o barramento de um possível galgamento, sem agravar as condições de cheia a jusante.

Como avaliar: Utilizar a pontuação da matriz, que é binária e não deixa margens para interpretações.

- **Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação:** documentos que consolidam as informações sobre a segurança da barragem, avaliando de forma integrada os dados obtidos por meio das inspeções visuais e dados da instrumentação instalada, quando pertinente.

Como avaliar: Utilizar a pontuação da matriz, avaliando se os relatórios vêm sendo emitidos de acordo com a periodicidade prevista. Da forma como previsto na matriz, não é avaliado o nível de aderência do conteúdo dos relatórios com a regulamentação específica.

10 CATEGORIA DE DANO POTENCIAL ASSOCIADO

Este índice busca quantificar as consequências causadas pela eventual ruptura da barragem. A determinação dos danos decorrentes da ruptura de uma barragem é normalmente feita por meio da simulação computacional do evento e da avaliação de sua extensão e impactos no vale a jusante. Mesmo com tal ferramenta, a determinação da consequência e a graduação de danos não é uma tarefa simples, essencialmente no que se refere à perda de vidas humanas.

A Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012, no art. 5º, define “os critérios gerais a serem utilizados para a classificação quanto ao dano potencial associado na área afetada”:

- I- existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;
- II- existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários;
- III- existência de infraestrutura ou serviços;
- IV- existência de equipamentos de serviços públicos essenciais;
- V- existência de áreas protegidas definidas em legislação;
- VI- natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados;
- VII- volume.

Estes fatores são agrupados em uma matriz de classificação quanto ao dano potencial associado (Tabela 6), similar à proposta pela COPAM (Minas Gerais), para barragens de rejeito, através das Deliberações Normativas DN nº 62 de 17/12/2002 e DN nº 87 de 17/06/2005, considerando os seguintes fatores para fins de classificação:

- Volume total do reservatório
- Potencial de perdas de vidas humanas
- Impacto ambiental
- Impacto socioeconômico

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Tabela 6 - Matriz de classificação quanto ao Dano Potencial Associado – DPA
(acumulação de água)

| Volume Total do Reservatório para barragens de uso múltiplo ou aproveitamento energético (s) | Potencial de perdas de vidas humanas (t) | Impacto ambiental (u) | Impacto sócio-econômico (v) |
|--|---|--|--|
| PEQUENO < = 5hm ³ (1) | INEXISTENTE (Não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área a jusante da barragem) (0) | SIGNIFICATIVO (quando a área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3) | INEXISTENTE (Quando não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0) |
| MÉDIO 5 a 75hm ³ (2) | POUCO FREQUENTE (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local. (4) | MUITO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5) | BAIXO (quando existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem) (4) |
| GRANDE 75 a 200hm ³ (3) | FREQUENTE (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas. (8) | - | ALTO (quando existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8) |
| MUITO GRANDE > 200hm ³ (5) | EXISTENTE (Existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas. (12) | - | - |
| DPA = ∑ (s até v) | | | |

10.1 Volume total do reservatório

Este fator não se refere diretamente às consequências advindas da ruptura hipotética da barragem, mas corresponde a um potencial de dano. No entanto, como as consequências estão associadas ao volume de água liberado para jusante numa eventual ruptura e como não existe mapa de inundação elaborado para a maioria das barragens brasileiras com a indicação das áreas alagadas nesta situação, a inclusão deste fator pode ser considerada importante.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Como avaliar: considerar o volume total no NA máximo normal. No caso de diques, considerar o volume do reservatório acima da cota da fundação, que é o volume possível de ser liberado no caso de ruptura desta estrutura.

10.2 Potencial de perda de vidas humanas

Pela sua relevância e dificuldade de mensuração quando da ocorrência de uma catástrofe, o fator perda de vidas pode ser considerado o mais importante na análise de consequência de uma ruptura.

O número de fatalidades decorrentes de uma ruptura é função, dentre outros fatores, do número de pessoas que ocupam a planície de inundação, nível de preparação das pessoas expostas ao evento e severidade da inundação.

Como itens determinantes da severidade da inundação, citamos:

- **Altura máxima a ser atingida pelo nível d'água (H)**
Almeida 1999 *apud* BALBI 2008 citando casos reais de inundação quase estática nos países baixos, indica que para $H > 3,5\text{m}$ as pessoas atingidas em geral não sobrevivem, enquanto que para $H < 2\text{m}$, existe forte probabilidade de sobrevivência (possibilidade de evacuação vertical).
- **Tempos de chegada da frente da onda de cheia (importante nos tempos de alerta e evacuação) e tempo de chegada da altura máxima de água (T)**
Muitos trabalhos sobre o tema determinam parâmetros de estimativa de perda de vidas com base na capacidade de auto salvamento das pessoas expostas ao risco, se avisadas a tempo. Alguns estudos indicam que, quando o tempo de alerta é superior a noventa minutos, a taxa de auto salvamento é próxima de 100%, como mostrado na tabela 7.
Com base nestas informações, existem várias propostas de estimativa do número de vítimas esperado em função do tempo de alerta, como a proposta do Bureau of Reclamation.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Tabela 7 – Casos de Ruptura de Barragens

| Localização | Ano | População em Risco | Perda de Vidas | Horas de Alerta |
|---------------------------------|------|--------------------|----------------|-----------------|
| Baldwin Hills, CA | 1963 | 16500 | 5 | 1,5 |
| Bearwallow, NC | 1976 | 4 | 4 | 0 |
| Big Thompson, CO | 1976 | 2500 | 139 | <1,0 |
| Black Hills, SD | 1972 | 17000 | 245 | <1,0 |
| Buffalo Creek, WV | 1972 | 4000 | 125 | <1,0 |
| Bushy Hill Pond, CT | 1982 | 400 | 0 | 2,3 |
| Denver, CO | 1965 | 3000 | 1 | 3 |
| DMAD, UT | 1983 | 500 | 1 | 1,12 |
| Kansas City, Ks | 1977 | 1000 | 25 | <1,0 |
| Kansas River, Ks | 1951 | 58000 | 11 | >1,5 |
| Kelly Barnes, GA | 1977 | 250 | 39 | <0,5 |
| Laurel Run, PA | 1977 | 150 | 40 | 0 |
| Lawn Lake, CO | 1982 | 5000 | 3 | <1,5 |
| Lee Lake, MA | 1968 | 80 | 2 | <1,0 |
| Little Dear Creek, UT | 1963 | 50 | 1 | <1,0 |
| Malpasset, França | 1959 | 6000 | 421 | 0 |
| Mohegan Park, CT | 1963 | 500 | 6 | 0 |
| Swift and Two Medicine Dams, MT | 1964 | 250 | 27 | <1,5 |
| Northern, NJ | 1984 | 25000 | 2 | >2 |
| Prospect Dam, CO | 1980 | 100 | 0 | >5 |
| Teton, ID | 1976 | 2000 | 7 | <1,5 |
| Texas Hill Country | 1978 | 1500 | 25 | <1,5 |
| Vega DeTera, Espanha | 1959 | 500 | 150 | 0 |

Fonte: USBR, 1999 *apud* Balbi, 2008.

- **Risco hidrodinâmico**

Alguns autores consideram que os principais parâmetros para classificação dos danos provocados por uma cheia induzida por reservatórios são a profundidade da cheia (H) e a sua velocidade de propagação (V). A ameaça provocada por esses fatores combinados corresponde ao Risco Hidrodinâmico, dado em m^2/s , cujas consequências são apresentadas na tabela 8.

$$\text{Risco Hidrodinâmico} = H \times V$$

Tabela 8 – Definição das consequências do risco hidrodinâmico

| Parâmetro HxV (m^2/s) | Conseqüências |
|-----------------------------|---|
| <0,5 | Crianças e deficientes são arrastados |
| 0,5 – 1 | Adultos são arrastados |
| 1 – 3 | Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas fracas |
| 3 – 7 | Danos estruturais em edifícios e possível colapso |
| > 7 | Colapso de certos edifícios |

Fonte: Synaven *et al.*, 2000 *apud* Balbi, 2008.

Como podemos ver, a análise do potencial de perdas de vida decorrentes da ruptura de uma barragem é um exercício bastante complexo. O estudo deve ser feito com base em mapas de inundação desenvolvidos num contexto de incertezas. A definição do tempo de chegada da onda de cheia, por exemplo, é função do tipo de ruptura e formação da brecha, potencial gravitacional da água acumulada, volume do reservatório, topografia e características do vale a jusante. Além disso, vimos que a estimativa do número de perdas de vida demanda estudos e análises que vão além da elaboração do mapa de inundação.

No entanto, uma primeira avaliação deste fator muitas vezes necessitará ser feita sem a existência do mapa de inundação. Neste caso, BALBI (2008) relata que algumas legislações permitem estudos de ruptura simplificados para a avaliação preliminar de danos a jusante e cita algumas sugestões das áreas a jusante a serem avaliadas. Estas simplificações devem ser empregadas com cautela, pois desconsideram todos os pontos discutidos anteriormente.

Tabela 9 – Alguns exemplos de distâncias a serem avaliadas a jusante

| | |
|---|--|
| Finlândia | 50km a jusante |
| Graham (<i>Bureau of Reclamation, 1999</i>) | 30km a jusante, distância a partir da qual não haveria mais riscos a vidas humanas |
| NRM - Natural Disaster Organization (<i>Australia, 1992</i>) | Para reservatórios com $V > 0,2 \text{hm}^3$, considerar uma distância de propagação maior que 5km, para $V > 2 \text{hm}^3$, 20km e para $V > 20 \text{hm}^3$, igual a 60km. |
| Québec (<i>Dam Safety Act, 2007</i>) | Adicionar a profundidade do reservatório à cheia de projeto com recorrência de 100 anos, até um ponto de atenuação. |

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Como avaliar: A delimitação da área que seria afetada pela ruptura de uma barragem e a identificação de suas características para fins de avaliação do potencial de perdas de vidas humanas deve ser baseada nos estudos de ruptura.

No caso de inexistência de estudo de ruptura e mapa de inundação para a barragem em avaliação, verificar em imagens aéreas a existência de habitações permanentes, rodovia municipal, estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas até o ponto de atenuação ou restrição, como a confluência com um grande lago, rio ou outra barragem.

10.3 Impacto ambiental

Este fator busca avaliar a área afetada pela ruptura hipotética de uma barragem sob o ponto de vista de impacto ambiental. É considerada a existência de áreas de interesse ambiental e áreas protegidas em legislação específica.

Como avaliar: analisar as informações disponíveis no SIGEL-ANEEL e em sistemas de informações estaduais, como por exemplo o Geosisemanet (Minas Gerais), considerando impacto muito significativo quando a área afetada pela barragem estiver inserida em uma unidade de conservação, área indígena ou o rio seja classificado como de proteção permanente.

10.4 Impacto socioeconômico

Este fator avalia a severidade dos impactos socioeconômicos decorrentes da eventual ruptura de uma barragem, levando em consideração a existência de instalações residenciais, comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada à jusante ou instalações portuárias ou serviços de navegação.

Como avaliar: verificar a existência de instalações residenciais, comerciais, industriais, agrícolas e serviços de navegação e turismo na área afetada pela barragem por meio de imagens aéreas, preferencialmente considerando o mapa de inundação.

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

11 ANÁLISE FINAL DE RISCOS

Finalmente, para a definição da Categoria de Riscos e Dano Potencial Associado, o CNRH utiliza a métrica empírica apresentada na tabela a seguir:

Tabela 10 - Classificação das barragens de acumulação de água quanto à categoria de risco e dano potencial

| | |
|-----------------------------|--|
| NOME DA BARRAGEM | |
| NOME DO EMPREENDEDOR | |
| DATA: | |

| II.1 - CATEGORIA DE RISCO | | Pontos |
|---|--------------------------------------|---------------|
| 1 | Características Técnicas (CT) | |
| 2 | Estado de Conservação (EC) | |
| 3 | Plano de Segurança de Barragens (PS) | |
| PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS | | 0 |

| FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO | CATEGORIA DE RISCO | CRI |
|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| | ALTO | > = 60 ou EC*=8 (*) |
| | MÉDIO | 35 a 60 |
| | BAIXO | < = 35 |

(*) Pontuação (8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

| II.2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO | | Pontos |
|--|--|---------------|
| DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA) | | 0 |

| FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO | DANO POTENCIAL ASSOCIADO | DPA |
|-------------------------|---------------------------------|--------------|
| | ALTO | > = 16 |
| | MÉDIO | 10 < DP < 16 |
| | BAIXO | < = 10 |

RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:

| | |
|---------------------------------|--|
| CATEGORIA DE RISCO | |
| DANO POTENCIAL ASSOCIADO | |

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

Observe que a Categoria de Risco é obtida pela soma dos pontos obtidos nas matrizes de Características Técnicas, Estado de Conservação e Plano de Segurança de Barragens, sendo que a pontuação (8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente em CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

Finalmente, podemos concluir que a CLASSIFICAÇÃO DA BARRAGEM QUANTO À CATEGORIA DE RISCO E DANO POTENCIAL regulamentado pelo CNRH, apesar de conduzir a uma análise de riscos bastante simplificada, cumpre os principais objetivos de uma classificação de barragens.

É uma ferramenta de análise preliminar capaz de identificar as características e condições da barragem que contribuem para sua vulnerabilidade e possibilita a avaliação de opções de redução de risco. Além disso, facilita a comunicação do risco para os tomadores de decisão, seja na esfera empresarial, governamental ou para a sociedade, apesar de reconhecermos a dificuldade de compreensão da real situação de uma barragem pelos diferentes públicos.

Deve-se sempre ter em mente que o resultado numérico de uma análise de riscos não incrementa a segurança da estrutura analisada. Mas deve orientar estudos adicionais, pesquisas, a priorização de obras de reparo e a alocação de recursos.

CONCLUSÕES

O conhecimento das fontes de riscos para a segurança é muito importante no desenvolvimento de estratégias de minimização de riscos nas várias fases da vida de uma barragem. É essencial que a gestão do projeto, construção e operação assegure que as incertezas sejam adequadamente balanceadas com julgamento técnico competente.

Da quantificação (análise quantitativa) do risco não decorre diretamente a melhoria do processo de gerenciamento da manutenção. Nos processos de análise quantitativa, assim como naqueles de análise qualitativa, a mensuração da probabilidade está estritamente ligada à capacidade de avaliação do profissional responsável e sua eficácia está relacionada à capacidade de subsidiar as decisões que garantirão a segurança da barragem.” (Dias, 2010)

É fundamental considerar sempre que a análise do risco é apenas uma etapa no processo de gerenciamento que não se encerra em si, ou seja, de nada vale a evolução do estudo baseado nesta análise se for perdido de vista o foco na manutenção da segurança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à equipe de Segurança de Barragens da Cemig GT, Adelaide de Carvalho Carim, Paula Luciana Divino e Alexandre Vaz de Melo, pela troca de ideias e inúmeros debates. À geóloga Laurenn Wolochate A. de Castro, da gerência de expansão civil da geração, pela redação do texto sobre Riscos Geológicos e ao eng.º Luiz César Botelho, da gerência de planejamento hidrometeorológico pela redação do texto sobre Riscos Hidrológicos.

Agradeço às engenheiras geotécnicas Paula Luciana Divino e Adelaide Linhares de Carvalho Carim e ao engenheiro Diego Antônio Fonseca Balbi pelas discussões sobre o tema e colaboração na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASCE, (2000), Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance, Library of Congress, USA.

BALBI, Diego A.F. (2008). Metodologia para a Elaboração de Planos de Ação Emergencial para Inundações Induzidas por Barragens. Estudo de caso: Barragem de Peti-MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

BIEDERMANN, R. (1997). Safety Concept for Dams: Development of the Swiss concept since 1980. Wasser, Energie, Luft, 89: 55-72.

CASTRO, L.W.A. (2008). Risco geológico-geotécnico associado a projetos de implantação de PCHs: caso da PCH Cachoeirão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

COLLE, G.A. (2008). Metodologias de Análise de Risco para Classificação de Barragens segundo a Segurança. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.

DIAS, G.G. (2010). Proposta de metodologia de avaliação qualitativa da segurança de barragens com base no risco. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

FONSECA, A.R. (2003). Auscultação por Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento para Geração de Energia Elétrica – Estudo de Caso das Barragens da UHE São Simão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, pp. 6-47.

FOSTER, M., **SPANNAGLE**, M., **FELL**, (1998). Report on the Analysis of Embankment Dam Incidents. The University of South Wales, pp 35.

Gazette Officielle du Québec. Dam Safety Regulation - Dam Safety Act. (2007).

HARTFORD, D.N.D., **BAECHER**, G.B. (2004). Risk and Uncertainty in Dam Safety. CEA Technologies Dam Safety Interest Group. Thomas Telford Ltd., London.

HARTFORD, D.N.D., **BAECHER**, G.B. (2004). Risk and Uncertainty in Dam Safety. CEA Technologies Dam Safety Interest Group. Thomas Telford Ltd., London.

ICOLD (1995). Dam Failures Statistical Analysis, Bulletin 99: 1-73.

ICOLD (1995). Dam Failures Statistical Analysis, Bulletin 99: 1-73.

MARR, A.W. (2001). Why Monitor Geotechnical Performance. Disponível em: <<http://www.geotest.com/Papers/Why%20Monitor%20Geotechnica%20Performance.pdf>>

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI.

MEDEIROS, C.H. (2008). Fatores de risco em barragens: técnicos e operacionais. In: 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados, Salvador. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/documentos/CHMedeiros-Fatores%20de%20Risco.pdf>

MORRIS, M., Hewlett, H., Elliott, C. Risk and Reservoirs in the UK.

MULCAHY, R. (2010). Risk Management- Tricks of the Trade for Project Managers and PMI-RMP Exam Prep Guide, RMC Publications Inc, USA.

PERINI, D. S. (2009). Estudo dos processos envolvidos na análise de risco de barragens de terra. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Brasília.

PIMENTA, L., CALDEIRA, L., NEVES, M. (2011). Preliminary Risk Analysis of Dam Portfolio in Operation. In: 6th International Conference on Dam Engineering, LNEC, Lisbon, Portugal.

PINTO, A.V. (2008). Gestão de Riscos e Segurança de Barragens. In: 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados, LNEC, Lisboa, Portugal.

UnB (2012-1). Sismicidade Brasileira. Disponível em: <http://vsites.unb.br/ig/sis/sisbra.htm>

UnB (2012-2). Sismicidade Induzida. Disponível em: <http://vsites.unb.br/ig/sis/induzido.htm>