

AVALIAÇÃO DE RISCO GEOLÓGICO EM BARRAGENS



HENRIETH VIVIANE BORGIO DE OLIVEIRA

*Geóloga formada pelo Instituto de Geociências, Unicamp. Campinas, SP, Brasil
E-mail: henrieth.oliveira@geoklock.com.br*

LUIZ FERREIRA VAZ

*Themag Engenharia, São Paulo, SP.
Ex-Prof. Vistante, Inst. Geociências, Unicamp. Campinas, SP, Brasil
E-mail: vaz@themag.com.br*

CELSO DAL RÉ CARNEIRO

*Instituto de Geociências, Unicamp.
Caixa Postal 6152, CEP 13083-970, Fax +55 (19) 3289 1562, Campinas, SP, Brasil
E-mail: cedrec@ige.unicamp.br*

ABSTRACT RESUMO

The safety of concrete dams, earthfill dams or rockfill dams is necessary to protect life, the environment and buildings. However, anthropogenic interference contributes to trigger intense and more frequent risks, because it speeds up or it changes the course of geological processes. In order to identify risks and prevent accidents, evaluation and analysis of geological risk are an essential procedure. This paper summarizes knowledge on the subject and practical methods for evaluation and analysis of geological risk in dams. As the geological phenomena can not be analyzed by mere statistics series, it is required to analyze and to evaluate all the possible variables, both objectively and subjectively, using common sense and the previous experience of decision makers. Not only a choice between the best alternatives for prevention of risk is needed, but it is necessary to select objective tools to present the results. In the analysis of geological risk we have used the technique of Fault Tree Analysis (FTA); evaluation has been produced using a geological risk matrix, which considers a detailed classification based on three quantification criteria: chance, dangerousness and severity. The results seem to be useful, but still rely on practical implementation to be improved.

A segurança de barragens de concreto, terra ou enrocamento, é necessária para proteger a vida, o ambiente e as edificações; entretanto, a interferência antrópica pode desencadear riscos intensos e frequentes, na medida em que acelera ou altera o curso de processos geológicos. Para detectar e prevenir acidentes, é essencial a avaliação e análise de risco geológico. O artigo sintetiza conhecimentos e métodos práticos para avaliação e análise de risco geológico em barragens, a partir de levantamento bibliográfico e de relatos práticos de especialistas. Deve-se lembrar que os fenômenos geológicos não podem ser analisados por meras séries estatísticas, sendo necessário analisar e avaliar objetiva e subjetivamente as possíveis variáveis, empregando-se bom senso e a experiência dos tomadores de decisão. Além da escolha das melhores alternativas para prevenção do risco é necessário selecionar ferramentas objetivas para apresentar os resultados. Empregou-se a técnica de Análise por Árvore de Falhas e foi elaborada uma matriz de risco geológico, contendo classificação mais detalhada, baseada em três critérios de quantificação: possibilidade, periculosidade e gravidade. Os resultados parecem úteis, mas ainda dependem de aplicação prática para ser aprimorados.

1 INTRODUÇÃO

A retenção de grandes volumes de água em barragens proporcionou melhor qualidade de vida à humanidade e contribuiu para a evolução da Geologia de Engenharia. Uma barragem precisa ser segura ao longo de toda a sua vida útil, uma vez que interfere nos processos geológicos e pode desencadear riscos, os quais podem se intensificar devido ao aumento das ações antrópicas. Isso exige atenção dos responsáveis pelos empreendimentos, tanto nas etapas de construção como na fase de operação.

A construção de barragens impõe diversas solicitações aos maciços geológicos. A principal solicitação é o empuxo hidráulico, resistido pelo peso da barragem e pela fundação. A estanqueidade do reservatório, a sismicidade natural ou induzida e a percolação de água são exemplos de solicitações, avaliadas pela Geologia de Engenharia, que podem interferir na estabilidade da barragem. Outros fatores que também podem comprometer uma barragem são a qualidade e o comportamento mecânico-hidráulico dos materiais naturais: de acordo com a estrutura atingida, pode haver desde pequenos atrasos na construção até a inviabilização da obra. As ações do intemperismo sobre os materiais naturais, associadas a falhas, fraturas, zonas de cisalhamento e ocorrência de sismos são fatores identificados como **risco geológico**.

Acidentes em barragens têm origem em algum tipo de anormalidade, a qual, se detectada, pode ser diagnosticada como capaz de resultar em acidente, ou até mesmo provocar ruptura (MEDEIROS, 1999); conseqüentemente, a avaliação de riscos que podem ocorrer na construção depende de investimentos em melhoria estrutural, monitoramento e manutenção. Empreendimentos com custo de segurança baixo requerem nível aceitável de risco que é, em geral, definido pela seguradora da obra (ICOLD, 2001). O cumprimento das medidas necessárias para construção do empreendimento com custo baixo não garantirá redução do grau de incerteza.

Os processos geológicos nem sempre se enquadram nas condições propostas pelos modelos matemáticos, ou seja, os fenômenos naturais não atendem à objetividade requerida em abordagens

da engenharia, desse modo, é preciso utilizar a probabilidade subjetiva, ou seja, aplicar um método no qual as informações possam conter “pistas” que permitam aferir condições de risco. Os procedimentos muitas vezes se baseiam na sensibilidade e na intuição do intérprete.

O presente artigo descreve procedimentos de avaliação de risco geológico em barragens e busca quantificá-los em função dos efeitos sobre o processo construtivo e a operação. A síntese de conhecimentos e métodos práticos originou-se da literatura e de relatos práticos de especialistas em avaliação de risco geológico. Utilizou-se matriz proveniente de organizações que fazem avaliação de risco, considerando dez fatores de risco geológico que podem ocorrer em barragens, associados a condicionantes, como: esforços atuantes, percolação de água e estabilidade das paredes de escavação. Os fatores que podem desencadear os riscos ultrapassam as categorias alto, médio e baixo, tendo sido criada uma classificação detalhada, a partir da aplicação de três fatores de quantificação: possibilidade, periculosidade e gravidade. Para possibilidade e periculosidade foram estabelecidas cinco classes, divididas em notas; a multiplicação das notas resulta no fator gravidade. Os resultados da análise de gravidade permitem estabelecer três intervalos de risco: aceitável, preocupante e inaceitável.

O desenvolvimento da matriz de risco foi apoiado na realização de uma Análise por Árvore de Falhas (AAF), técnica que permite identificar causas potenciais de um acidente. A AAF foi criada a partir de causas básicas, tais como: vazamentos e instabilidade ou defeitos no tratamento do maciço, falha na avaliação da estanqueidade e sismos. São situações que interferem no quadro geral de condicionantes geológicos e podem levar até mesmo ao rompimento da barragem.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS

As primeiras barragens construídas tiveram a finalidade de armazenar água para garantir consumo durante períodos de seca. Entretanto, o desenvolvimento da tecnologia e a demanda por mais intensa utilização dos recursos hídricos trouxeram novas aplicações; hoje a construção de

barragens é destinada principalmente ao abastecimento de água, à geração de energia, ao controle de cheias dos rios, à contenção de rejeitos de mineração ou industriais e à recreação.

Na avaliação de risco foram consideradas as barragens de concreto, terra ou enrocamento. Nas etapas de construção, os principais mecanismos associados a condições geológicas são deslizamento de taludes, erosão tubular regressiva (*piping*) e fissuramento. Deslizamentos de taludes podem manifestar-se ao longo da obra tanto a jusante, devido a infiltrações, quanto a montante pelo rebaixamento do nível da água do reservatório. Fenômenos de erosão tubular regressiva iniciam-se quando a água de percolação desencadeia um processo erosivo e cria, de jusante para montante, um conduto sob a barragem, denominado *piping* ou entubamento.

2.1 Fases de estudo

A construção de uma barragem obedece a uma sucessão de etapas consecutivas que acompanham a pesquisa e desenvolvimento da obra: inventário, viabilidade, projeto básico, projeto executivo e operação.

Na etapa de *Inventário* aplicam-se técnicas de reconhecimento da área e formulam-se alternativas para estimar o potencial aproveitável, em um cenário de utilização múltipla da água na bacia em estudo. A fase de *Viabilidade* é marcada pelo detalhamento do meio físico e das características sócio-econômicas, com o objetivo de detalhar as avaliações da fase de inventário e definir os arranjos mais adequados para obras civis, por meio do estudo de alternativas técnico-econômicas e sua comparação. Os estudos na área de geologia visam à identificação de possíveis problemas que inviabilizem a obra e conseqüentemente eliminam surpresas.

Resultam da etapa de viabilidade dois documentos: Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), necessários para o pedido de Licença Prévia (LP) e continuação da obra.

A etapa seguinte é a do *Projeto Básico*. Fatores como o porte da obra e as dificuldades encontradas nas fases anteriores determinarão o grau de detalhamento que será aplicado nos estudos

geológico-geotécnicos a fim de produzir um estudo minucioso do empreendimento, envolvendo:

- Mapeamento geológico detalhado de superfície e de subsuperfície;
- Estudo detalhado dos tratamentos para melhorar as condições gerais no empreendimento e no reservatório;
- Cubagem e caracterização detalhada das áreas de empréstimo, correspondentes aos materiais granulares, pedreiras e jazidas de solos.

Durante o desenvolvimento do estudo geológico-geotécnico do Projeto Básico, elabora-se um Projeto Básico Ambiental que é responsável pelo detalhamento das recomendações presentes no EIA e necessário para a obtenção da Licença de Instalação (LI).

No *Projeto Executivo* ocorre a construção da obra, mediante uso de métodos mais complexos de investigação, execução de ensaios especiais que, em muitos casos, permitem esclarecer detalhes construtivos, tais como a definição do tratamento específico para determinada estrutura ou feição geológica. Junto com a execução das obras, ocorre o trabalho de implementação do reservatório e de aplicação das medidas ambientais estudadas nas fases anteriores, visando prevenir, reduzir e compensar possíveis danos ambientais desencadeados pelo projeto.

O término dos trabalhos de construção do empreendimento é marcado pela obtenção da *Licença de Operação* (LO), que permite o enchimento do reservatório e a conseqüente operação.

2.2 Condicionantes geológicos

Os esforços aplicados pela obra de engenharia no substrato provocam respostas que dependem dos condicionantes geológicos. É preciso ter em mente que a obra não afeta somente a rocha, mas sim o maciço natural, que é constituído por: (a) solo, rocha ou intercalações desses materiais; (b) estruturas (internas ou externas) e (c) vazios como poros, descontinuidades ou cavidades que podem estar preenchidos por ar ou água. O elemento resistente do maciço natural é a rocha matriz. A alteração da rocha, as estruturas (fraturas, falhas, contatos, etc) e a presença da água podem

reduzir a resistência mecânica do maciço, representada pela fórmula (VAZ, 1999):

$$R_m = R - (i + e + a) \quad (1)$$

Sendo:

R_m = resistência do maciço

R = resistência da rocha

i = grau de intemperismo

e = estruturas

a = água

A fórmula indica que é necessário estabelecer a influência de fatores como: intensidade de intemperismo, descontinuidades (estruturas) e água subterrânea, que podem ser responsáveis pela mudança (redução, indicada pelo

sinal negativo na fórmula 1) das propriedades mecânicas da rocha. Este trabalho aborda exclusivamente os condicionantes geológicos relacionados a: (a) resistência de fundação; (b) percolação de água pela fundação e (c) estabilidade das paredes das escavações.

2.3 Resistência de fundação

Na construção de barragens, o empuxo hidráulico e a permeabilidade são associados à resistência da fundação. Outras solicitações que dependem de condicionantes geológicos são a sismicidade natural ou induzida e a estanqueidade do reservatório. A figura 1 mostra o rompimento de uma barragem devido a evento sísmico.



Figura 1 - Ruptura da barragem Shinkan, Taiwan (Fonte: www.cee.engr.ucdavis.edu)

Os aspectos geológicos, os materiais utilizados na construção e o tamanho da barragem são fatores que, quando pouco estudados, podem ocasionar movimentos, como deslizamentos ou tombamentos. Deslizamentos acontecem sobre um plano determinado, o qual permite que a estrutura da

barragem escorregue em direção a jusante. Tombamentos resultam do desequilíbrio entre os esforços atuantes, o empuxo hidráulico e os esforços resistentes, sendo as principais o peso da barragem e a resistência da fundação.

2.4 Percolação de água

Uma vez que a barragem deve armazenar água, é indesejável a passagem de água por qualquer caminho diferente daquele previsto no projeto. Entretanto, sabe-se que, independente do tipo de barragem, sempre haverá percolação na fundação, sendo necessário controle a fim não comprometer a obra. Além de afetar diretamente a estabilidade da barragem devido ao efeito da subpressão, a percolação pode provocar processos de *piping*, um tipo de ruptura que se dá nos casos em que grãos de solo são arrastados pela água subterrânea (VARGAS, 1977). Como resultado tem-se a formação de um tubo ao longo do filete d'água crítico.

2.5 Paredes de escavação

A ação da gravidade é a principal solicitação sobre a estabilidade das paredes de escavação. O processo de escavação provoca mudança no comportamento do esforço, alterando as tensões presentes, em decorrência da descompressão causada pela retirada do material. Para garantir a estabilidade das paredes são necessários estudos detalhados sobre as descontinuidades do maciço rochoso e seus efeitos na estabilidade. Alguns dos fatores que podem implicar riscos geológicos são: o grau de facilidade para escavação; a resistência mecânica da rocha à compressão; a tenacidade (resistência da rocha à fragmentação quando golpeada por um martelo); a densidade; o empolamento (aumento do volume decorrente da descompactação de solos e da fragmentação de rochas).

3 RISCO GEOLÓGICO: RELAÇÕES ENTRE RISCO E INCERTEZA

São abordados neste item classificações de risco e fatores associados, visando apresentar o conceito de "risco geológico", que deve ser considerado em qualquer obra de engenharia, uma vez que a prevenção é menos complicada e custosa do que a remediação. Define-se como risco geológico uma situação que envolve perigo, perda e dano ao homem ou às propriedades, devido à presença de determinado processo ou condicionante geológico.

Processos geológicos, quando desencadeados, podem ou não gerar situações de perdas e danos. Por isso, é necessário distinguir o conceito de risco em relação ao de susceptibilidade.

- Risco: expressa a possibilidade de perdas materiais e sociais mediante a ocorrência de um acidente;
- Susceptibilidade: é definida mediante a possibilidade de ocorrer um fenômeno geológico, em determinada área, sem que haja perdas ou danos.

A Geologia de Engenharia passou a dar mais atenção aos processos geológicos que podem desencadear riscos em razão da intensificação das atividades humanas. As ações antrópicas como, por exemplo, as ocupações irregulares, têm sido responsáveis por frequentes eventos de deslizamentos de encostas.

Em consequência da ruptura de barragens, após 1800, o número de perdas humanas já atingiu valor da ordem de 17.000 vidas (LEMPÉRIÈRE, 1993). Este dado mostra a importância dos trabalhos de avaliação dos condicionantes geológicos para a prevenção do risco, ressaltando que estes trabalhos devem estar presentes durante todo o desenvolvimento da obra e não apenas na fase de operação.

3.1 A incerteza na investigação geológica

Qualquer obra de engenharia provoca alterações no ambiente. O comportamento da alteração deve ser avaliado, em qualquer etapa do projeto, para evitar o desenvolvimento de um processo geológico. Entretanto, prazos curtos e restrições financeiras proporcionam o aumento do grau de **incerteza**. É tratada como incerteza a parcela não-esclarecida após a realização das investigações geológicas. Em geral, os processos geológicos são bem conhecidos, porém, quando há interação, ou seja, quando determinado processo interfere em outro, surgem dificuldades na interpretação que aumentam a incerteza.

Sempre existirá algum grau de incerteza no conhecimento geológico em projetos de engenharia civil. Por isso, é necessário aplicar diferentes métodos de investigação e possuir equipe devidamente qualificada. Em muitos casos, a incerteza

é reduzida quando se compreendem os processos geológicos locais e a maneira como podem interferir no empreendimento. As características geológicas e geotécnicas do local não mudam no decorrer do tempo histórico e sempre estiveram presentes; o que ocorre em muitos casos é a escassez de investigações em relação ao tamanho da área, além de interpretações equivocadas, que podem ocasionar acidentes nas etapas seguintes e até após a conclusão obra (MINICUCCI, 2008).

3.2 Análise da incerteza a partir de métodos estatísticos

Andrade (2000) avalia a questão do risco e da incerteza pelo ponto de vista estatístico; define risco como uma estimativa do grau de incerteza existente com respeito à realização de resultados futuros desejados. Vieira (1978) aborda em separado o risco e a incerteza, apresentando as seguintes definições:

- 1) Risco: corresponde à possibilidade de excedência ou não excedência da distribuição de probabilidade de variáveis aleatórias, quando relacionadas a sistemas de recursos hídricos na natureza, tanto naturais quanto artificiais ou uma combinação de ambos;
- 2) Incerteza: consiste na possibilidade da existência de erro em uma mensuração ou em um cálculo. O erro pode surgir, por exemplo, na determinação de variáveis, no uso de métodos de resolução de problemas ou na tomada de decisão.

A incerteza está presente em todas as obras e, em geral, a tendência é minimizá-la no decorrer das fases de implantação do empreendimento. Ao construir uma barragem, por exemplo, fatores como o prazo disponível para detalhamento do projeto e investimento podem reduzi-la e conseqüentemente, diminuir o risco geológico.

A estimativa das probabilidades é a parte mais complicada, pois para fazer estimativas é necessário superar a questão da “tomada de decisão”, que consiste na escolha da alternativa mais apropriada, mediante critérios estabelecidos. Entretanto, no mundo real aparece o fator da “multidimensionalidade”, diferente do mundo matemático, no qual a incerteza corresponde

à probabilidade do resultado de um experimento aleatório (BELCHIOR et al., 1997).

Aplicando a questão à Geologia de Engenharia, mais especificamente à construção de uma barragem, a tomada de decisão é mais difícil porque não há como calcular as probabilidades envolvidas no processo de decisão, além de não haver informações, ou seja, séries estatísticas com o reconhecimento de todos os fatores envolvidos. Por exemplo, a presença de uma falha, que pode resultar em uma ruptura e comprometer a obra.

Devido às complicações, torna-se necessário utilizar a probabilidade subjetiva, método direcionado a assuntos inteiramente novos, sobre os quais existem apenas informações subjetivas. As informações precisam conter “pistas” para que seja possível aferir, basicamente por meio da sensibilidade, a probabilidade, ou seja, a medida de incerteza, correspondente a cada fator. Para isto, o tomador de decisões deve superar outro obstáculo, a escolha de alternativas; neste caso, pode ser utilizado um critério matemático, sempre com dois resultados:

Sucesso: quando o evento ocorrido é favorável;

Falha ou **fracasso:** quando o evento ocorrido é desfavorável.

Há casos em que o tomador de decisões pode também recorrer à elaboração de modelo matemático que simule situação do mundo real. O método de Monte Carlo gera modelos estatísticos para lidar experimentalmente com variáveis descritas por funções probabilísticas (ANDRADE, 2000). É preciso, no entanto, que os fatores probabilísticos, ou seja, a série estatística esteja sob controle do tomador de decisões; em situações do mundo real, em geral, isto não é possível.

Para aplicar um modelo matemático que visa estimar a incerteza na construção de uma barragem, é necessário reconhecer todos os fatores envolvidos, o que é muito difícil quando se trata de um ambiente geológico. Mesmo que sejam realizadas muitas investigações, sempre existirá um condicionante não detectado, como uma falha ou um corpo de calcário, que impedirá ao tomador de decisões controlar os fatores probabilísticos.

3.2.1 Riscos abrangentes e específicos

Na construção de uma barragem, podem aparecer problemas caso as etapas de estudo, inventário, viabilidade e projeto básico não sejam realizadas de maneira eficaz e conveniente. Dada uma determinada ocorrência e constatado o risco perante a obra, é essencial dimensioná-lo. A classificação a seguir aborda parâmetros de dimensão e divide o risco geológico entre abrangente e específico.

Riscos abrangentes são aqueles que podem comprometer totalmente a obra. Fazem parte dessa categoria os fenômenos de falta de estanqueidade e colapso de estrutura.

Para garantir a *estanqueidade* do reservatório, ou seja, para não haver fuga significativa de água, analisam-se as condições geológicas, geomorfológicas, geotécnicas e hidrogeológicas, que possam levar a sucessivas percolações de água devidas à presença de falhas, ou de rochas permeáveis; erosão tubular regressiva (*piping*); ou pela disposição do lençol freático, em relação ao relevo regional.

Outro tipo de risco abrangente é o *colapso de estrutura*. A estrutura de uma barragem de concreto, terra ou enrocamento pode ruir em função de condições geológicas não previstas. Assim, por exemplo, uma falha sub-horizontal na fundação, dependendo de suas características de resistência, pode propiciar o deslizamento da estrutura e sua ruptura.

Riscos específicos são os que não afetam o conjunto da estrutura e não necessariamente levam ao rompimento da barragem. Entre eles, há condições geológicas desfavoráveis ou imprevistas, tais como sistemas de fraturas afetando a estabilidade das paredes de escavação, perda d'água elevada devido a fraturas em rocha, risco de *piping*, nível d'água elevado provocando inundação das praças de trabalho, zonas afetadas de baixa resistência em maciços rochosos e muitos outros.

3.2.2 Quantificação do risco

Dentre os autores que utilizam fórmulas para equacionar o risco, para Varves (1985), o risco é dividido em total e específico, fórmula 2:

$$R_t = E \times R_s \quad (2)$$

Sendo:

R_t = risco total. Corresponde à expectativa de perda de vidas humanas, de pessoas afetadas, de danos à propriedade ou a interrupção das atividades econômicas em decorrência de um acidente natural;

E = elementos de risco. Trata-se do número de pessoas e de todos os demais elementos que estão sob risco em um determinado local;

R_s = risco específico. Refere-se ao grau de expectativa de perdas devido a um acidente natural em particular.

O risco específico também é apresentado mediante a relação entre o risco natural e a vulnerabilidade, fórmula 3:

$$R_s = H \times V \quad (3)$$

Sendo:

H = risco natural. Qualquer processo que represente uma ameaça à vida humana ou à propriedade;

V = vulnerabilidade. Trata-se do nível de dano esperado de acordo com a intensidade do acidente.

Para avaliação do risco geológico, foi adotada a fórmula adaptada de Ayala Carcedo y Olcina Cantos (2002), na qual o risco (R) é o resultado da interação do meio físico (geologia, geomorfologia, clima, hidrologia) com as atividades antrópicas. E desta interação, resulta a fórmula 4 que apresenta três conceitos: **periculosidade** (P), **exposição** (E) e **vulnerabilidade** (V):

$$R = P \times E \times V \quad (4)$$

A *periculosidade* indica a intensidade e a probabilidade de ocorrência, ou seja, a frequência de um acidente, enquanto a *exposição*, ou o grau de exposição, refere-se à quantidade de pessoas e bens materiais potencialmente submetidos a um risco natural. A *vulnerabilidade*, por sua vez, apresentada nas fórmulas 3 e 4, pode ser definida como a predisposição de um sistema, ou elemento a ser afetado na ocorrência de um acidente. Reflete o grau de fragilidade de determinada região. Por exemplo, a ocupação mal-planejada tende a instabilizar encostas em zonas de solos frágeis.

A fórmula 4 também permite estabelecer uma relação entre R , P , E e V e a capacidade de

resposta e recuperação de uma área afetada. O risco é diretamente proporcional a $P \times E \times V$. O risco pode ser minimizado, por sua vez, na medida em que se intensificam estudos para conhecer melhor a área e realizar medidas preventivas que impeçam ou ajudem a mitigar os efeitos de fenômenos geológicos. Isso depende ainda da capacidade de resposta e recuperação de uma área afetada por um acidente.

4 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RISCO GEOLÓGICO

A análise de risco é atividade direcionada ao desenvolvimento de estimativas do risco. Baseada na engenharia de avaliação e em técnicas estruturadas, busca promover a combinação de frequências e consequências de um acidente. Para este trabalho, dentre as diversas técnicas existentes para análise de riscos, foi escolhida a Análise de Árvore de Falhas (AAF), apresentando os mecanismos que podem levar ao rompimento de uma barragem. A AAF é uma técnica dedutiva (Cetesb, 2002b) que permite identificar as causas potenciais de acidentes em um sistema, além de possibilitar

estimativa da frequência com que determinado acidente pode ocorrer. A AAF é construída do topo para base, ou seja, a partir de determinado evento indesejado, em direção às possíveis causas que o desencadearam. Para definir a relação entre causa e eventos, são utilizados portões de lógica, do tipo “E” ou “OU”, apresentados na figura 2.

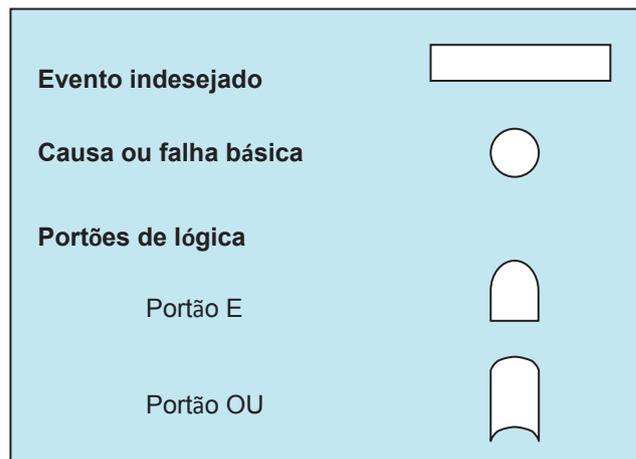


Figura 2 - Símbolos utilizados na AAF

A elaboração da árvore para análise do risco geológico (Fig. 3) contém alguns dos riscos geológicos descritos na tabela 1.

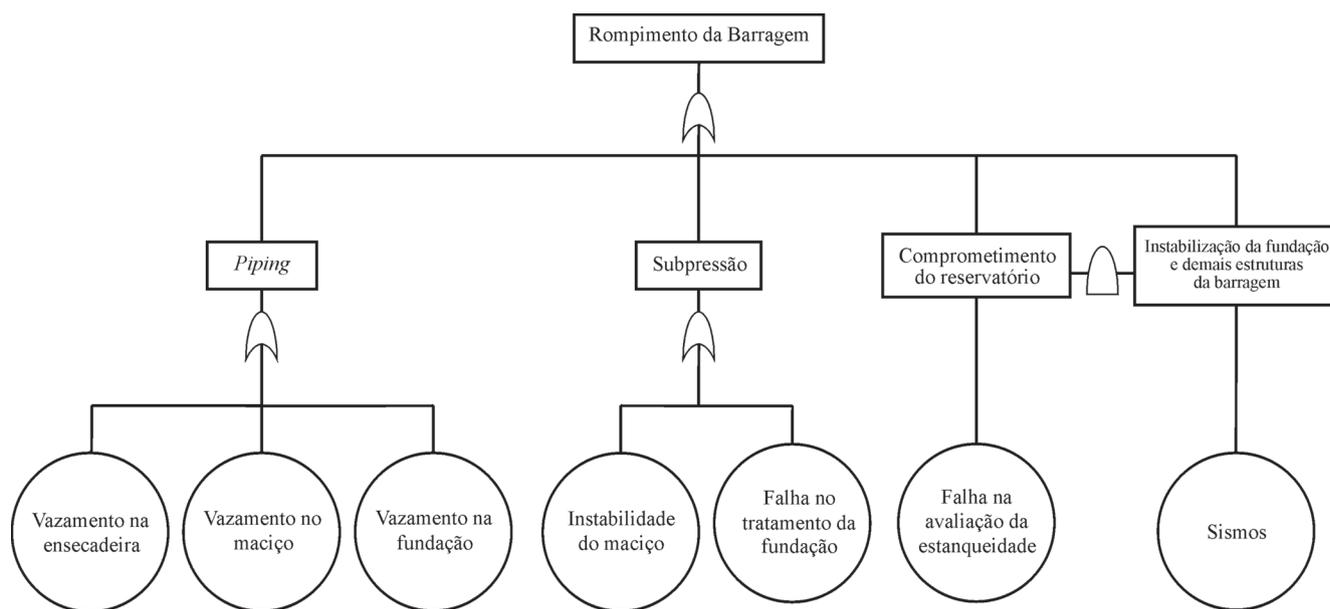


Figura 3 - Análise do risco geológico por meio de Árvore de Falhas

Tabela 1 – Matriz de risco geológico em barragens.

Referência	Identificação		Localização		Avaliação			Quantificação		Remediação
	Risco	Condicionante Geológico	Estrutura	Efeitos	Dimensão	Possibilidade	Periculosidade	Gravidade		
R01	Erosão interna (<i>piping</i>)	Camadas de areia com elevada condutividade hidráulica	Ensecadeira	Percolação de água	Específico	4	9	36	Soluções e tratamentos Alteração no projeto geométrico das Ensecadeiras. Tapete de vedação e bombeamento	
R02	Baixa resistência ao cisalhamento	Camadas de argila de consistência mole a média	Ensecadeira	Escorregamento	Específico	4	9	36	Alteração no projeto geométrico das Ensecadeiras.	
R03	Reação álcali-agregado	Reatividade do material	Estruturas de concreto em geral	Ruptura das estruturas	Podem ser abrangente de acordo com a estrutura atingida	1	6	6	Dosagem adequada dos concretos	
R04	Deslizamentos planares e em cumha	esença de fraturas subverticais ou inclinadas	Taludes de escavação da casa de força, do vertedouro, da eclusa, dos canais de aproximação, de restrição, de adução, de fuga e de navegação	Escorregamento do material podendo comprometer as estruturas afetadas	Específico	4	3	12	Tratamento pesado, com tirantes, chumbadores e concreto projetado	
R05	Aceleração horizontal	Sismicidade	Ensecadeiras, barragem, taludes de escavação	Ruptura das estruturas	Abrangente	1	20	20	Definição do coeficiente de aceleração sísmica	
R06	Recalques	Presença de fraturas de alívio sub-horizontais, alteradas para solo, até 15 metros de profundidade	Barragens de concreto e outras estruturas com fundações rasas	Rebaixamento, trinças e rachaduras das estruturas afetadas	Podem ser abrangente de acordo com a estrutura atingida	2	12	24	Sobreescavação e reposição com concreto ou chavetamento da fundação	
R07	Subpressões	Presença de fraturas de alívio subhorizontais com elevada permeabilidade até 15 metros de profundidade	Barragem de enrocamento e de concreto, ensecadeiras de montante e de jusante	Rebaixamento das estruturas afetadas	Podem ser abrangente de acordo com a estrutura atingida	4	12	48	Tratamento das fraturas com injeções e drenagem; sobreescavação	
R08	Comprometimento da estanqueidade do reservatório	Presença de materiais granulares, permeáveis, ou variação abrupta da topografia	Barragens de terra e enrocamento	Perda d'água com possível esvaziamento do reservatório	Abrangente	2	20	40	Colocação de filtros e drenos, dimensionados em função dos materiais usados no corpo da barragem	
R09	Cidagem dos blocos de enrocamento	Alterabilidade do material	Barragem de enrocamento e enrocamentos de proteção em geral	Comprometimento do enrocamento	Podem ser abrangente caso a barragem seja a estrutura afetada	1	6	6	Aumento da espessura do enrocamento	
R10	Taludes em solos pouco resistentes	Presença de solos transportados Ex: corpos de talus	Taludes de escavação dos canais de aproximação, de restrição, de adução, de fuga e de navegação	Escorregamentos	Específico	2	6	12	Remoção dos corpos de talus	

4.1 Avaliação de risco geológico

A avaliação utiliza os resultados da análise para determinar o controle e monitoramento de uma área afetada. Os trabalhos são conduzidos mediante comparações entre critérios de tolerabilidade de riscos previamente estabelecidos. Neste trabalho, foi criada uma matriz de risco geológico (Tab. 1), com os seguintes parâmetros:

- **Identificação.** Na primeira coluna da matriz os riscos estão identificados pela letra R e são seguidos por números de 1 a 10, por exemplo, R01. Na segunda coluna estão caracterizados os riscos e, na terceira, os condicionantes geológicos associados.
- **Localização.** Corresponde às estruturas que podem ser afetadas pelo risco. Observe-se que, de acordo com o risco descrito, mais do que uma estrutura pode sofrer interferência. Por exemplo, a ocorrência de subpressões pode afetar ensecadeiras e a barragem.
- **Avaliação.** Este parâmetro é representado na matriz, com base no efeito e na dimensão que o risco pode causar à barragem. De acordo com as estruturas atingidas o risco poderá ser específico ou abrangente.
- **Quantificação.** Observando a fórmula (4), adotada para avaliação do risco geológico, optou-se pelo desmembramento do fator periculosidade. De acordo com a fórmula, a periculosidade indica a intensidade e a frequência de ocorrência do risco. Entretanto, visando à quantificação do risco de maneira mais detalhada e objetiva, restringiu-se o fator

periculosidade como relativo à interferência do risco ao empreendimento e a frequência de ocorrência foi caracterizada pela análise da possibilidade. Portanto, foram considerados três fatores de quantificação: possibilidade, periculosidade e gravidade. Nessa nova formulação, a gravidade (G) resulta da multiplicação da periculosidade (Pe) pela possibilidade (Po), conforme apresentado na fórmula 5.

$$G = Pe \times Po \quad (5)$$

- **Possibilidade.** A possibilidade foi avaliada com os critérios indicados na tabela 2, que os divide em cinco classes. A primeira coluna contém a referência, por exemplo, Po1. Em seguida aparece a descrição que varia entre improvável, até extremamente possível. A primeira categoria envolve riscos menos propensos a ocorrer, enquanto a última volta-se a situações em que o fenômeno associado ao risco já se manifestou anteriormente. Após a descrição, duas classificações estabelecem relação entre o evento que pode acontecer e a chance de uma futura ocorrência e, por último, para cada classe é dada uma nota, utilizada para definir a gravidade.
- **Periculosidade.** A tabela 3 refere-se à periculosidade e para este fator também foram definidas cinco classes. A primeira coluna apresenta a referência, por exemplo, Pe1. Em seguida aparece a descrição de cada classe, associada às interferências, como escopo, prazo, custo e qualidade do empreendimento. Na terceira coluna estão as notas atribuídas às classes estabelecidas.

Tabela 2 – Análise de possibilidade.

Referência	Descrição	Definição para evento único	Definição para evento seguinte	Nota
Po1	improvável	Não esperado, surpreendente	Ocorreria em menos de 1% das vezes	1
Po2	provável	Baixa possibilidade de ocorrer	Ocorreria em mais de 1% e menos de 10% das vezes	2
Po3	possível	Média possibilidade de ocorrência	Ocorreria em mais de 10% e menos de 40% das vezes	4
Po4	muito possível	Acontece em projetos semelhantes, forte possibilidade de ocorrer novamente	Ocorreria em mais de 40% e menos de 75% das vezes	8
Po5	extremamente possível	Frequentemente acontece em projetos semelhantes e conseqüentemente, há grande expectativa de ocorrência	Ocorreria em mais de 75% das vezes	16

Tabela 3 – Análise de periculosidade.

Referência	Descrição	Notas
Pe1	Afeta muito pouco o custo, o escopo e o prazo do empreendimento.	3
Pe2	Afeta pouco o custo, o escopo e o prazo do empreendimento.	6
Pe3	Afeta medianamente o custo, o escopo, o prazo e a qualidade do empreendimento	9
Pe4	Afeta consideravelmente o custo, o escopo, o prazo e a qualidade do empreendimento.	12
Pe5	Afeta muito o custo, o escopo e o prazo do empreendimento.	20

■ **Gravidade.** A multiplicação das notas dos fatores possibilidade e periculosidade (fórmula 5), resulta nas tabelas 4 e 5 que apresentam a análise de gravidade do risco geológico. A tabela 4 mostra todos os resultados

possíveis de acordo com as notas definidas para os fatores possibilidade e periculosidade. A tabela 5 apresenta apenas os resultados referentes a risco geológico utilizados na matriz de risco da tabela 1.

Tabela 4 – Análise de gravidade.

Periculosidade		Pe5	Pe4	Pe3	Pe2	Pe1
		20	12	9	6	3
Po5	16	320	192	144	96	48
Po4	8	160	96	72	48	24
Po3	4	80	48	36	24	12
Po2	2	40	24	18	12	6
Po1	1	20	12	9	6	3

Tabela 5 – Resultados da análise de gravidade dos riscos geológicos descritos na tabela 1.

Periculosidade		Pe5	Pe4	Pe3	Pe2	Pe1
		20	12	9	6	3
Po5	16					
Po4	8					
Po3	4		48	36		12
Po2	2	40	24		12	
Po1	1				6	

A análise de gravidade foi realizada com base em três intervalos, os quais definem o risco como aceitável, preocupante e inaceitável, conforme a tabela 6. A tabela apresenta, na terceira coluna, um exemplo da ação que pode ser tomada

em decorrência da gravidade do risco geológico; entretanto, as ações não são descritas porque a gestão de risco envolve variáveis que não fazem parte da temática deste trabalho.

Tabela 6 – Descrição das classes utilizadas para a análise de gravidade.

Gravidade	Classe	Ação ou Endereçamento
Acima de 120	Inaceitável	Tentar evitar por meio de um Plano de Eliminação ou Transferência
25 - 120	Preocupante	Tentativa de mitigação por meio de um Plano de Ação
1 - 25	Aceitável	Monitoramento

- **Remediação.** A coluna referente à remediação mostra as possíveis soluções e tratamentos que devem ser aplicados a fim de reparar, quando possível, os danos provocados pela manifestação de um determinado risco.
- **Outras classificações.** Os riscos geológicos avaliados devem contemplar o levantamento de possíveis vítimas fatais, bem como os danos à saúde da comunidade presente nos

arredores do empreendimento, além dos impactos agudos causados ao ambiente (Cetesb, 2002b). E com relação à segurança de barragens, o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 1999) elaborou duas classificações que englobam a dimensão, o potencial ao dano, a perda de vidas humanas e de materiais e o impacto ambiental, como pode ser observado nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Classificação de barragens de acordo com a dimensão (CBDB, 1999).

Categoria	Altura h (m)	Armazenamento V (m ³)
Pequena	5 < h < 15	0,05x10 ⁶ < V < 1,0x10 ⁶
Média	15 < h < 30	1,0x10 ⁶ < V < 50x10 ⁶
Grande	h > 30	V > 50x10 ⁶

Tabela 8 – Classificação de barragens quanto ao potencial de dano (CBDB, 1999).

Categoria	Perdas de Vida	Perdas materiais
Baixo	Nenhuma esperada (nenhuma estrutura permanente para habitação humana)	Mínima (região não desenvolvida e estruturas e cultivos ocasionais)
Significante	Até cinco (nenhum desenvolvimento Urbano e não mais do que um pequeno número de estruturas habitáveis)	Apreciável (terras cultivadas, indústrias e estruturas)
Alto	Mais do que cinco	Excessiva (comunidades, indústrias e agricultura extensas)

Deve-se ter em mente que a matriz de risco (Tab. 1) é um exemplo, já que nem sempre os riscos citados ocorrem em todas as obras e podem existir outros que não constam na matriz elaborada. Na prática, a presença de uma equipe de profissionais de Geologia de Engenharia é determinante para constatar quais os riscos presentes e verificar se a dimensão, bem como as notas atribuídas à quantificação do risco e medidas de remediação, estão ou não condizentes com os problemas tratados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo da pesquisa sobre avaliação de risco geológico em barragens foi estabelecer critérios que permitiram elaborar um método de prevenção de acidentes. A partir da análise da incerteza,

foram testados métodos estatísticos, na tentativa de criar um modelo para análise de risco. Para problemas de risco geológico, modelos matemáticos, como os operados pelo método de Monte Carlo, não se enquadram nas condições proporcionadas pelos processos geológicos. O método revela-se útil, por exemplo, em controle de chuvas, previsão de custos de produção e estudos de viabilidade econômica.

Consequentemente, iniciou-se a seleção de uma técnica de análise de risco adequada. A Análise por Árvore de Falhas mostrou-se satisfatória para apresentação de causas básicas, ou seja, os riscos geológicos, que podem levar à ocorrência de um evento indesejado, neste caso, o rompimento de uma barragem. A análise facilitou o desenvolvimento de uma matriz de risco geológico e tabelas associadas.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. L. *Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para Análise de Decisão*. 2 ed. Rio de Janeiro, LTC. 2000. 277p.
- AYALA CACERDO, F.J.; OLCINA CANTOS, J. *Riesgos naturales*. Ariel Ciência. 2002. 1512 p.
- BELCHIOR, A. D., XEXEO, G. B., ROCHA, A. R. *Enfoques Sobre a Teoria dos Conjuntos Fuzzy*, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997. (Rel. Técn. RTEC-430/97).
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS CBDB. *Guia Básico de Segurança de Barragens*. São Paulo: CBGB. 1999. 77p.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. CETESB. *Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos*. v. 2, São Paulo, 2002b. 119 p.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS - ICOLD. *Tailing Dams: Risk of Dangerous occurrences. Lessons Learned from Practical Experiences*. Bulletin 121. Paris. 2001. 144p.
- LEMPERIERE, F. Dams that have Failed by Flooding : an Analysis of 70 Failures. *Water Power and Dam Construction*, v. 45, n. 9/10, p. 19-24, 1993.
- MARQUES FILHO, P. L.; GERALDO, A. Barragens e reservatórios. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. *Geologia de Engenharia*. 2.ed. São Paulo: ABGE, 1998. cap. 24, p. 397-418.
- MEDEIROS, C.H.A.C. Utilização da Técnica de Análise de Probabilidade de Risco na Avaliação de Segurança de Barragens. In: XXIII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1999, Belo Horizonte. *Anais...* Vol.I. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB). 1999. p 77-81.
- MINICUCCI, L.A. Acidentes em Barragens. Conhecimento Geológico e Geomecânico e Riscos Geológicos. In: VI Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, 2008, Belo Horizonte, Minas Gerais. URL: <http://www.cbdb.org.br/simposio/Microsoft%20PowerPoint-%20%20Acidentes%20em%20Barragens%20-%20F%C3%A1bio.pdf>. Acesso: 01/07/2010.
- VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil. 1997. 509p.
- VARVES, D.J. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Unesco. 1985. 63p.
- VAZ, L.F. O Efeito das Condições na Economia das Obras Subterrâneas. In: III SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS, 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABGE, 1999. p. 89-110.
- VIEIRA, V.P.B. *Risk Assessment in the Evaluation of Water Resources Projects*. Originalmente apresentada como tese de Doutorado, Colorado State University, 1978.

ESTUDOS SOBRE RISCOS GEOLÓGICOS E SUA INCORPORAÇÃO NO PLANEJAMENTO TERRITORIAL – RELATO DA EXPERIÊNCIA DE FORMAÇÃO DE QUADROS TÉCNICOS NO ABC PAULISTA

FERNANDO ROCHA NOGUEIRA

*Professor adjunto do Centro de Engenharia,
Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – UFABC
E-mail: fernando.nogueira@ufabc.edu.br*

RICARDO DE SOUSA MORETTI

*Professor titular do Centro de Engenharia,
Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – UFABC
E-mail: ricardo.moretti@ufabc.edu.br*

CLÁUDIA F. ESCOBAR DE PAIVA

*Professora adjunto do Centro de Engenharia,
Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – UFABC
E-mail: claudia.paiva@ufabc.edu.br*

RESUMO

O presente trabalho relata e analisa alguns resultados da experiência de formação de quadros técnicos municipais da Região do ABC paulista e de estudantes da Universidade Federal do ABC - UFABC por meio do Programa de Extensão - PROEXT denominado “Gestão de Riscos Geológicos em Ambiente Urbano: Escorregamentos e Processos Correlatos”, que foi desenvolvido pela Universidade Federal do ABC - UFABC no ano de 2012. Este PROEXT teve por objetivo contribuir para o mapeamento, caracterização e gestão de áreas de riscos geológicos nos municípios do Grande ABC, além de propiciar a qualificação de alunos da UFABC, de profissionais e dirigentes dos poderes públicos regionais, e demais envolvidos na gestão de riscos geológico-geotécnicos no espaço urbano, definiu como foco principal a geração de conhecimento científico e tecnológico sobre os desastres ambientais,

promovendo a articulação entre pesquisas científicas, tecnológicas e políticas públicas na região do Grande ABC paulista. Suas atividades buscaram incentivar a incorporação dos estudos de risco no planejamento territorial. Este artigo relata a metodologia empregada e os resultados das atividades realizadas pelo grupo gestor do PROEXT.: exercícios de cartografia geotécnica para áreas piloto em três diferentes escalas e finalidades para aplicação no planejamento territorial e gestão de riscos; avaliação de aspectos legais e sociais envolvidos na remoção de famílias em áreas de risco; estudos de aderência entre características geotécnicas do terreno, processos geodinâmicos atuantes e obras de contenção implantadas na região, análise de estratégias para ação da defesa civil e comunicação de risco.

Palavras-chave: Extensão universitária, gestão de riscos, planejamento territorial.