



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

AVALIAÇÃO DE RISCO GEOLÓGICO EM BARRAGENS

HENRIETH VIVIANE BORGIO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Celso Dal Ré Carneiro

COORIENTADOR: Prof. Luiz Ferreira Vaz

Trabalho de conclusão de curso apresentado em
8 de julho de 2010 para obtenção do título de
Bacharel em Geologia pelo Instituto de
Geociências da UNICAMP.

Campinas - SP

Julho de 2010



201026755

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS	
N.º CHAMADA <u>0241a</u>	
V. _____	EX. _____
TOMBO BC/ <u>5050</u>	
TOMBO IG/ _____	
PROC. <u>46.154.10</u>	
C ☐	D ☒
PREÇO <u>R\$ 11,00</u>	
DATA <u>14/10/10</u>	
N.º CPD _____	

Cad. tit. 772609

1. Geologia ambiental.
2. Barragem



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

AVALIAÇÃO DE RISCO GEOLÓGICO EM BARRAGENS

HENRIETH VIVIANE BORGIO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Celso Dal Ré Carneiro

COORIENTADOR: Prof. Luiz Ferreira Vaz

TCC Aprovado em: 08/07/2010

Comissão examinadora:

Profª. Drª. Sueli Yoshinaga Pereira

Prof. Dr. Pedro Wagner Gonçalves

Campinas, julho de 2010

“O que prevemos raramente ocorre;
o que menos esperamos geralmente acontece.”
Benjamin Disraeli

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Rosemarie e Pedro e à vó Dedé, por todo amor, carinho, apoio e incentivo.

Aos professores e profissionais que trabalham no IG, pela atenção em todos os serviços prestados.

Ao professor Celso por aceitar-me no projeto de iniciação científica entre 2006 e 2007, pelo incentivo para a minha participação em simpósios e congressos, pelas publicações, pelos conselhos e por ser o orientador deste trabalho. Ao professor Elson pelo projeto de iniciação científica de 2008. Ao professor Vaz por toda a paciência e dedicação semanal durante esse semestre, aos geólogos Oswaldo Augusto Filho, Eduardo Macedo Soares e à engenheira Maria Cecília de A. Birindelli Guimarães pelas contribuições dadas a este trabalho.

Às professoras Guillermina Garzón Heydt, Meaza Tsigé Aga e Graciela Sarmiento Chiesa da *Facultad de Ciencias Geológicas da Universidad Complutense de Madrid* pela receptividade e colaboração.

Aos geólogos Magali Gurgueira, Silvia Truffi, Talita Muzzi e Daniel Buzzatto pelos ensinamentos de geologia de engenharia, pelo esclarecimento das dúvidas e por todas as vezes que me pedem para ajudá-los!

À Luci, pelo profissionalismo, dedicação, atenção, carinho e até pelas vezes em que começou uma frase dizendo “vou pegar no seu pé”.

Agradeço à turma 05 pelos ótimos momentos que passamos em sala de aula, laboratórios, trabalhos de campo, intervalos na Rédi e todas as festas.

Em especial gostaria de lembrar pessoas queridas com quem me diverti muito, Alexandre (também conhecido como Lê, Lezinho, Amante, Latino...), Ancilla, Atum, Boi, Brunão (53), Danilão, Felipão (o italiano de olhar egípcio), Frango, Jozias (meu boi Nelore), Jose, Joy, Marcinha, Menina Veridiana, Michelly, Paulo, Shrek, Socorro e Zezão!



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

Avaliação de Risco Geológico em Barragens

RESUMO

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC

Henrieth Viviane Borgo de Oliveira

A construção de barragens acompanha a evolução da história da Geologia de Engenharia. Barragens de concreto, terra e enrocamento são construídas em todo o mundo, seja para gerar energia elétrica ou desviar canais, e exigem cada vez mais a dedicada competência de geólogos e engenheiros. A segurança de barragens é necessária à proteção das construções humanas, da vida e do ambiente, porém a interferência antrópica, simultaneamente, tem contribuído para desencadear riscos mais intensos e frequentes, na medida em que aceleram ou mudam o curso de processos geológicos. Com a finalidade de detectar riscos e prevenir acidentes, torna-se essencial a avaliação e análise de riscos geológicos. Um fator agravante provém do fato que os fenômenos geológicos não podem ser analisados meramente com base em séries estatísticas, sendo necessário analisar e avaliar as possíveis variáveis de maneira objetiva e subjetiva, com base no bom senso e na experiência dos tomadores de decisão. Além da escolha das melhores alternativas para prevenção do risco é necessário selecionar ferramentas objetivas para apresentação dos resultados. A pesquisa teve como objetivo sintetizar conhecimentos e métodos práticos para avaliação e análise de risco geológico em barragens. O método de trabalho consistiu em levantar na literatura e na experiência de alguns especialistas os componentes que têm sido usualmente considerados. No campo da análise do risco geológico empregou-se a técnica de Análise por Árvore de Falhas e para avaliação foi elaborada uma matriz de risco geológico, contendo classificação mais detalhada, baseada em três critérios de quantificação: possibilidade, periculosidade e gravidade. Os resultados ora expostos parecem ser de grande utilidade, mas ainda dependem de aplicação prática para ser aprimorados.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

Sumário

Capítulo 1: INTRODUÇÃO.....	1
Capítulo 2: OBJETIVOS E MÉTODOS.....	3
Objetivos da pesquisa	3
Método de trabalho	3
Capítulo 3: CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS.....	5
1 Tipos de barragens.....	5
1.1 Barragens de concreto	5
1.2 Barragens de terra.....	8
1.3 Barragens de enrocamento	11
2 Fases de estudo.....	12
2.1 Inventário	13
2.2 Viabilidade	13
2.3 Projeto básico	14
2.4 Projeto executivo.....	15
2.5 Operação	15
3 Condicionantes geológicos	15
3.1 Esforços atuantes na estabilidade de barragens.....	18
3.2 Percolação de água.....	19
3.3 Paredes de escavação	20
Capítulo 4: RISCO GEOLÓGICO: RELAÇÃO ENTRE RISCO E INCERTEZA.....	21
1 Conceitos de risco, desastre e catástrofe	21
2 A incerteza na investigação geológica	23
2.1 Análise da incerteza a partir de métodos estatísticos	24
3 Riscos abrangentes e específicos	26
3.1 Riscos abrangentes: estanqueidade	26
3.2 Riscos abrangentes: colapso de estrutura	28
3.3 Riscos específicos.....	28
4 Quantificação do risco	28
Capítulo 5: RESULTADOS OBTIDOS – ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RISCO GEOLÓGICO.....	31
1 Análise de risco geológico.....	31
2 Avaliação de risco geológico	33
2.1 Identificação	33
2.2 Localização	33
2.3 Avaliação	33
2.4 Quantificação	34

2.5 Remediação.....	37
2.6 Outras classificações.....	37
3 Exemplo de uso da matriz de risco.....	38
Capítulo 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
Referências	41
Anexo 1.....	42

Lista de Figuras

FIGURAS

Figura 1: Vista panorâmica da Usina Hidrelétrica Binacional Itaipu, Rio Paraná, Brasil-Paraguai (Fonte: www.parazinet.wordpress.com)	7
Figura 2: Barragem Gordon, Rio Gordon, Austrália (Fonte: pt.wikipedia.org).....	8
Figura 3: Barragem de rejeito Brucutu do Sul, Minas Gerais (Fonte: www.fidens.com.br).....	9
Figura 4: Barragem de Abrilongo, Rio Ribeira do Abrilongo, Distrito de Portalegre, Portugal (Fonte: www.agenda.pt)	10
Figura 5: Barragem de enrocamento com núcleo argiloso, UHE Corumbá, Rio Corumbá, Goiás (Fonte: www.adrenaline.com.br).....	12
Figura 6: Ruptura da barragem Shinkan, Taiwan (Fonte: www.cee.engr.ucdavis.edu)	17
Figura 7: Efeito do empuxo, da força peso e da subpressão em uma barragem.....	18
Figura 8: Possíveis consequências da manifestação de um processo natural associado à atividade humana	22
Figura 9: Comportamento do lençol freático de acordo com a topografia e a litologia (Adaptado de Marques Filho e Geraldo, 1998)	27
Figura 10: Símbolos utilizados na AAF	31
Figura 11: Análise do risco geológico por meio de uma Árvore de Falhas.....	32

Lista de Tabelas

TABELAS

Tabela 1: Matriz de Risco Geológico (Anexo 1).....	42
Tabela 2: Análise de Possibilidade	35
Tabela 3: Análise de Periculosidade	35
Tabela 4: Análise de Gravidade	36
Tabela 5: Resultados da análise de gravidade dos riscos geológicos descritos na Tabela 01.....	36
Tabela 6: Descrição das classes utilizadas para a análise de gravidade	37
Tabela 7: Classificação de barragens de acordo com a dimensão (CBDB, 1999)	37
Tabela 8: Classificação de barragens quanto ao potencial de dano (CBDB, 1999)	38

Capítulo 1:

INTRODUÇÃO

A retenção de grandes volumes de água, por meio da construção de barragens, contribuiu para a evolução histórica da Geologia de Engenharia e proporcionou melhor qualidade de vida à humanidade. Entretanto, a construção da obra interfere nos processos geológicos e pode desencadear riscos. O aumento das ações antrópicas torna estes riscos mais intensos e frequentes exigindo maior atenção de engenheiros e geólogos responsáveis pelos empreendimentos.

A segurança de barragens é vital para proteção do ambiente, da vida humana e das construções. É fator que se sobrepõe a todos os demais, ou seja, independente da finalidade da barragem e do orçamento, pois jamais poderá ser negligenciado tanto nas etapas de construção como, posteriormente, na fase de operação. Uma barragem precisa ser segura ao longo de toda a vida útil do empreendimento.

A construção de barragens impõe solicitações diversas sobre os maciços geológicos. A principal solicitação é o empuxo hidráulico, que é 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 posterior comportamento mecânico-hidráulico dos materiais naturais de construção. No decorrer do tempo de vida de barragens de concreto, podem se desencadear reações que resultam na expansão dos materiais e formação de trincas.

O comportamento dos materiais naturais frente às ações do intemperismo, assim como a presença de falhas, fraturas, zonas de cisalhamento e a ocorrência de sismos são fatores identificados como **risco geológico** e, de acordo com a estrutura atingida, pode haver desde pequenos atrasos até a inviabilização do empreendimento.

Acidentes em barragens, normalmente, têm suas origens em algum tipo de anormalidade em seu comportamento, a qual, se devidamente detectada, poderia ser diagnosticada como sintoma que poderia resultar em acidente, ou, até mesmo, na ruptura da barragem, Medeiros (1999). Entretanto, a avaliação de possíveis riscos que podem ser gerados durante as fases de construção, implica investimento maior e consequentemente deve-se encontrar um balanço entre segurança e economia. Para realizar empreendimentos com um custo de segurança baixo, é fundamental manter um nível aceitável de risco, em geral, definido pela seguradora da obra (ICOLD, 2001).

A redução dos riscos corresponde à realização de melhorias estruturais e de serviços auxiliares, para monitoramento e manutenção. É necessário confeccionar mapas de inundação, bem como implementar e manter os procedimentos e sistemas de emergência.

É preciso ter em mente que o cumprimento das medidas necessárias para construção do empreendimento com custo baixo não garantirá redução do grau de incerteza. Mesmo se forem realizadas todas as investigações exigidas pela seguradora, alguns dos fatores que podem interferir no nível de segurança esperado são a mão-de-obra requerida no procedimento e na avaliação dos resultados, a qualidade dos instrumentos e o tempo disponível para execução.

Capítulo 2:

OBJETIVOS E MÉTODOS

A realização deste projeto visou à elaboração de procedimentos sobre avaliação de risco geológico em barragens.

Objetivos da pesquisa

O principal objetivo da pesquisa é avaliar riscos geológicos em barragens e quantificá-los em função dos efeitos sobre o processo construtivo e a operação.

Um objetivo secundário foi sintetizar conhecimentos e métodos práticos de análise e avaliação de risco geológico, a partir de levantamento de dados da literatura e recuperação de relatos práticos de alguns especialistas em avaliação de risco geológico.

Método de trabalho

Os processos geológicos muitas vezes não se enquadram nas condições propostas pelos modelos matemáticos, ou seja, nem sempre é possível tratar aspectos dos fenômenos naturais com a objetividade requerida em certas abordagens da engenharia. Em problemas de Geologia de Engenharia, é necessário também utilizar a probabilidade subjetiva, ou seja, aplicar um método no qual as informações possam conter “pistas” que permitam aferir condições de risco. Esses procedimentos muitas vezes se baseiam na sensibilidade e na intuição do intérprete.

Para atender aos objetivos da pesquisa, utilizou-se matriz disponível em organizações que fazem avaliação de risco. O exemplo desenvolvido teve como base dez riscos geológicos que podem ocorrer em barragem e foram detalhados alguns condicionantes geológicos, tais como: esforços atuantes, percolação de água e estabilidade das paredes de escavação. Os fatores que podem desencadear os riscos foram classificados não apenas em alto, médio e baixo. Foi criada uma classificação mais detalhada para avaliar o risco geológico, a partir da aplicação de três fatores de

quantificação: possibilidade, periculosidade e gravidade. Para os dois primeiros foram estabelecidas cinco classes, divididas em notas e a multiplicação das notas resulta no terceiro fator, a gravidade. A análise de gravidade foi elaborada com base em duas tabelas. A primeira apresenta uma matriz contendo a multiplicação dos fatores possibilidade e periculosidade. A partir dos resultados obtidos, foram estabelecidos três intervalos que compõem a segunda tabela, classificando o risco em aceitável, preocupante e inaceitável.

O desenvolvimento da matriz de risco foi apoiado na realização de uma Análise por Árvore de Falhas (AAF). Trata-se da aplicação de uma técnica de análise de risco, que permite a identificação de causas potenciais que podem levar a um acidente.

A AAF foi criada a partir de causas básicas, tais como: vazamentos e instabilidade do maciço, defeitos no tratamento do maciço, falha na avaliação da estanqueidade e sismos. Estas situações interferem no quadro geral de condicionantes geológicos e podem levar à ocorrência de um evento indesejado, que neste caso pode ser até o rompimento da barragem.

A pesquisa bibliográfica e visitas aos profissionais da área que atuam em empreiteiras, universidades e no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. (IPT) permitiram a coleta das informações que resultaram nos documentos citados.

Capítulo 3:

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.

Neste capítulo são apresentados os tipos de barragens, as fases de estudo e os condicionantes geológicos que podem ser desencadeados pelo empreendimento. Os principais conceitos foram adaptados de Marques Filho e Geraldo (1998).

1 *Tipos de barragens*

As barragens podem ser de concreto, terra ou enrocamento. Ao iniciar um projeto, a análise das condições topográficas e geológicas e a disponibilidade dos materiais naturais de construção permitem a escolha do tipo de barragem mais apropriado.

1.1 Barragens de concreto

As barragens de concreto armado (concreto com barras de aço) subdividem-se nos seguintes tipos: gravidade; gravidade aliviada, contrafortes e barragens em arco. As barragens de concreto-gravidade são as mais pesadas e, portanto, devem apresentar uma resistência de fundação adequada.

Para construção de uma barragem de concreto-gravidade, os seguintes requisitos, envolvendo as condições geológicas, devem ser seguidos:

- a fundação e as ombreiras devem ser suficientemente resistentes a fim de suportar o peso da barragem;

- cuidados especiais devem ser tomados, para assegurar o perfeito contato entre o concreto e a rocha;
- devem ser levados em conta os efeitos provocados por sismos, caso passem a ocorrer tremores de terra na região;

As barragens de concreto compactado a rolo (CCR) surgiram com a idéia de minimizar o prazo de construção.

O rollcrete ou RCC surgiu nos Estados Unidos. No Brasil, é conhecido como CCR, sendo definido como um betão de consistência seca que, no estado fresco, pode ser misturado, transportado, lançado e compactado por meio de equipamentos usualmente utilizados em serviços de terraplanagem ou enrocamento (ANDRIOLO, 1989).

A partir da década de 80, o emprego do CCR passou a ser usual, levando à revisão de projetos que foram previstos para ser construídos com concreto convencional ou até terra. As principais vantagens em relação às barragens de concreto-gravidade são a redução do custo da obra, do uso de formas, do tempo, além da simplificação e redução na infra-estrutura de apoio. Também apresentam algumas vantagens, como facilidades no desvio do rio e redução do prazo de construção.

As barragens de gravidade aliviada e de contrafortes são construídas através de uma série de contrafortes, separados a uma determinada distância, cujo núcleo permanece fechado na zona de montante por uma cabeça, ou por uma placa apoiada nos contrafortes. Apresentam menor peso, podendo alcançar uma economia entre 25 e 40% de concreto se comparada às barragens de concreto-gravidade. Por serem mais leves, há uma probabilidade maior de ocorrerem deslizamentos, não sendo incomum, ao longo da obra, a realização de reforços de fundação mediante a colocação de tirantes.

Um exemplo conhecido deste tipo de barragem é a de Itaipu. A figura 1 proporciona uma vista panorâmica da Usina Hidrelétrica, destacando o reservatório, o vertedouro (à esq.) e a barragem principal (ao centro).



Figura 1: Vista panorâmica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, Rio Paraná, divisa Brasil-Paraguai
(Fonte: www.parazinet.wordpress.com)

As barragens em arco são também conhecidas como barragens em cabóbada (Fig. 2). A forma curva é fator responsável por conferir estabilidade a esta tipologia, uma vez que o empuxo é transferido, na maior parte para as ombreiras. São construídas em vales estreitos ou gargantas (*canyons*), porém as fundações e as ombreiras exigem rocha de alta resistência mecânica.

Uma das vantagens destas barragens é a redução de custos, visto que a quantidade de concreto empregada é muito menor, em relação aos outros tipos mostrados. Entretanto, necessita de mão-de-obra especializada, devido ao rigor do projeto e controle da obra.



Figura 2: Barragem Gordon, Rio Gordon, Austrália (Fonte: pt.wikipedia.org)

1.2 Barragens de terra

A construção de barragens de terra não exige muito, nem da fundação, nem dos materiais. Molda-se a quase todas as fundações e, devido ao desenvolvimento da tecnologia em mecânica dos solos e terraplenagem, aceita uma grande variedade de solos. Em geral, são construídas em vales abertos e em encostas de baixa declividade, com ombreiras suaves e apresentam como vantagem o fato de ser relativamente barata.

De acordo com os solos utilizados na construção, são divididas em dois tipos: barragens de aterro homogêneo e barragens zonadas.

Barragens de Aterro Homogêneo: utilizam apenas um tipo de solo,

geralmente argiloso e pouco permeável, como pode ser observado na figura 3. A construção envolve as seguintes partes:

- aterro, com taludes mais abatidos, da ordem entre 2,5 e 2,0 H:1V;
- filtro ou dreno vertical ou inclinado, formado por areia selecionada de granulometria correspondente ao tipo de solo utilizado;
- filtro, dreno ou tapete horizontal, formado por areia selecionada, de granulometria correspondente ao tipo de fundação;
- presença de trincheira de vedação, quando a fundação não apresenta permeabilidade adequada;
- proteção do talude de montante, com enrocamento fino (rip-rap);
- proteção do talude de jusante com vegetação, concreto ou enrocamento arrumado;
- proteção da crista com uma camada de brita (10 cm), ou por asfalto, caso haja uma estrada;
- drenagem das águas da chuva que caem sobre o aterro, mediante captação por meio de tubos e canaletas.



Figura 3: Barragem de rejeito Brucutu do Sul, Minas Gerais (Fonte: www.fidens.com.br)

Barragens Zonadas: são usadas com relativa frequência, pois quando não há solos apropriados, utilizam-se os solos menos apropriados nos aterros externos enquanto que os solos de melhor qualidade são usados no núcleo central. Este núcleo deve apresentar permeabilidade baixa e deve ser constituído, em geral, por solo argiloso compactado enquanto que nas duas zonas externas, espaldares, podem ser usados materiais granulares e mais resistentes aos deslizamentos. Um exemplo deste tipo de barragem é a de Abrilongo, em Portugal (Fig. 4).

Os principais mecanismos associados às diferentes condições geológicas que podem ocorrer nas barragens de terra são deslizamento de taludes, erosão tubular regressiva (*piping*) e fissuramento.

Os deslizamentos de taludes podem manifestar-se ao longo da obra de diversas maneiras: a jusante, geralmente ocorrem por infiltrações e, a montante, por deplecionamento do reservatório, ou seja, pelo rebaixamento do nível da água armazenada durante um intervalo de tempo específico.



Figura 4: Barragem de Abrilongo, Rio Ribeira do Abrilongo, Distrito de Portalegre, Portugal (Fonte: www.agenda.pt)

Os fenômenos de erosão tubular regressiva são um dos mecanismos mais frequentes em barragens de terra. Este mecanismo tem início quando a água de

percolação, ao atingir a superfície, no lado de jusante, arrasta partículas desencadeando um processo erosivo, que evolui do ponto de surgência, em direção a montante. Cria-se um conduto de comportamento regressivo sob a barragem, cuja forma é responsável pela denominação do fenômeno: *piping* ou entubamento. A susceptibilidade de ocorrência é máxima em areias finas, pouco compactas e de baixo peso específico e tende a se reduzir com o aumento de densidade do aterro, tais como aqueles constituídos por argilas de elevada compacidade.

1.3 Barragens de enrocamento

Barragens de Enrocamento são formadas a partir da compactação de blocos de rochas com o uso de rolos vibratórios pesados. A primeira barragem deste tipo foi construída em 1850, na Califórnia, em Sierra Nevada, visando atender à demanda de água nos garimpos e minerações. A impermeabilização de uma barragem de enrocamento é alcançada por duas maneiras:

I - Presença de um núcleo argiloso compactado (Fig. 5), o qual pode ser vertical ou inclinado. Estas são as chamadas barragens de enrocamento com núcleo de argila, ECRDs (*Earth Core Rock Dams*). Este núcleo pode desencadear deslizamentos profundos, por isso deve ser constituído por materiais altamente resistentes ao cisalhamento;

ou

II - Presença de uma face impermeável, sobre o talude de montante. Trata-se das chamadas barragens de enrocamento com face de concreto, CFRDs (*Concrete Face Rock Dams*). Apresentam algumas vantagens, como o custo e o tempo reduzido e a impossibilidade de ruptura por erosão interna, como pode ocorrer nas barragens com núcleo argiloso.



Figura 5: Barragem de enrocamento com núcleo argiloso, UHE Corumbá, Rio Corumbá, Goiás (Fonte: www.adrenaline.com.br)

2 *Fases de estudo*

Quando se pretende construir uma estrutura de armazenamento de água inicia-se um processo cujo cumprimento deve ser rigoroso, pois para alcançar sucesso é preciso obedecer às etapas usuais nesse tipo de trabalho e que acompanham a pesquisa e desenvolvimento da obra. Neste item, descrevemos as fases de estudo correspondentes ao que é proposto em um projeto de construção de barragens destinadas à geração de energia elétrica.

O porte da barragem e do reservatório é determinante para a escolha da área envolvida; além disso, fatores como a qualidade, a disponibilidade dos materiais naturais de construção (rochas, solos e materiais granulares) e a topografia influenciam diretamente no tipo de barragem a ser construída. Os estudos de barragens compreendem cinco fases consecutivas: inventário, viabilidade, projeto básico, projeto executivo e operação.

2.1 Inventário

A etapa de Inventário é marcada pela aplicação de técnicas para o reconhecimento da área e a concepção de diversas alternativas de divisão de quedas para a bacia hidrográfica.

Imagens de satélite, fotos aéreas e dados cartográficos, hidrometeorológicos e geotécnicos são utilizados nos estudos da bacia hidrográfica com o objetivo de estimar o potencial hidroelétrico, ou seja, um potencial aproveitável nos campos técnico, econômico ou sócio-ambiental, considerando um cenário de utilização múltipla da água na bacia em estudo.

A pesquisa bibliográfica fornece as informações necessárias sobre a geologia regional e geologia local. Executam-se mapeamentos geológico-geotécnicos da área de interesse e interpretam-se dados litológicos, estratigráficos e estruturais. As tarefas da Geologia de Engenharia, nesta fase, são a determinação e a caracterização dos litotipos e de suas propriedades geomecânicas. Também são realizadas avaliações iniciais sobre estabilidade das encostas naturais, espessura dos solos de cobertura e disponibilidade de materiais naturais de construção, além daquelas relacionadas aos problemas de estanqueidade, assoreamento e erosão do reservatório.

2.2 Viabilidade

Após o desenvolvimento dos estudos de inventário, começa uma nova fase de projeto marcada pelo detalhamento do meio físico e das características sócio-econômicas. A fase de viabilidade tem como objetivo detalhar as avaliações executadas na fase de inventário e definir os arranjos mais adequados para obras civis, por meio do estudo de alternativas técnico-econômicas e sua comparação.

São definidos e dimensionados os fatores que permitem a concepção básica da obra, por exemplo, o tamanho da casa de força, a quantidade de turbinas necessárias, o reservatório e a área de influência. Em seguida, análises sobre os múltiplos usos da água e sobre as interferências sócio-ambientais são incorporadas ao projeto. Como resultado dessas análises obtém-se dois documentos, um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e um Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), documentos

necessários para a realização do pedido de Licença Prévia (LP) e para a fase seguinte dos estudos.

A fase de viabilidade, portanto, aborda os estudos hidrológicos, geológicos, topográficos, hidráulicos e geotécnicos, além de envolver estudos mercadológicos, energéticos e econômicos. Os estudos na área de geologia visam à identificação de possíveis problemas que inviabilizem a obra e consequentemente eliminam as surpresas geológicas maiores.

2.3 Projeto básico

Após a conclusão do estudo de viabilidade, passa-se ao desenvolvimento 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.

Nesta fase não são mais considerados os custos-índices, visto que as obras de infra-estrutura já estão definidas e consequentemente o custo da obra é calculado em função das quantidades de serviço. Geólogos e engenheiros cumprem papel de grande responsabilidade no decorrer desta etapa, pois a presença de grandes diferenças entre o que consta no projeto e o que será executado poderá resultar em modificações que podem complicar e encarecer a obra.

Ao longo do projeto básico são realizados os seguintes trabalhos:

- Mapeamento geológico detalhado de superfície e de subsuperfície;
- Estudo detalhado dos sistemas de soluções e tratamentos; medida destinada a melhorar as condições de fundações nas escavações que compõem o 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).

2.4 Projeto executivo

A fase do Projeto Executivo trata da construção do empreendimento, com a contratação de empresa construtora que será responsável pela obra. A etapa é caracterizada pela aplicação dos métodos de investigação mais complexos, que não puderam ser realizados nas etapas anteriores. A presença de equipamentos pesados da construção, como tratores e perfuratrizes, facilita a execução de ensaios e de investigações especiais que, em muitos casos, permitem esclarecer detalhes construtivos, tais como a definição do tratamento específico para determinada estrutura ou feição geológica.

Associados à execução das obras de infra-estrutura, ocorrem os trabalhos 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.

2.5 Operação

O término dos trabalhos de construção do empreendimento é marcado pelo requerimento da Licença de Operação (LO). A obtenção desta licença permite o enchimento do reservatório e a consequente operação da usina hidrelétrica.

3 **Condicionantes geológicas**

Condicionantes geológicas são definidos para cada obra de engenharia. Correspondem às feições geológicas que são solicitadas ou afetadas pelos esforços aplicados pela obra de engenharia ao maciço geológico. A mais comum das solicitações é o peso, consequência da ação da gravidade sobre a estrutura da obra.

Antes de iniciar a descrição dos condicionantes é preciso ter em mente o conceito de maciços rochosos, visto que os trabalhos de geologia não envolvem somente a rocha, mas sim o maciço. Os maciços naturais são constituídos por solo ou

rocha, como também pela intercalação desses materiais, por estruturas (internas ou externas) e por vazios (poros, descontinuidades ou cavidades) que podem estar preenchidos por ar, ou por água subterrânea.

Em um maciço rochoso, o elemento resistente é a rocha matriz, ou seja, a rocha que constitui o maciço. A alteração da rocha, as estruturas (fraturas, falhas, contatos, etc) e a presença da água são fatores que reduzem a resistência do maciço. Dessa forma, a resistência do maciço pode ser representada pela fórmula 1 (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, além de identificar e caracterizar o tipo litológico, é necessário estabelecer a influência de alguns 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. Na investigação e avaliação dos condicionantes, os trabalhos da Geologia de Engenharia são fundamentais e associam-se principalmente à estabilidade da barragem.

Neste trabalho serão considerados apenas os condicionantes geológicos principais que afetam a estabilidade da barragem, os quais são relacionados à resistência de fundação, à percolação de água pela fundação e à estabilidade das paredes das escavações.

A principal solicitação introduzida pela construção de uma barragem é o empuxo hidráulico e neste caso, o condicionante geológico é a resistência da fundação. Outro condicionante geológico associado à fundação é a permeabilidade. Trata-se da

presença de poros, fraturas ou descontinuidades que permite a passagem da água pela fundação da barragem. É necessário reduzir o volume de água de percolação e principalmente, reduzir ou eliminar a subpressão ou poropressão.

Exemplos de outras solicitações que dependem de condicionantes geológicos são a sismicidade natural ou induzida e a estanqueidade do reservatório. A figura 6 mostra o rompimento de uma barragem devido a um evento sísmico.

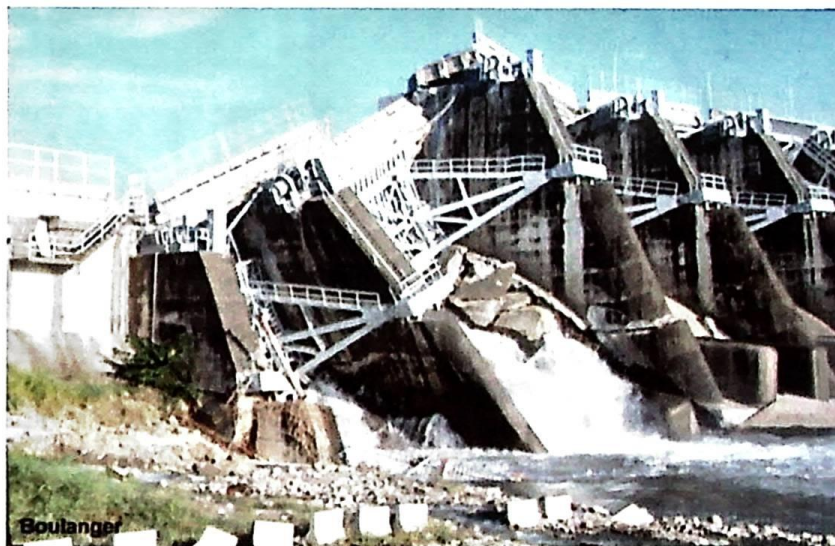


Figura 6: Ruptura da barragem Shinkan, Taiwan (Fonte: www.cce.engr.ucdavis.edu)

A falta de conhecimento sobre os aspectos geológicos, os materiais utilizados na construção e o tamanho da barragem podem resultar em problemas de resistência, refletindo-se diretamente em possível movimento de ruptura. De acordo com o tipo de barragem e com o fator responsável pela causa do movimento, poderá ocorrer um deslizamento ou um tombamento.

Os deslizamentos acontecem sobre um plano determinado, o qual permite que a estrutura da barragem escorregue em direção a jusante; pode-se utilizar como exemplo a presença de uma falha geológica sub-horizontal na fundação.

Os tombamentos resultam do desequilíbrio entre os esforços atuantes, o empuxo hidráulico e os resistentes, sendo as principais o peso (P) da barragem e a resistência da fundação, conforme adiante descrito.

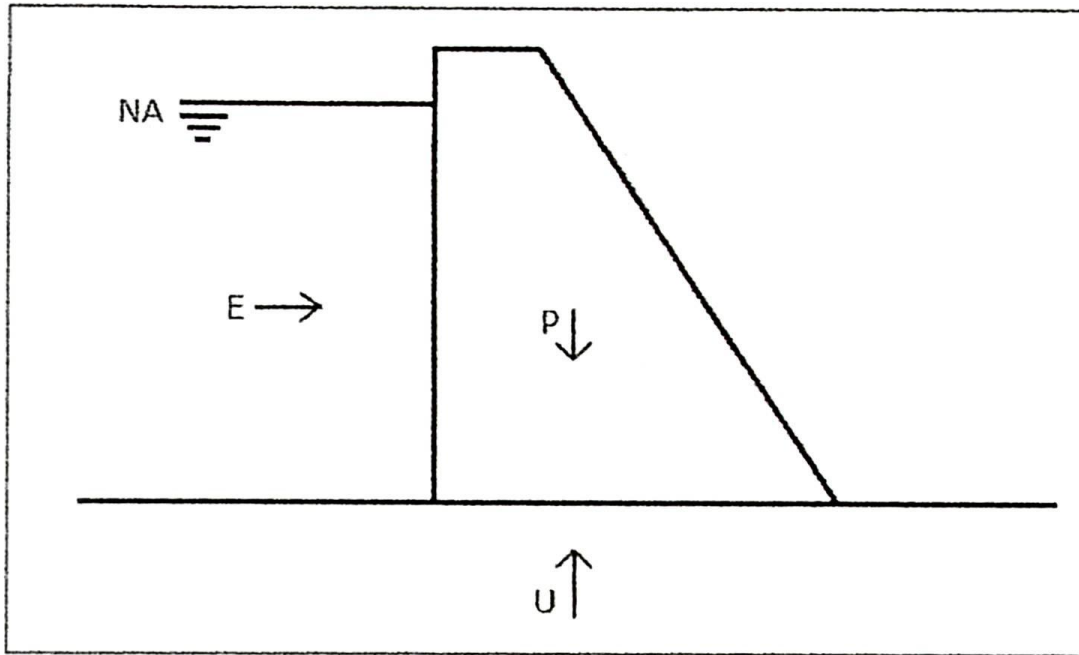


Figura 7: Efeito do empuxo, da força peso e da subpressão em uma barragem

3.1 Esforços atuantes na estabilidade de barragens

A estabilidade de uma barragem pode ser comprometida caso a fundação não apresente resistência adequada para suportar o peso (P). A existência de planos de menor resistência abaixo da fundação, uma falha sub-horizontal, por exemplo, pode levar ao deslizamento da estrutura da barragem para jusante, provocando sua ruína. Para compreensão dos condicionantes geológicos, a figura 7 apresenta simplificada, os esforços que afetam uma barragem.

Nesse esquema, o empuxo E , decorrente da água armazenada a montante, atua horizontalmente sobre a barragem. O empuxo é resistido pelo peso P da barragem, o qual pode ser ajustado, alterando-se as dimensões da mesma, conforme necessário para suportar o empuxo.

O peso P , por sua vez, deve ser suportado pela resistência mecânica do material (solo ou rocha) que constitui a fundação. Barragens de concreto, que aplicam pesos maiores por unidade de área, exigem rocha na fundação enquanto barragens de terra, que aplicam esforço menor por unidade de área, podem ser construídas sobre solo.

A figura 7 mostra o empuxo U decorrente da subpressão da água que percola sob a barragem. Essa água percola desde o reservatório e conseqüentemente,

apresenta carga hidráulica que depende da altura da barragem, descontada a perda de carga durante a percolação. A carga hidráulica é uma pressão conhecida como pressão neutra, cuja componente vertical é a subpressão. Como a subpressão atua de baixo para cima, a tensão decorrente anula parte do peso P da barragem, podendo provocar seu tombamento ou deslizamento.

Conforme acima exposto, duas das principais tensões atuantes em barragens, o esforço de resistência da fundação e a subpressão, são dependentes das condições geológicas. Essa informação, essencial, é mais um exemplo cabal da importância dos estudos geológicos nesse tipo de obra e os riscos geológicos associados.

3.2 Percolação de água

Uma vez que a barragem deve armazenar água, tem-se como princípio que a passagem de água, por qualquer caminho diferente daquele previsto no projeto, é indesejável. Entretanto, sabe-se que, independente do tipo de barragem, seja de concreto, terra ou enrocamento, sempre haverá uma quantidade de fluido percolante pela fundação, sendo por isso necessário controlar a água de percolação a fim de evitar o comprometimento da obra. Além de afetar diretamente a estabilidade da barragem devido ao efeito da subpressão, a percolação de água pela fundação ou pelo aterro, no caso de barragens de terra, pode provocar processos de *piping*.

Segundo Vargas (1977), *piping* é um tipo de ruptura que se dá nos casos em que há erosão, isto é, arrastamento de grãos de solo pelas forças de percolação. Trata-se de uma erosão interna, que se inicia em um ponto de emergência d' água e progride para trás, carreando os grãos de solo em forma de um filete d' água cujo gradiente é suficiente para arrastar os grãos. Como resultado tem-se a formação de um tubo ao longo do filete d' água crítico.

O desenvolvimento deste fenômeno em uma barragem de terra reduzirá a resistência da fundação, pois a pressão dos materiais compactados será perdida, devido à passagem d' água e conseqüentemente toda a estrutura superior será comprometida.

3.3 Paredes de escavação

A ação da gravidade corresponde à principal solicitação sobre a estabilidade das paredes de escavação. O processo de escavação provoca mudança no comportamento desse esforço e, conseqüentemente, ocorrem alterações nas tensões presentes no maciço rochoso, em decorrência da descompressão causada pela retirada do material.

Para garantir a estabilidade das paredes são necessários estudos detalhados sobre as descontinuidades existentes no maciço rochoso e seus efeitos na estabilidade.

A escavabilidade (grau de facilidade em escavar o maciço); 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) são alguns dos demais fatores que podem implicar riscos geológicos.

CAPÍTULO 4:

RISCO GEOLÓGICO: RELAÇÃO ENTRE RISCO E INCERTEZA

Conceitos relacionados à temática do risco, bem como algumas classificações e fatores associados, serão abordados neste capítulo, visando dois objetivos: 1) apresentação do “risco geológico”, fenômeno que pode estar presente em todas as obras de engenharia; 2) divulgação do conhecimento buscando conscientizar o proprietário da obra e as empreiteiras de que a prevenção é menos complicada e custosa do que a remediação.

1 *Conceitos de risco, desastre e catástrofe*

Um **risco natural** consiste em qualquer processo que represente uma ameaça à vida humana ou à propriedade.

Um **desastre natural** é o efeito do risco perante a sociedade, ou seja, utiliza-se o termo desastre para designar acidente que resulta em danos consideráveis à propriedade, incluindo perdas de vidas e feridos.

Uma **catástrofe** é a denominação dada para um desastre massivo, quando há grande número de vidas perdidas e é necessário um gasto considerável de tempo e dinheiro para recuperação da área atingida.

A atividade humana tem interferido na frequência de manifestação e na magnitude dos processos naturais resultando em situações de risco, desastre e catástrofe. Esta relação é exemplificada na figura 8.

O termo “natural” que acompanha as definições acima faz referência a todos os tipos de risco decorrentes da dinâmica do planeta. Corresponde às inundações; alterações severas no tempo que podem resultar na formação de tornados; mudanças climáticas; terremotos; vulcões; tsunamis e outros fenômenos cada vez mais frequentes. Neste trabalho será considerado apenas o **risco geológico**, ou seja, o risco provocado predominantemente por processos geológicos.

A compreensão da relação entre os diferentes conceitos pode ser explicada com o seguinte exemplo: chuvas torrenciais em determinada área podem levar a situações de inundação. As inundações são consideradas um risco natural. Caso haja vertentes potencialmente instáveis, na área atingida pelas chuvas, poderão ocorrer deslizamentos ou avalanches, que são considerados riscos geológicos.

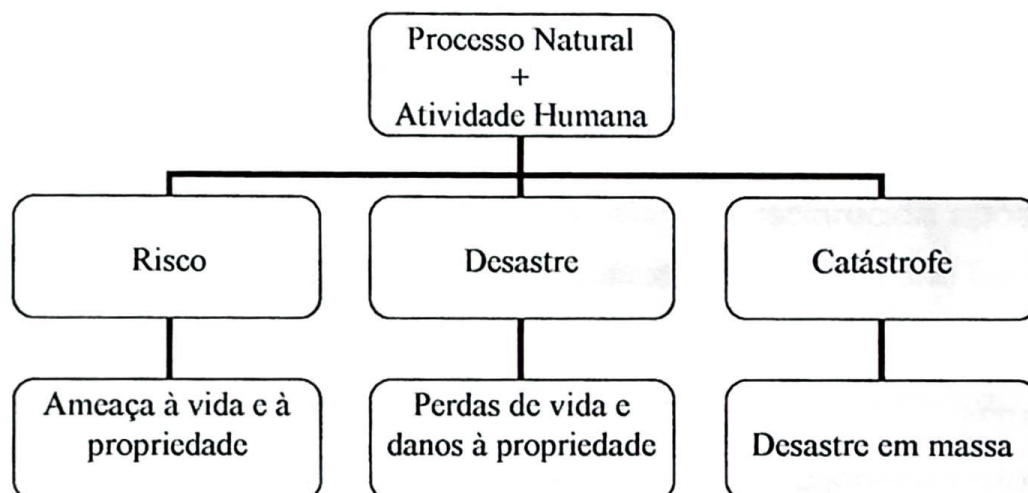


Figura 8: Possíveis consequências da manifestação de um processo natural associado à atividade humana

Portanto, define-se como risco geológico uma situação que envolve perigo, perda e dano ao homem e as suas propriedades, devido à presença de um determinado processo ou condicionante geológico. Os 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 após a fase de operação.

2 *A incerteza na investigação geológica*

As obras de engenharia sempre provocam alguma alteração no meio ambiente. O comportamento desta alteração, em qualquer etapa do projeto deve ser avaliado 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 produzem aumento da incerteza.

Sempre existirá algum grau de incerteza no conhecimento geológico do local de implantação de um projeto de engenharia civil de qualquer porte. Por isso, havendo disponibilidade de tempo e investimento suficiente para conhecer detalhadamente a área do projeto, é necessário aplicar diferentes métodos de investigação e possuir equipe devidamente qualificada para interpretar os dados obtidos (MINICUCCI, 2008).

A insuficiência de informação é fator determinante no grau de incerteza em determinado sistema, assim como a introdução de informação de natureza irrelevante no problema. No entanto, a quantidade de incertezas pode ser reduzida pela obtenção de novas informações relevantes, como resultado de algumas ações, tais como observação de um fato novo, execução de um experimento, obtenção de um registro histórico (KLIR, 1995). Em muitos casos, a incerteza é reduzida quando são compreendidos os processos geológicos que ocorreram no local e a maneira como podem prejudicar o empreendimento. Atualmente há recursos computacionais que permitem a criação de representações geológicas tridimensionais facilitando a compreensão e visualização do terreno e possibilitando a escolha dos métodos de investigação mais apropriados.

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).

2.1 Análise da incerteza a partir de métodos estatísticos

Avaliando a questão do risco e da incerteza sob pontos de vista estatísticos, Andrade (2000) define risco como uma estimativa do grau de incerteza que se tem com respeito à realização de resultados futuros desejados. Vieira (1978) aborda o risco e a incerteza separadamente, apresentando as seguintes definições, para o caso da avaliação de projetos de aproveitamento de recursos hídricos:

- 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 realização de projeto detalhado e o investimento são determinantes para reduzir o grau de incerteza e consequentemente, o risco geológico.

A estimativa das probabilidades é a parte mais complicada de um dado problema, pois para fazer estimativas é necessário superar o problema conhecido como “tomada de decisão”, que consiste na escolha da alternativa mais apropriada, mediante critérios estabelecidos, para minimizar o grau de incerteza presente. Entretanto, esta questão se torna um problema quando há necessidade de atuar no mundo real, visto que aparece um fator denominado “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 aos problemas de 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 que possam desencadear um problema. 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. Trata-se de método direcionado a problemas inteiramente novos, nos quais os recursos humanos envolvidos dispõem apenas de informações puramente 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 como, por exemplo, uma projetista, deve superar outro obstáculo, a escolha de alternativas. Pode ser utilizado um critério matemático para auxiliar a escolha das alternativas, entretanto, sempre serão apresentados 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 um modelo matemático que simule uma situação do mundo real. A operação deste modelo pode ser feita a partir do uso do método de Monte Carlo.

O método de Monte Carlo é um processo de operar modelos estatísticos de forma a 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 problemas do mundo real, em geral, isto não é possível.

Retomando o exemplo de construção de uma barragem, para aplicar um modelo matemático visando estimar a medida de incerteza, seria necessário reconhecer todos os fatores envolvidos, o que é muito difícil quando se trata de um ambiente geológico.

Mesmo que em uma determinada barragem seja realizado um volume de investigações superior ao exigido pela seguradora, sempre poderá existir uma falha, ou uma unidade litológica, como uma camada de calcário p.ex., que poderá não ser detectada e, conseqüentemente, o tomador de decisões não terá o controle dos fatores probabilísticos.

Observando estes aspectos, torna-se delicado o emprego da análise de incerteza a partir de métodos estatísticos para os problemas que envolvem risco geológico, visto que os modelos matemáticos muitas vezes não se enquadram nas condições proporcionadas pelos processos geológicos.

3 *Riscos abrangentes e específicos*

No decorrer da construção de um empreendimento, uma série de problemas pode aparecer caso as etapas anteriores 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 para estimar as proporções de perdas financeiras e do tempo de recuperação. Com isso, optou-se por realizar uma classificação que aborda parâmetros de dimensão, dividindo o risco geológico entre abrangente e específico.

São classificados como **riscos abrangentes** todos aqueles que podem levar ao comprometimento total da obra. Inseridos nesta classificação encontram-se os seguintes acontecimentos:

3.1 Riscos abrangentes: estanqueidade

O reservatório, lago formado a montante de uma barragem, constitui um dos elementos principais da obra. Para garantir sua estanqueidade, ou seja, para não haver fuga d' água significativa, é necessário analisar as condições geológicas, geomorfológicas, geotécnicas e hidrogeológicas.

O esvaziamento do reservatório, ou mesmo o retardo no tempo de enchimento, pode ser provocado por diversos fatores, tais como: sucessivas percolações de água provocadas pela presença de uma falha, ou de uma de rocha permeável; pelo desenvolvimento de erosão tubular regressiva (*piping*); ou pelas condições topográficas, no caso, pela disposição do lençol freático, em relação ao relevo regional.

Alterações no nível do lençol freático em relação à topografia e à rocha existente podem resultar em diferentes comportamentos do reservatório, em termos de perda d'água, os quais são sintetizados em dois casos (Fig. 9).

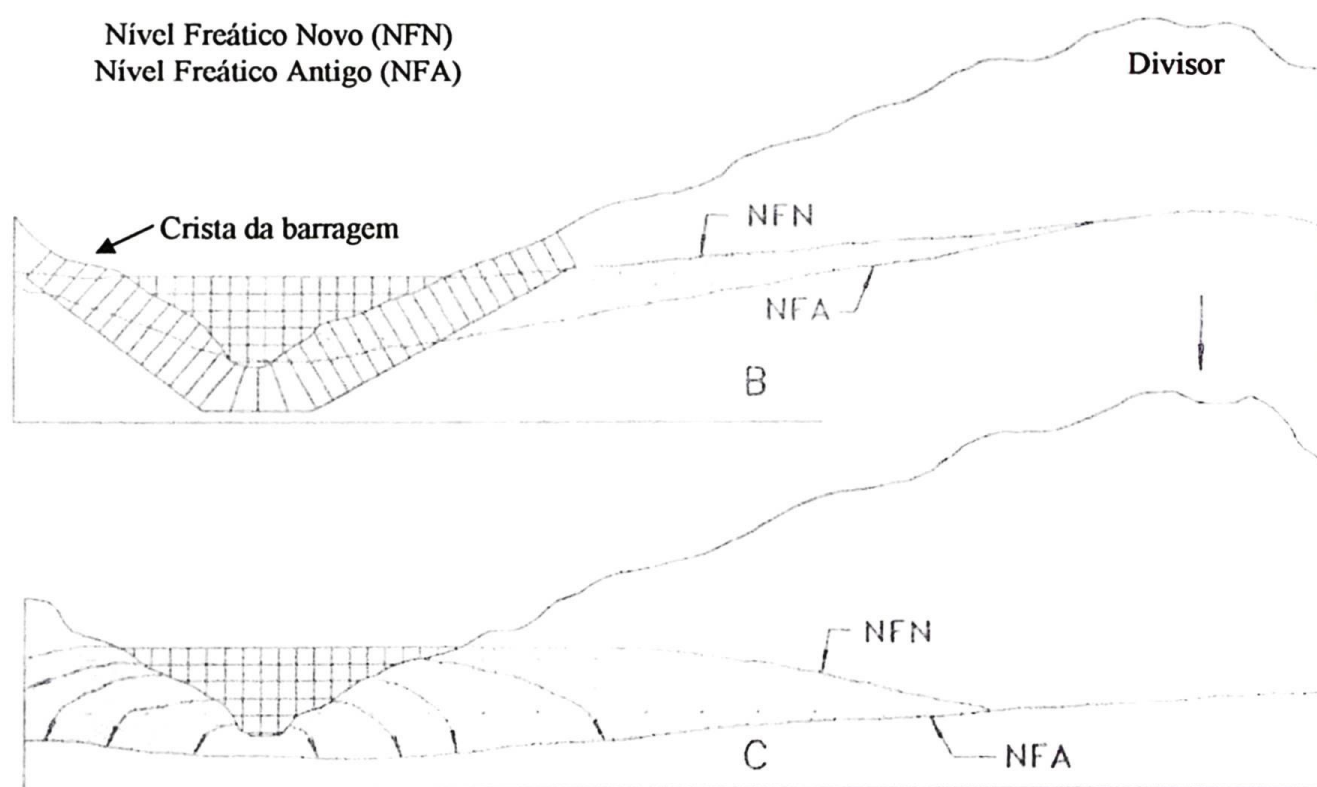


Figura 9: Comportamento do lençol freático de acordo com a topografia e a litologia (Adaptado de MARQUES FILHO E GERALDO, 1998)

No primeiro caso, o risco de perda d' água é pequeno, porém com o grande abatimento do lençol, o reservatório perde água para as ombreiras até haver a saturação em um nível mais elevado. É necessário que a impermeabilização das ombreiras seja mais extensa, em relação ao que é apresentado na figura e a presença de formações permeáveis no reservatório e ao longo dos divisores poderá requerer estudos e tratamentos.

No segundo caso, inicialmente podem ocorrer grandes perdas d'água que serão gradativamente reduzidas, mediante estabelecimento de um regime de longos caminhos de percolação. A presença de formações permeáveis pode inviabilizar a obra.

3.2 Riscos abrangentes: colapso de estrutura

A estrutura de uma barragem seja 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.

Há diversos exemplos de condições geológicas imprevistas ou que se revelaram mais desfavoráveis do que o previsto, levando à ruína da estrutura da barragem. Entre esses se tem a ocorrência de *piping* sob a barragem e os sismos induzidos, decorrentes, em geral, do enchimento do reservatório.

3.3 Riscos específicos

Os riscos específicos são um tipo de risco que não afeta o conjunto da estrutura, mas sim partes específicas e não necessariamente levam ao rompimento da barragem.

Entre eles, há diversas 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.

4 **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. Definido no tópico 1 *Conceitos de risco, desastre e catástrofe*;
- 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.

Capítulo 5:

RESULTADOS OBTIDOS – ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RISCO GEOLÓGICO

1 *Análise 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 10.

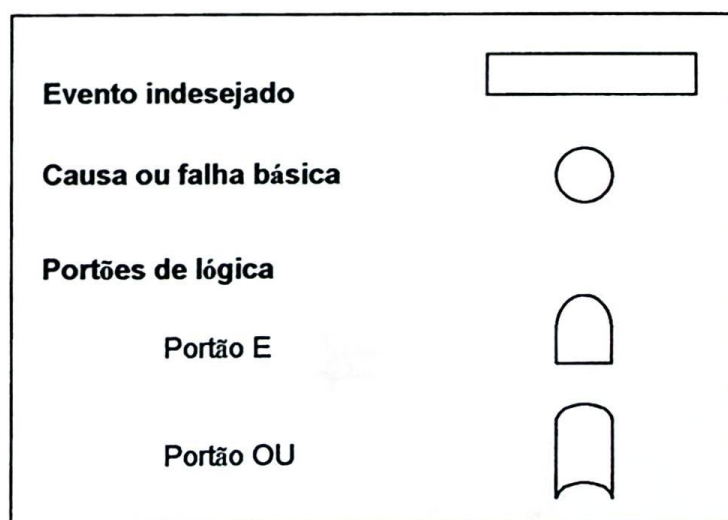


Figura 10: Símbolos utilizados na AAF

A elaboração da árvore para análise do risco geológico (Fig. 11) contém alguns dos riscos geológicos descritos na tabela 1 (ANEXO 1).

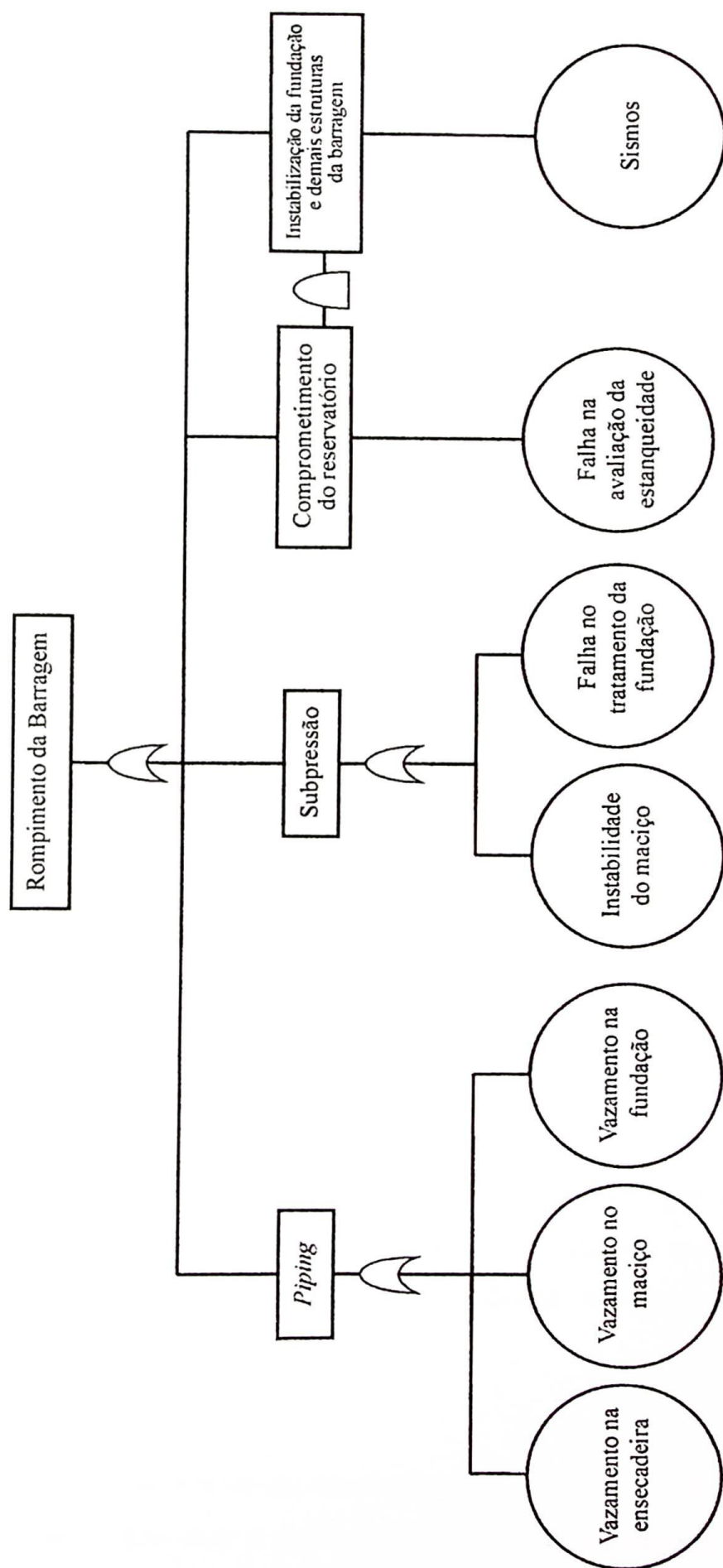


Figura 11: Análise do risco geológico por meio de uma Árvore de Falhas

2 Avaliação de risco geológico

A avaliação de riscos é um processo que utiliza os resultados da análise para determinar o controle e monitoramento de uma área afetada.

Os trabalhos de avaliação são conduzidos mediante comparações entre critérios de tolerabilidade de riscos previamente estabelecidos. Neste trabalho, para avaliar o risco geológico, foi criada uma matriz de risco com os seguintes parâmetros:

- Identificação.
- Localização.
- Avaliação.
- Quantificação.
- Remediação.

A matriz de risco está apresentada na tabela 1 (ANEXO 1) e seus componentes estão descritos a seguir.

2.1 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 geológicos e, na terceira, os condicionantes geológicos associados.

2.2 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.

2.3 Avaliação

O parâmetro da Avaliação 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 (veja tópico 3 *Riscos Abrangentes e Específicos, Cap. 4*).

2.4 Quantificação

Observando a fórmula 4 (veja tópico 4 *Quantificação do risco, Cap. 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 geológico 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.

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

2.4.1 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, para os riscos menos propensos a ocorrer até extremamente possível, aplicado principalmente em situações em que o fenômeno associado ao risco já se manifestou anteriormente. Após a descrição, há duas classificações que 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.

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

2.4.2 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 associadas às interferências com o escopo, o prazo, o custo e a qualidade do empreendimento. Na terceira coluna estão as notas atribuídas às classes estabelecidas.

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

2.4.3 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 aos riscos geológicos utilizados para exemplificar a matriz de risco, constantes da tabela 1 (ANEXO 1).

Tabela 4: Análise de Gravidade

Possibilidade \ 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 (ANEXO 1)

Possibilidade \ 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. Observe que a tabela apresenta, na terceira coluna, um exemplo da ação que pode ser tomada em decorrência da gravidade do risco geológico. Estas

ações não foram 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

2.5 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.

2.6 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)

3 Exemplo de uso da matriz de risco

A matriz de risco é elaborada para cada obra, considerando os condicionantes geológicos, com o objetivo de avaliar semiquantitativamente os riscos geológicos identificados. Assim, para facilitar o uso da tabela 1 (ANEXO 1), foram listados alguns passos:

- Passo 1: Encontrar os riscos, dentro do grupo *Identificação*;
- Passo 2: Ler a coluna *Localização*, para constatar que os riscos identificados encontram-se dentre as estruturas descritas;
- Passo 3: Ler as colunas do grupo *Avaliação*, para ter conhecimento do *efeito* e da *dimensão* que os riscos podem causar ao empreendimento.
- Passo 4: Ver atentamente as notas do grupo *Quantificação* e em seguida comparar os resultados com as tabelas 2, 3 e 4;
- Passo 5: Verificar na coluna *Remediação* se as *soluções e tratamentos* descritos podem ser aplicados nas estruturas, para solucionar o problema.

Deve-se ter em mente que a matriz de risco (ANEXO 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.

Capítulo 6:

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto de avaliação de risco geológico em barragens surgiu mediante a observação de que, em muitas situações de barragens construídas, ocorreu interferência entre diferentes processos geológicos, o que gerou dinâmicas que ainda são insuficientemente conhecidas, além do potencial de intensificação por ações antrópicas. Acidentes em barragens, geralmente, resultam de algum tipo de anormalidade, que pode ser determinada por meio de análises de risco. Desse modo, é essencial elaborar metodologia visando à prevenção de acidentes, que constitui o objetivo desta pesquisa. Devem ser identificados os riscos geológicos e detectadas as imposições geradas pelo empreendimento sobre o cenário natural representado pelos condicionantes geológicos.

Com base nesse contexto, realizou-se investigação acerca de métodos de análise de risco geológico. Partiu-se da análise da incerteza e foram testados métodos estatísticos, na tentativa de criar um modelo para análise do risco. A busca foi infrutífera, pois não se dispõe de séries estatísticas para tal quantificação. Foi possível concluir que, para problemas que envolvem risco geológico, os modelos matemáticos, como os que são operados pelo método de Monte Carlo, não se enquadram nas condições proporcionadas pelos processos geológicos. Este método, por exemplo, é bem aplicado em diferentes tipos de problemas tais como controle de chuvas, previsão de custos de produção e estudos de viabilidade econômica.

Mediante os resultados obtidos, iniciou-se a seleção de uma técnica de análise de risco adequada ao risco geológico. A técnica escolhida foi a Análise por Árvore de Falhas, cujo emprego mostrou-se muito satisfatório 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 por Árvore de Falhas facilitou o desenvolvimento da avaliação de risco, que resultou em uma matriz para risco geológico e tabelas associadas. A matriz de risco geológico é uma ferramenta eficiente e prática, utilizada por empreiteiras, projetistas e seguradoras. Em geral, os riscos são classificados de maneira subjetiva, mediante a experiência de geólogos e engenheiros. Tradicionalmente é organizada uma matriz na qual os riscos são categorizados em: baixo, médio e alto.

Neste trabalho, a introdução de fatores de quantificação permitiu avançar na análise e avaliação de risco geológico. A análise de possibilidade e periculosidade resultou em classificações distintas. Em seguida, a associação dos fatores permitiu a análise de gravidade e a classificação de risco geológico em: aceitável, preocupante e inaceitável.

A partir da seleção dos principais riscos geológicos que podem comprometer uma barragem e da determinação de fatores para quantificação foi possível aumentar o grau de detalhe e de objetividade da análise e avaliação. As notas atribuídas aos graus de possibilidade e periculosidade foram baseadas no bom senso, após conhecimento de alguns critérios utilizados por geólogos e engenheiros atuantes na área. A pesquisa indicou que os riscos geológicos identificados restringem-se às classes: aceitável e preocupante.

Análises de custo, tempo, perdas de vida e perdas materiais não estão presentes na matriz de risco, pois se buscou empregar apenas informações que possam ser utilizadas em todas as construções de barragens. Observe que custo, tempo, escopo e qualidade são variáveis presentes na análise de periculosidade e que se referem à interferência do risco geológico, sem associação ao porte do empreendimento ou ao investimento disponível.

Referências

- ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para Análise de Decisão**. 2 ed. Rio de Janeiro, LTC. 2000. 277p.
- ANDRIOLO, F. R. **Contribuições para o Conhecimento e Desenvolvimento do Concreto Rolado**, Brasil, Barber Greene. 1989.
- 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.
- KLIR, G. J. Principles of uncertainty: What are they? Why do we need them? **Fuzzy Sets and Systems**, v. 74, p. 15-31, 1995.
- 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.

Anexo 1:

Tabela 1: Matriz de Risco Geológico

Identificação									
Referência	Risco	Condicionante Geológico	Localização	Avaliação		Quantificação			Remediação
			Estrutura	Efeitos	Dimensão	Possibilidade	Periculosidade	Gravidade	Soluções e tratamentos
R01	Erosão interna (piping)	Camadas de areia com elevada condutividade hidráulica	Ensecadeira	Percolação de água	Específico	4	9	36	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	Pode ser abrangente de acordo com a estrutura atingida	1	6	6	Dosagem adequada dos concretos
R04	Deslizamentos planares e em cunha	Presença de fraturas subverticais ou inclinadas	Taludes de escavação da casa de força, do vertedouro, da eclusa, dos canais de aproximação, de restituição, 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	Aceração 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, trincas e rachaduras das estruturas afetadas	Pode ser abrangente de acordo com a estrutura atingida	2	12	24	Sobreescavação e recomposição com concreto ou chavetamento da fundação
R07	Subpressões	Presença de fraturas de alívio sub-horizontais com elevada permeabilidade até 15 metros de profundidade	Barragem de enrocamento e de concreto, ensecadeiras de montante e de jusante	Rebaixamento das estruturas afetadas	Pode 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	Pode 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 restituição, de adução, de fuga e de navegação	Escorregamentos	Específico	2	6	12	Remoção dos corpos de talus

ANEXO