

ANÁLISE POR ÁRVORE DE EVENTOS: FERRAMENTA PARA GESTÃO DE RISCO EM BARRAGENS DE TERRA

Event Tree Analysis: a tool for managing risk of earth-dam failures

Terezinha Espósito*

Mauro Naghettini **

Josias Ladeira ***

Laura Caldeira ****

RESUMO – Apresenta-se nesse artigo uma avaliação crítica de um dos instrumentos que vem sendo empregado em análise de risco, no contexto da gestão de segurança de barragens de terra. Trata-se da análise por Árvore de Eventos, ou simplesmente ETA, da terminologia inglesa Event Tree Analysis. Inicialmente, a fundamentação probabilística da análise por Árvore de Eventos é apresentada, procurando evidenciar os principais atributos da sistematização de ocorrências, efeitos e suas respectivas probabilidades, dentro do quadro de avaliação da segurança de barragens de terra. Em seguida, a metodologia ETA é aplicada, de forma semi-quantitativa, a uma barragem brasileira, em operação, restringindo-se à estimação da probabilidade de ruptura decorrente de erosão tubular regressiva, ou *piping*, pela barragem, pela fundação e da barragem para a fundação. Por fim, é realizada uma análise crítica do uso desse método, tendo em vista o estudo do caso proposto, como uma forma de gerar, além das probabilidades, outras informações potencialmente úteis na gestão da segurança global da barragem.

SYNOPSIS – This paper aims to provide an evaluation of one of the instruments that has been employed in risk analysis, as applied in the context of the safety management of earth dams, namely the Event Tree Analysis or simply the ETA method. First, the probabilistic foundations of ETA are presented, focusing on the main attributes of the logical links among occurrences, effects and their respective probabilities, within the framework of earth dam safety evaluation. In the sequence, the ETA method is applied, in a semi-quantitative approach, to a large Brazilian dam which is currently in service. This application was restricted to estimating the probability of dam failure resulting from piping through the embankment itself, through the foundation and from the dam to the foundation. Finally, a critique of the ETA method is provided, on the basis of the case study in focus, as a form to generate more information, other than the computed probabilities, which can be potentially useful for managing the global dam safety.

PALAVRAS CHAVE – Barragens, gestão de segurança, análise de risco, árvore de eventos.

* Professora Adjunto do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: esposito@etg.ufmg.br

** Professor Associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: naghet@netuno.lcc.ufmg.br

*** Professor do Centro Universitário UNA. E-mail: proqual@uol.com.br

**** Investigadora Coordenadora do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
E-mail: laurac@lneec.pt

1 – INTRODUÇÃO

No âmbito das barragens de terra e de enrocamento pode-se dizer que a competência da engenharia brasileira em planejamento, projeto e construção é reconhecida mundialmente. Entretanto, ainda existem barragens sem critérios de projeto e de construção, sem uma correta inspeção e manutenção e sem uma gestão de segurança. Nesse contexto, há que reconhecer a experiência mundial, que mostra que os custos necessários à real garantia de segurança de uma barragem são pequenos se comparados com aqueles que se seguem em caso de uma ruptura (Menescal, 2004).

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2002), uma barragem segura é aquela cujo desempenho satisfaz as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes relacionados a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais. No Brasil podem ser destacadas ações governamentais voltadas para a segurança de barragens totalmente em consonância com as diretrizes da ICOLD (Comissão Internacional de Grandes Barragens) e do CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens). Nessas ações são evidenciados o cadastramento das barragens nacionais, a elaboração e a divulgação de procedimentos para a realização de inspeção de segurança em barragens, o treinamento de técnicos e a realização de inspeção em barragens por especialistas. Vale também ressaltar que já foi sancionado um arcabouço legal/institucional, a Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.

A tendência da disseminação da cultura de segurança e de gestão de riscos em relação às barragens é mundial. Cita-se, por exemplo, a legislação portuguesa (RSB, 1990) que já corrobora neste sentido, quando afirma que a segurança das barragens constitui uma preocupação permanente para as entidades públicas e privadas, tendo em vista os riscos potenciais que representam as possibilidades de ruptura.

Pode-se dizer que essa gestão de risco é totalmente procedente, uma vez que o risco é inerente às obras geotécnicas e às estruturas hidráulicas. Na realidade, nenhum projeto geotécnico é livre de risco. Esse risco pode ser gerido, minimizado, partilhado, transferido ou aceito, porém nunca ignorado (Latham, 1994). Tem-se, portanto, que a gestão da segurança de barragens é intrinsecamente um problema de gestão do risco e, por conseguinte, de tomada de decisões, considerando as incertezas. De forma geral, as atividades relativas à gestão do risco englobam a análise de riscos, a apreciação do risco, a tomada de decisão e o controle (Caldeira, 2005). Nesse sentido, pode-se dizer que as análises de riscos podem ser qualitativas, semi-quantitativas e quantitativas, e funcionam como um complemento das abordagens tradicionais de avaliação de segurança das barragens.

Inserido neste contexto encontra-se este artigo, cujo objetivo é o de apresentar a Análise por Árvore de Eventos (ETA – Event Tree Analysis), enfatizando o seu embasamento probabilístico e a sua funcionalidade como ferramenta de análise de risco em barragens de terra. Essa metodologia quantitativa de análise de risco é aplicada, dentro de uma abordagem semi-quantitativa, a uma barragem brasileira, em operação. No caso específico deste trabalho, a aplicação se restringiu à estimação da probabilidade de ruptura em relação à chamada erosão tubular regressiva ou simplesmente *piping*.

2 – ÁRVORE DE EVENTOS (EVENT TREE ANALYSIS - ETA)

2.1 – Considerações sobre as Árvores de Eventos

A metodologia da Árvore de Eventos foi desenvolvida no início dos anos 1970 para avaliação de riscos relativos às centrais nucleares. Atualmente tem um vasto campo de aplicações na Enge-

nharia Civil, como, por exemplo, na avaliação de segurança contra incêndios e nas operações de rede de abastecimento.

Segundo Berthin e Vaché (2000) *apud* Caldeira (2005), a análise por Árvore de Eventos se baseia num esquema lógico, que permite ligar, por método indutivo, os acontecimentos iniciadores às consequências que podem provocar, calculando as probabilidades associadas.

A Árvore de Eventos é um caso particular de análise por Árvore de Decisão. Nessas análises são consideradas as incertezas inerentes ao processo de decisão, permitindo a determinação do risco associado a cada decisão alternativa, assim como medidas de controle e de minimização. Segundo Ang e Tang (1990), esse tipo de análise deve incluir os seguintes componentes:

- Relação de todas as alternativas praticáveis.
- Resultados de cada alternativa.
- Estimativa da probabilidade associada a cada resultado.
- Avaliação das consequências relativas a cada combinação de alternativa e de resposta.
- Critério para decisão.
- Avaliação sistemática de todas as alternativas.

As Árvores de Eventos são construídas, de modo geral, através de sistemas binários ou dicotômicos, onde apenas se admite a ocorrência do evento, ou a sua não ocorrência, numa determinada sequência. Sua construção é sequencial, sendo conduzida da esquerda para a direita, em uma série de possíveis episódios decorrentes do evento iniciador. Inicializa-se por um evento iniciador, sendo os eventos subsequentes produzidos de acordo com a ordem das respectivas ocorrências. Ramo é a designação de cada trajeto que parte do evento iniciador. Trata-se, na realidade, de ligações gráficas, iniciando no evento iniciador (nó de possibilidades comum) até o ponto terminal (Caldeira, 2005).

O sucesso ou falha de cada estágio deve ser cuidadosamente definido para garantir que o evento em potencial estágio de falha esteja relacionado fisicamente ao desenvolvimento do fenômeno em estudo e não inclua ações relacionadas à operação ou ao tratamento remediador de eventos desfavoráveis. Nesse sentido, o conhecimento dos fenômenos físicos relacionados aos eventos em análise devem ser estudados e compreendidos. Pode-se dizer que a aplicação desse método pressupõe o correto entendimento dos eventos relacionados ao sistema, devendo ser claramente definidos na abrangência do processo em análise e não entendidos apenas como a descrição dos estágios de funcionamento desse sistema. Assim, na identificação da sequência de eventos deve-se evitar a descrição de eventos que não estejam relacionados fisicamente ao fenômeno.

A Análise por Árvore de Eventos destaca-se como ferramenta na análise de risco, pois possibilita um adequado entendimento, por ser gráfica, proporcionando discernimento qualitativo do desenvolvimento do fenômeno em estudo. Pode ser usada para avaliar qualitativamente a confiabilidade do sistema pela comparação com a avaliação realizada por outros métodos. A Árvore de Eventos é particularmente adequada para a análise de sistemas que integram diversos componentes de segurança. O método pressupõe que se consiga identificar, para cada subsistema em análise, os acontecimentos iniciadores que podem induzir a falhas, particularmente as relevantes para o comportamento global do sistema. O método permite estimar a probabilidade de ocorrência de sequências de eventos, podendo, assim, ser aplicado também no âmbito das análises semi-quantitativas e quantitativas.

Como vantagens em relação à sua utilização podem ser citadas:

- Contempla o projeto, a construção e o desempenho da barragem.
- Considera detalhes de projeto, como o uso de filtros.
- Possibilita o desdobramento em componentes menores, as quais podem resultar em estimativas mais confiáveis das probabilidades associadas aos eventos.
- É um meio lógico e gráfico de ilustrar a sequência de eventos, desde o seu início até completar o conjunto de possíveis resultados.

- Nos casos em que a sequência de eventos é conhecida, o processo de construção da Árvore de Eventos ilustra graficamente o que é conhecido acerca de possíveis modos que o sistema pode desenvolver, dadas as condições de operação e o início do evento.
- Por ser um processo de modelagem indutiva, a análise por Árvore de Eventos possibilita identificar situações nas quais as sequências de eventos não são conhecidas com certeza, mas podem ser reveladas pelo estudo e conhecimento prévio de especialistas e profissionais experientes.

Numa Árvore de Eventos a probabilidade de ocorrência de qualquer fato é condicionada pelos eventos precursores. O processo de cálculo é efetuado após atribuição da probabilidade a cada evento individual. A probabilidade de cada ramo é a probabilidade de que a ruptura ocorra como resultado da cadeia particular de eventos considerada. A probabilidade total da ruptura da barragem é a soma das probabilidades de todas as cadeias de eventos que levam à ruptura.

As Árvores de Eventos podem incluir a avaliação das consequências, através da Árvore de Consequências, a qual se baseia nas considerações envolvidas para a estimativa das consequências de rupturas.

Pode ser utilizado também um Diagrama de Influências, onde se apresenta, de forma simples, a lógica do sistema, as influências e as incertezas que afetam seu desempenho, utilizando-se os parâmetros mais relevantes.

2.2 – Considerações sobre a utilização da Árvores de Eventos em barragens de terra

O método de Árvore de Eventos foi primeiramente aplicado às barragens, com o propósito de avaliação de risco, por Whitman (1984) *apud* Hartford e Baecher (2004). Alguns exemplos de aplicação desse método são: a análise de risco da barragem de Cousier, estudo feito por BC Hydro (1995) *apud* Hartford e Baecher (2004); o estudo de barragem projetada, realizado por Landon-Jones *et al.* (1996) *apud* Hartford e Baecher (2004) e o estudo de três núcleos de terra em barragem de enrocamento na Noruega, elaborado por Johansen *et al.* (1997) *apud* Hartford e Baecher (2004). Nesses estudos, a Árvore de Eventos foi usada, em uma primeira etapa, para avaliar o início de *piping* e uma possível intervenção para se evitar a ruptura das respectivas barragens.

A aplicação da Árvore de Eventos no âmbito das barragens de terra envolve a modelação da barragem como um sistema constituído por vários subsistemas, com funções individuais bem definidas, que asseguram a funcionalidade daquela estrutura. Essa metodologia, quando usada de forma qualitativa, visa contribuir para o melhor desempenho da barragem, identificando e dimensionando medidas de mitigação do risco. A sua utilização de forma quantitativa implica a associação de um valor apropriado de probabilidade a cada ramo da árvore. A estimativa desta probabilidade, efetuada de forma separada ou conjunta, pode ser realizada através de análises estatísticas, modelos de confiabilidade, análises por Árvores de Falhas ou pela prescrição de probabilidades subjetivas, extraídas da opinião qualificada de peritos (Caldeira, 2005).

Uma interpretação qualitativa parte, em geral, do pressuposto de que todos os acontecimentos iniciadores são possíveis. Essa interpretação visa estimar as probabilidades de ruptura e das sequências e combinações de eventos, a partir da probabilidade de ocorrência dos acontecimentos iniciadores. Para que o processo de estimativa de probabilidades seja útil e válido, o método deve ter como princípios a reprodutibilidade, o tratamento de incerteza e a validação. A reprodutibilidade significa que o modelo deve ser reproduzido e chegar aos mesmos resultados. Portanto, esse modelo deve ser bem especificado e os dados devem estar disponíveis a quem o pratica. Complementarmente, as análises devem deixar claras as fontes, a natureza e as magnitudes de incertezas. A validação significa que as análises devem ser acessíveis e fáceis de serem entendidas e comprovadas (Ladeira, 2007).

A Árvore de Eventos é uma forma conveniente de desagregar as sequências de ruptura em partes e de combinar os resultados obtidos por essas partes para calcular a confiabilidade de um sistema global. O nível de desagregação depende da disponibilidade de dados sobre as componentes em estudo, de modelos ou de técnicas analíticas para a sua análise, de parâmetros e de hipóteses específicas para avaliação, da extensão dos conhecimentos da equipe envolvida e da grandeza das probabilidades associadas ao modo de ruptura em estudo. No caso de uma barragem isso pode não ser tão simples. Porém, a própria atividade de construção de uma Árvore de Eventos é altamente instrutiva, podendo conduzir à ponderação de aspectos que talvez não fossem considerados em outras análises (Caldeira, 2005).

Ladeira *et al.* (2007, 2008) citam, também, que a Árvore de Eventos se apresenta como uma ferramenta muito eficaz na análise de risco de barragens, pois possibilita um adequado entendimento, proporcionando discernimento qualitativo do desenvolvimento do fenômeno em estudo. Pode ser usada para avaliar qualitativamente a confiabilidade do sistema e comparada com a avaliação realizada por outros métodos. É um meio lógico e gráfico que ilustra a sequência de eventos desde o seu início até completar o conjunto de possíveis resultados.

No caso específico das barragens, Hartford e Baecher (2004) ressaltam que, tipicamente, as rupturas estruturais podem ser amplamente agrupadas em três modos principais:

- Rupturas hidráulicas, devidas à falta de controle do fluxo da água através do maciço.
- Movimento de massas, devido a cargas extremas
- Distribuições anormais de tensões no maciço e consequente deterioração da matriz do solo, podendo levar à condição de erosão interna.

Esses três modos de ruptura podem ser iniciados por mais de uma causa, podendo ser construída a Árvore de Eventos para cada combinação de modo de ruptura e evento iniciador. Cada ramo da árvore dará uma sequência ou mecanismo único de ruptura. Por isso, para a sua construção é necessário ter prévio conhecimento do mecanismo de ruptura em estudo. O modo de ruptura por *piping*, por exemplo, é escassamente compreendido e modelado.

Entretanto, podem ser encontrados estudos de risco aplicados na avaliação de formação de *piping* nas publicações de Vick e Stewart (1996), na barragem de Cousier (BC Hydro); Johansen, Vick e Rikartsen (1997), nas barragens de Viddals, Dravladasls-Svartevatn (NGI); Von Thun (1999), na barragem de Navajo (USBR) e Luehring, Russell, e Mares (2000), na barragem de Como *apud* Hartford e Baecher (2004). Nesses estudos, foram identificados seis eventos no caminho crítico que leva à formação de *piping*:

- Existência de fluxo concentrado de água no interior do maciço ou na fundação.
- Início de formação de *piping* por gradiente hidráulico crítico ou de velocidade de percolação de água suficiente para sua inicialização.
- Ocorrência de erosão na base do barramento, ou de algum outro ponto do maciço que venha a erodir, originada pela percolação de água descontrolada.
- Existência de potencial de intervenção, porém não praticada no tempo adequado.
- Entubamento contínuo (*pipe*), que se forma no maciço ou na fundação, permitindo a aceleração da erosão.
- Ocorrência de brecha, pela formação de um canal contínuo ou pelo colapso da crista, com vertimento de grande quantidade de água do reservatório.

A probabilidade de ruptura pode alterar-se com o tempo. Portanto, a probabilidade de ruptura por *piping* pode ser baixa em um dado momento, mas pode aumentar com o passar do tempo. Assim, devem ser incorporadas, em qualquer momento, as mudanças nos fatores que afetam as rupturas.

Durante a construção da Árvore de Eventos, que contempla a ruptura por *piping*, alguns aspectos devem ser considerados:

- Os resultados dependem da equipe de analistas.
- Caso a equipe disponha de dados limitados a partir dos quais possa estimar as probabilidades de progressão de rupturas até a formação da brecha, como geralmente se verifica, o seu uso fica limitado a cenários de início de *piping*. Entretanto, os resultados têm melhorado segundo trabalhos realizados por Wan e Fell (2002 e 2003) *apud* Hartford e Baecher (2004).
- Os resultados de avaliação da equipe de especialistas podem não ser voltados em direção às rupturas, sendo as probabilidades de *piping* superestimadas.

De forma geral, pode-se dizer que, por meio das Árvores de Eventos, são determinadas as probabilidades de ruptura que incidem sobre os aspectos relacionados com a resposta da própria barragem à sua estabilidade. Ressalta-se que o objetivo final de uma Árvore de Eventos é proporcionar indicações sobre o funcionamento da barragem, tendo em vista as incertezas associadas ao seu desempenho. Nesse sentido, a probabilidade de ruptura deve refletir a incerteza agregada ao próprio desempenho da barragem, do ambiente onde está inserida e dos processos naturais e humanos que a podem afetar (Caldeira, 2005).

Deve ser destacado que, numa análise por Árvores de Eventos, podem ser também incluídas avaliações das consequências, ou seja, dos custos ou dos benefícios associados a cada evento terminal. No caso dessas análises não serem incorporadas num primeiro momento, as consequências podem ser posteriormente avaliadas, tendo como base os efeitos de ondas de inundação. Neste artigo, são apresentadas as probabilidades de ruptura, não tendo sido incorporadas as análises de consequências. Por fim, um outro aspecto muito importante a ser evidenciado é a consistente fundamentação probabilística dessa metodologia (Ladeira, 2007; Ladeira *et al.*, 2007 e Ladeira *et al.*, 2008).

2.3 – Fundamentação probabilística do método da Árvore de Eventos

A aplicação do método da Árvore de Eventos pressupõe o entendimento da teoria das probabilidades a ele aplicada. Assim, é fundamental entender os princípios associados ao acontecimento aleatório simples, que advém da teoria de probabilidades. A Árvore de Eventos demonstra relações de causalidade, em que a realização do evento *A* influencia a probabilidade do evento *B*, conforme o cálculo de probabilidades condicionais pelo Teorema de Bayes (equação 1). A influência de causalidade implica também a reversão de sentido dessa causalidade.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B|A)P(A) + P(B|\bar{A})P(\bar{A})} \quad (1)$$

A ordem de eventos pode ser rearranjada, conforme o propósito em estudo. De acordo com a teoria de probabilidades, somente as probabilidades dentro da árvore são condicionais, os eventos não necessariamente necessitam ser causa e efeito. Esse princípio aplica-se mesmo sabendo que um evento *A* influencia, em alguma proporção, a ocorrência do evento *B*.

Esse conceito é mostrado na Figura 1, em que a frequência de ocorrência de um abalo sísmico, de determinada magnitude, pode causar liquefação no solo. Pode ser observado que na árvore da esquerda, na Figura 1, o solo se liquefaz se houver abalo sísmico maior que *m*, com a seguinte notação: *P* (liquefação|abalo > *m*). Outra forma de análise desses eventos é mostrada na parte direita da Figura 1. A situação de interesse nessa árvore é a probabilidade de abalos serem maiores que *m*, dado que houve liquefação do solo, segundo um hipotético estudo. Nesse caso, a notação é *P* (abalo > *m*|liquefação). Essa condição seria a ordem causal para o interesse do estudo arqueológico (Ladeira, 2007).

A ordem de eventos na árvore depende do interesse em estudo, relativo às relações causa e efeito, ou na forma de se entender a ocorrência do evento em ordem cronológica. Como esse fato não interfere nos valores de probabilidades marginais, é indiferente se definirem diferentes ordens de eventos em cada ramo da árvore. Então, de acordo com o interesse em estudo, os eventos devem ser colocados em ordem lógica, para facilitar o entendimento. O conjunto dos ramos de uma Árvore de Eventos representa resultados que são mutuamente exclusivos e coletivamente exaustivos. Quando os resultados de cada evento são discretos, a distribuição de probabilidades reduz-se à Função Massa de Probabilidades (*FMP*). Em cada estágio há a probabilidade de ocorrer o evento e o seu correspondente complemento, totalizando probabilidade igual a 1,0 em cada estágio. Por exemplo, num dado ramo de uma Árvore de Eventos a probabilidade de aumento das poropressões é estimada em 0,1. A probabilidade para o correspondente ramo em que não haja aumento de poropressões no maciço é de 0,9 (complemento do primeiro ramo).

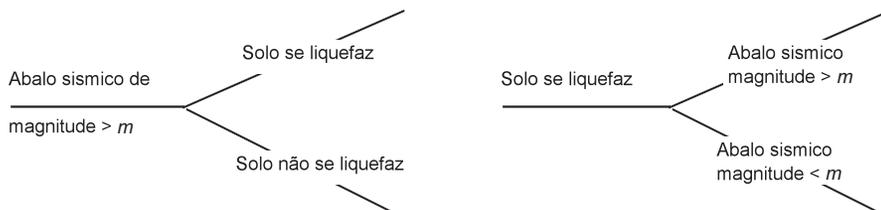


Fig. 1 – Alteração de ordem de eventos em uma Árvore de Eventos (Hartford e Baecher, 2004).

A Figura 2 apresenta uma Árvore de Eventos de modos de liquefação da fundação em uma barragem. As probabilidades para cada par de eventos têm a soma igual a 1,0. Esses pares de eventos devem incluir todos os possíveis modos de eventos que poderiam ser obtidos. A probabilidade para um determinado conjunto de eventos, ou ramo da árvore, é obtida pela multiplicação da sequência de probabilidades condicionais (Ladeira, 2007). Assim, a maior probabilidade é dada pela equação 2:

$$P(\text{sem ruptura} \cap \text{sem liquefação} \cap \text{abalo sísmico}) = P(\text{sem ruptura} | \text{sem liquefação} \cap \text{abalo sísmico}) P(\text{sem liquefação} | \text{abalo sísmico}) P(\text{abalo sísmico}) \quad (2)$$

No exemplo, $P(\text{sem ruptura} \cap \text{sem liquefação} \cap \text{abalo sísmico}) = 0,95 \times 0,9 \times 0,01 = 0,00855$.

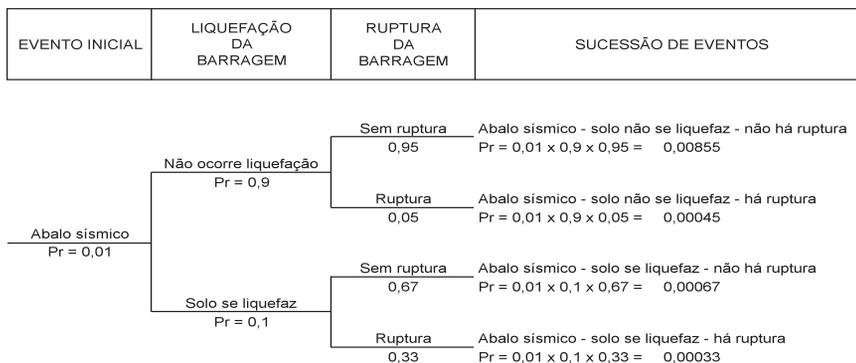


Fig. 2 – Árvore de Eventos e dependências entre probabilidades (modificado de Hartford e Baecher, 2004).

A soma da união de probabilidades de todos os ramos de eventos associados a um evento iniciador deve ser igual à probabilidade total do evento iniciador. Assim, no exemplo dado, a soma das probabilidades das consequências na árvore é dada por: $0,01 = 0,00855 + 0,00045 + 0,00067 + 0,00033$, sendo essa a probabilidade marginal do evento abalo sísmico.

As Figuras 2 e 3 mostram, pelo teorema da probabilidade total (Benjamin e Cornell, 1970, *apud* Hartford e Baecher, 2004), que a sequência das probabilidades condicionais pode ser invertida, podendo-se escrever a probabilidade da interseção dos eventos da seguinte forma (equação 3):

$$P(\text{sem liquefação} \cap \text{sem ruptura} \cap \text{abalo sísmico}) = P(\text{sem liquefação} | \text{sem ruptura} \cap \text{abalo sísmico}) P(\text{sem ruptura} | \text{abalo sísmico}) P(\text{abalo sísmico}) \quad (3)$$

No exemplo, $P(\text{sem liquefação} \cap \text{sem ruptura} \cap \text{abalo sísmico}) = 0,927 \times 0,922 \times 0,01 = 0,00855$.

A probabilidade condicional 0,927 de não ocorrer liquefação do solo, dado que não houve ruptura da barragem, como resultado do abalo sísmico, é determinada pelo teorema de Bayes. Conclui-se que a sequência de eventos na árvore pode ser rearranjada, como mostrado na Figura 3, e, de forma semelhante, definida pelas probabilidades condicionais, designadas nos ramos que foram rearranjados (Ladeira, 2007).

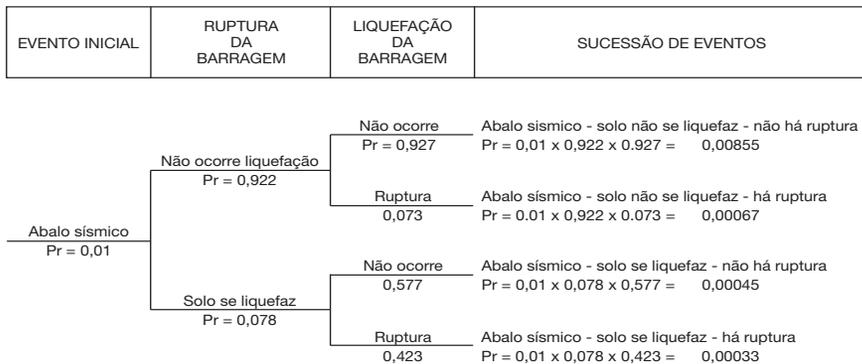


Fig. 3 – Árvore de Eventos e Probabilidades (modificado de Hartford e Baecher, 2004).

O cálculo de probabilidades nas Árvore de Eventos envolve a sua simplificação, eliminando ramos que levam a resultados de reduzida importância. Para tal, pode ser necessário desenvolver estudos de sensibilidade, para garantir que não haverá erro significativo introduzido na avaliação. Uma forma de simplificar o uso das Árvore de Eventos é parti-las, em duas ou mais partes, em ramos que são independentes, mas deixando-se claro que a relevância de seus acontecimentos merece um estudo à parte. Após a simplificação, devem-se verificar os resultados obtidos pelo princípio de que a Árvore de Eventos é a representação gráfica do espaço amostral de probabilidades. Portanto, a soma de todas as probabilidades e de todos os resultados de um experimento deve ser igual a 1,0. Caso essa propriedade não seja atendida, deve-se corrigir a deficiência (Ladeira, 2007).

Os eventos associados a um nó individual representam eventos mutuamente exclusivos e coletivamente exaustivos. Isso significa que, para cada ramo na árvore de evento único ou evento iniciador, a probabilidade total da união de eventos iniciados naquele ramo e finalizados no nó terminal, dada pela soma de suas respectivas probabilidades, deve ser igual à probabilidade marginal, associada ao ramo iniciador, conforme ilustra a Figura 4.

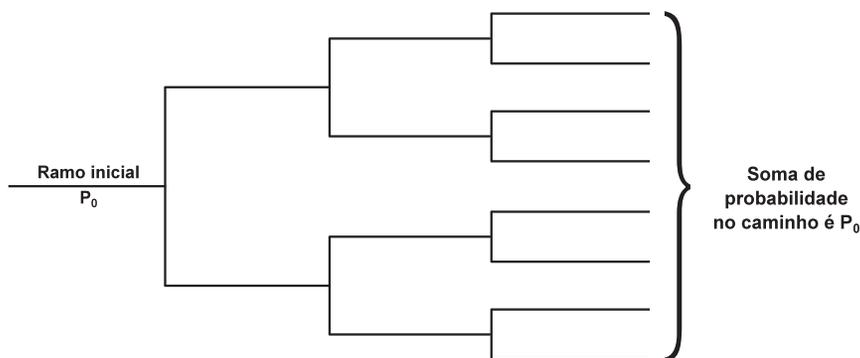


Fig. 4 – Verificação no cálculo de probabilidade em ramos da Árvore de Eventos (modificado de Hartford e Baecher, 2004).

Portanto, a avaliação do risco de um sistema complexo, como é o caso das barragens de terra, por meio de uma Árvore de Eventos, pode ser representada pela união de resultados decorrentes da união das ocorrências identificadas em associação lógica. É conveniente, também, que se elabore o Diagrama de Influência, associado à Árvore de Eventos e, para o cálculo do risco, que seja definida a Árvore de Consequências.

3 – AVALIAÇÃO DO RISCO POR *PIPING* EM BARRAGENS DE TERRA ATRAVÉS DAS ÁRVORE DE EVENTOS

3.1 – Análises sobre as estatísticas de rupturas e acidentes pelo fenômeno de *piping*

A natureza aleatória de todos os fatores envolvidos na ruptura de barragens pode induzir a erros na modelagem da ruptura por *piping*, se tratado somente por método determinístico. Este método traz consigo uma parcela de erro. Muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar os riscos de ruptura por *piping* unicamente do ponto de vista geotécnico de forma determinística. Entretanto, são raros os estudos de avaliação dos riscos que levam em consideração o aspecto probabilístico (Ladeira, 2007).

Alves e Maria (2001) alertam sobre o enfoque das análises e das decisões da engenharia geotécnica se fundamentar em tratamentos estatísticos e probabilísticos, pois o próprio ato da determinação de parâmetros introduz incertezas, devido ao processo de amostragem, além da variabilidade intrínseca da natureza dos solos. Via de regra, as teorias e os modelos aplicados em geotecnia são determinísticos, portanto, ao considerar a parcela de erro, que não se enquadra diretamente no modelo determinístico, deveria ser pesquisada também uma definição para a distribuição probabilística que melhor representa o fenômeno.

Segundo Cruz (1996), as observações de rupturas ocorridas no passado demonstram que o fenômeno de *piping* é regido pela estatística dos extremos, ou seja, os valores extremos para a resistência à tração ou coesão é que condicionam a formação deste fenômeno. Nos laboratórios, as condições para determinação do fator de segurança estão sob controle, estando os ensaios submetidos a cenários de estatística das médias, o que não ocorre no ambiente real das barragens. Alves e Maria (2001) afirmam que a análise de risco deve ser consciente, de forma a permitir ao engenheiro um tratamento racional da variabilidade dos parâmetros, completando o cálculo determinístico, constituindo-se, dessa forma, em um valioso auxílio ao processo de decisão.

Os dados, levantados por Jansen *et al.* (1986) em rupturas e em acidentes em barragens, mostram que o motivo mais frequente de acidentes é a erosão interna (*piping*). Foster *et al.* (2000),

demonstram que a frequência de rupturas de barragens por *piping* aumentou de 43% para 54% após 1950, em relação às outras causas de rompimento. Dados apresentados por Foster *et al.* (1998) demonstram as variáveis envolvidas em incidentes com barramentos de grandes barragens que ocorreram especificamente por erosão interna (*piping*). A ênfase dada ao estudo foi direcionada para os seguintes fatores:

- Compilação de dados de incidentes em barragens, incluindo a presença ou a ausência de filtros, a geologia da fundação, as características do material aplicado no barramento, tais como, os tipos de solo do núcleo e o método de compactação; e
- Análise de dados de incidentes em comparação com os dados de barragens existentes catalogadas. O trabalho consistiu em estimar probabilidades de rupturas por diferentes modos de falha e na identificação de fatores, como a geologia da fundação, as características do núcleo do barramento, que têm maior influência na ruptura da barragem por *piping* e os modos de falha que instabilizam os taludes do barramento.

Foster *et al.* (1998) usaram três critérios para seleção de incidentes:

- Ruptura no barramento da barragem por todos os modos de acidente em grandes barragens.
- Causas de rupturas no barramento (não necessariamente grande barragem) por *piping* e modos de falha que instabilizam o maciço.
- Causas de incidentes envolvendo somente *piping*, instabilidade do maciço e modos de descarga que provocam acidentes.

Os incidentes que envolvem *piping* correspondem a aproximadamente 90% dos modos de rupturas estruturais em grandes barragens, sendo que *piping* através do barramento equivale a dois terços dos casos de *piping*. Outro tipo de incidente, como o escorregamento de taludes de barragens representa estatisticamente 4% das rupturas em barragens, havendo somente um registro desse tipo de ruptura numa grande barragem. A probabilidade de rupturas em barragens mais antigas é bem maior do que em barragens mais recentes. A probabilidade de ruptura em barragens construídas antes de 1950 é 7,5 vezes maior do que em barragens construídas após esse ano (Foster *et al.*, 1998).

Segundo Ladeira (2007), os resultados demonstram que o controle inadequado do fluxo de descarga e das poropressões na barragem e na fundação são os principais fatores que desencadeiam o *piping* e a instabilidade de taludes. Alguns tipos de seções de barragens com essas características podem ser citadas:

- Barragem de terra, homogênea.
- Barragem de terra com filtro, particularmente filtro na fundação.
- Barragem de terra com enrocamento de pé de talude.
- Barragem de terra com face de concreto.
- Barragem de terra com núcleo em parede de concreto.
- Barragem de terra com argila compactada em camadas.

As barragens com enrocamento a jusante apresentam baixa probabilidade de rupturas por todos os modos de *piping*. Nesse tipo de barragem há elevada proporção de casos de acidentes, mas com menor probabilidade de progredir para brecha, se comparado com as seções com solo a jusante. Isto se deve à estabilidade e à grande capacidade de fluxo de descarga na seção com enrocamento a jusante.

O levantamento estatístico realizado por Foster *et al.* (1998) conclui que barragens com fundação de origem geológica glacial são, particularmente, suscetíveis a incidentes por *piping*.

Por fim, pode-se dizer que a maior probabilidade de ocorrência de *piping* tem sido constatada nos primeiros cinco anos de operação das barragens de terra.

3.2 – Aplicação da metodologia *ETA* a um caso de estudo: barragem de São Simão

A metodologia *Árvore de Eventos* foi aplicada à barragem de São Simão, propriedade da CEMIG Geração e Transmissão S/A, a companhia energética do estado brasileiro de Minas Gerais, para avaliar a probabilidade de ruptura por *piping*. Foram verificadas as opções de projeto na implantação da barragem, fatores geológicos condicionantes do local de implantação da barragem, métodos usados na construção do corpo da barragem e respectivo controle de qualidade, relatos do primeiro enchimento, informações sobre os primeiros cinco anos de operação e sobre o tratamento dos problemas durante a operação do sistema, com dados da instrumentação e obras de reabilitação realizadas (Ladeira, 2007).

Para fundamentar as informações obtidas no acervo técnico da CEMIG (1976, 1978, 1982, 1986 e 2003), foi conduzida uma visita técnica à barragem em estudo, em Janeiro de 2007, e realizadas reuniões de ajuste de conceitos e informações junto ao corpo técnico da empresa, a saber, a GA/SM – Gerência de Segurança de Barragens e Manutenção Civil – CEMIG (Ladeira, 2007). Essas informações possibilitaram o entendimento dos vários estágios do sistema em análise, que são: a fase de construção, o primeiro enchimento, os cinco primeiros anos de operação e o monitoramento de dados.

Os eventos foram combinados numa sequência lógica e formaram diagramas de influência para apoiar a elaboração dos ramos lógicos das árvores de eventos. O diagrama de influência serviu para definir as sequências de eventos associadas ao evento iniciador.

Durante a elaboração da *Árvore de Eventos* foram respeitados alguns pressupostos. Hartford e Baecher (2004) recomendam considerar somente eventos relacionados fisicamente ao desenvolvimento do fenômeno em análise. Os pressupostos de probabilidades também foram considerados. Em cada nó ramificado as probabilidades são consideradas para as ocorrências em questão, as quais são mutuamente exclusivas e coletivamente exaustivas. Na elaboração dos ramos, a relação entre cada par de probabilidades, na sequência lógica, respeitou a dependência entre essas, em atendimento ao teorema de Bayes, observando que, embora as probabilidades devam ser dependentes, os eventos físicos não o são necessariamente.

Segundo Ladeira (2007), durante a elaboração da *Árvore de Eventos*, houve o cuidado para que ela não ficasse demasiadamente grande e complexa, sendo a mesma submetida a revisões para simplificar a descrição da realidade, sem negligenciar aspectos essenciais (Duesenberry, 1958 *apud* Hartford e Baecher, 2004).

Segundo Ladeira (2007), a pesquisa foi baseada nas recomendações descritas por Cummins (2003), que relata a importância de informações para a avaliação de sistemas. Deve-se, portanto, procurar obter registros que fundamentam o processo de avaliação de segurança da barragem em estudo. Trabalhou-se com o acervo informações disponibilizado pela CEMIG (1976, 1978, 1982, 1986 e 2003), ou seja:

- Relatórios de planos de opções.
- Relatórios geológicos.
- Relatórios de investigações no local.
- Relatórios de investigações de materiais.
- Relatórios de construção.
- Fotografias da construção.
- Relatórios de registros geológicos.
- Mapeamento geológico.
- Projetos/desenhos como construído (*as-built*).
- Detalhes completos de quaisquer modificações realizadas na barragem.
- Relatórios de inspeções de segurança (rotineiros, anuais e abrangentes).
- Registros de monitoramento da instrumentação e respectivos gráficos.

- Diários de operação da barragem.
- Relatórios de revisões de aspectos de segurança da barragem.
- Relatórios de inspeções.

O procedimento para a aplicação do método de Análise por Árvore de Eventos – ETA seguiu as seguintes etapas (Aamdal, 1998; Vick e Stewart, 1996, *apud* Foster *et al.*, 1998):

1. Análise de dados de construção e operação, para avaliar os perigos para a obra na eventual formação de *piping*.
2. Seleção dos modos de ruptura.
3. Construção da Árvore de Eventos, a partir do pressuposto de que cada ramo da árvore dá origem a dois ramos, que representam, um a situação de sucesso e o outro a situação de falha.
4. Estimativa da probabilidade de ocorrência de cada sequência de eventos, ou seja, de todas as situações de falha, através da estimativa de probabilidades de sucesso e falha de cada evento, com base em informações coletadas e em dados históricos de rupturas em barragens semelhantes (determinações qualitativas). A consistência dos valores determinados seguiu a convenção de descritores qualitativos mostrados no quadro 1, adotada por Vick, 1992, *apud* Foster e Fell, 1999.
5. Avaliação dos resultados para determinação da probabilidade total, calculada pela combinação de probabilidades de eventos que mais contribuíram para a formação do *piping*, de acordo com as argumentações de Ang e Tang (1990).
6. Reanálise dos resultados para identificar alguns modos de falha que não contribuíam tanto para a probabilidade total de formação de *piping*, ou podiam estar superestimados. Houve reanálise de informações e busca de mais dados junto ao acervo técnico da CEMIG, que serviu para refinar o ciclo (Ladeira, 2007).

Quadro 1 – Descrições de incertezas (modificado de Vick, 1992, *apud* Foster e Fell, 1999).

Descrição qualitativa	Probabilidades
Impossível ⁽¹⁾	0,01
Improvável ⁽²⁾	0,1
Incerto ⁽³⁾	0,5
Provável ⁽⁴⁾	0,9
Quase certo ⁽⁵⁾	0,99

⁽¹⁾ Tem uma probabilidade nula de acontecer

⁽²⁾ Muito difícil de ocorrer

⁽³⁾ Duvidoso ou indeterminado

⁽⁴⁾ Apresenta uma significativa probabilidade de ocorrer

⁽⁵⁾ Contém condições essenciais à sua realização, quase certo de ocorrer

4 – AVALIAÇÃO DO RISCO AO *PIPING* DA BARRAGEM DE SÃO SIMÃO POR ÁRVORE DE EVENTOS

É apresentada, a seguir, a aplicação da Análise de Risco por Árvore de Eventos (*ETA – Event Tree Analysis*) à Barragem São Simão, propriedade da CEMIG Geração e Transmissão S/A (Centrais Elétricas de Minas Gerais). Para a utilização desse método foi necessário conhecer os dados de projeto, de construção e de operação da barragem. Foram construídas as Árvores de Eventos para os modos de ruptura por *piping* no barramento, na fundação e do barramento para a

fundação. As análises e os estudos, a seguir apresentados, relativos a este item deste artigo, têm como referência Ladeira (2007).

4.1 – Dados da Barragem São Simão

A usina hidrelétrica São Simão (*UHE – São Simão*) possui potência instalada de 1 710 MW, é a 7ª do sistema nacional em potência outorgada e a principal do sistema gerador da *CEMIG*.

A barragem está localizada na região Centro-Sul do Brasil, nas coordenadas de latitude 19° 01' e de longitude 50° 30' W, no trecho inferior do rio Paranaíba, que forma a fronteira entre os estados de Minas Gerais e de Goiás, a 700 km a oeste de Belo Horizonte e a 6 km a leste da cidade relocada de São Simão. A área de drenagem a montante da barragem é aproximadamente de 171 000 km², representando 72% de toda a bacia hidrográfica do rio Paranaíba. Os principais tributários a montante são: a norte, São Marcos, Corumbá, Meia Ponte e Rio dos Bois e, a sul, Araguari e Tejuco.

A camada de solo da bacia é bastante espessa e porosa nos locais mais baixos. O clima da bacia do Paranaíba é tipicamente trópico continental, determinado pela localização geográfica e pela influência das barreiras de montanhas, que impedem o ingresso de massas de ar provenientes do litoral. Prevalecem duas estações, uma seca e fria e outra úmida e quente. A temperatura média é de 21° C, para grandes altitudes, e pouco mais alta, para pequenas altitudes.

A Figura 5 mostra o arranjo geral da *UHE – São Simão*, composta pela barragem de terra, à direita, transição 1, vertedouro, tomada de água, transição 2, barragem de enrocamento, no leito do rio, barragem de terra, à esquerda, condutos forçados, casa de força e área de montagem, edifício de controle e subestação de 500 KV.

A barragem de terra é do tipo mista, cascalho de terraço e enrocamento, com núcleo de areia argilosa nas margens, direita e esquerda, completada, na parte central, pela barragem de concreto. É composta de talude de montante 0,8H:1V, talude de jusante variável de 0,4H:1V a 0,5H:1V. A barragem direita possui 71 m de altura e 1 260 m de extensão. A barragem esquerda possui 64,00 m de altura e 952 m de extensão. A crista está na elevação 404,00 m e tem largura de 10,00 m, com sobre-

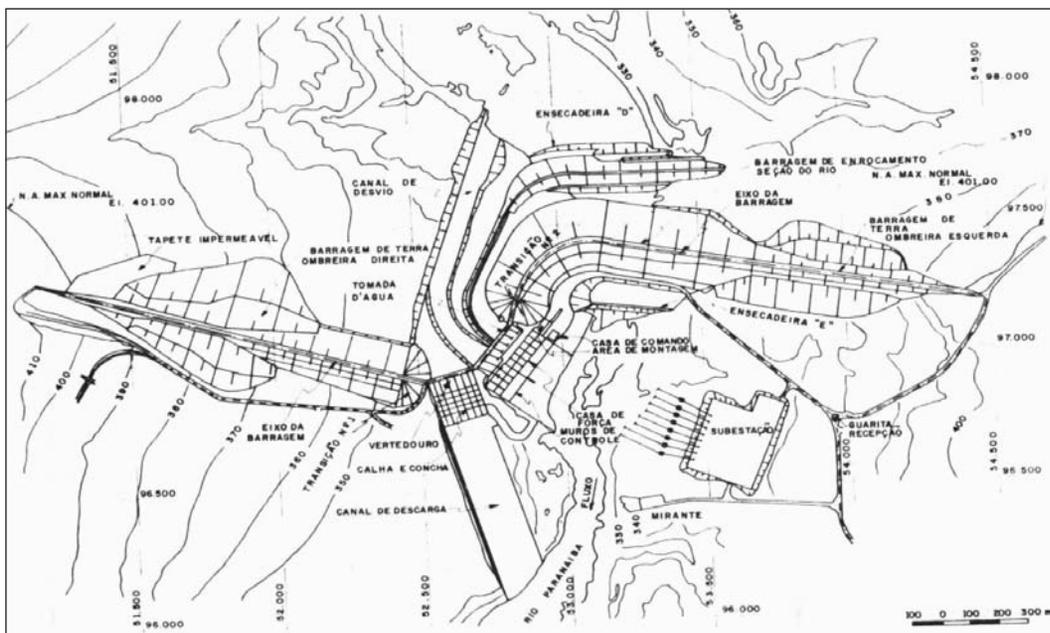


Fig. 5 – Arranjo geral da *UHE – São Simão* (modificado Ladeira, 2007).

elevação de 0,30 m, para compensar os recalques após a construção. As estruturas em concreto são do tipo gravidade, com vertedouro de 9 comportas, com tomada de água para 10 unidades, e duas transições, uma em cada extremidade da estrutura de concreto, que servem de conexão com as barragens direita e esquerda.

A obra foi projetada pela Companhia Internacional de Engenharia e realizada pelo consórcio construtor, italiano e brasileiro, entre as empresas Impregilo e C. R. Almeida e supervisionada pelo Departamento de Engenharia Civil e Geração da *CEMIG* – Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A. Os trabalhos foram iniciados em Junho de 1973 até à conclusão em Agosto de 1977.

O estudo do risco das barragens de terra construídas nesse local permitiu avaliar qualitativamente as ameaças para a obra, que possibilita direcionar ações preventivas que a mantenham estável, evitando outros impactos ambientais adversos. A avaliação da ameaça foi feita com enfoque de análise do estado das condições das estruturas da barragem, considerando o tempo de operação, os princípios adotados em projeto, o monitoramento da água percolada, as observações e o estado de conservação das estruturas. Para a construção das Árvores de Eventos, considerando os três modos de rupturas, ou seja, *piping* através do barramento, *piping* pela fundação e *piping* do barramento para a fundação, foi realizado um levantamento de dados, a partir de uma lista de verificação. A seguir são descritas as características que foram observadas na construção das Árvores de Eventos.

4.2 – Avaliação da possibilidade de ocorrência de *piping* no barramento

No projeto da barragem destaca-se a adoção do critério de Terzaghi para o dimensionamento de filtros e o controle de qualidade realizado durante a construção da obra. Entretanto, considerou-se a possibilidade do sistema de filtros e de drenagem interna vir a colmatar-se, mesmo sendo constatado um bom controle de qualidade durante a sua construção.

Outro fator importante foi observado em visita técnica à barragem, ou seja, boa transparência da água de descarga e respectivos volumes, medidos nos medidores de vazão de descarga de água, que se apresentavam estáveis e sem ocorrência de material granular nos pontos de observação, além de não ter sido observado aumento abrupto ou gradual de poropressões durante seu período de operação. Não obstante essas informações, na construção da Árvore de Eventos foi considerada a possibilidade de haver aumento do volume de descarga de água percolada e carreamento de material granular pelo maciço.

Os relatórios da *CEMIG* (1976, 1978, 1982, 1986 e 2003) permitiram identificar estudos das áreas de transição de materiais com granulometrias diferentes. Esses estudos, realizados durante a construção, foram ensaios de caracterização de materiais, ensaios de compactação (Hilf), ensaios de permeabilidade hidráulica após o material ter sido compactado e ensaios de determinação de resistência ao cisalhamento. Um evento aleatório, considerado na elaboração da Árvore de Eventos, foi a possível ruptura de alguma camada do maciço, que pudesse vir a prejudicar o fluxo de água e, conseqüentemente, a alteração do estado de tensões da matriz do solo, anulando a tensão efetiva.

Foi relatado que houve início de *piping* durante o primeiro enchimento na área de contato do núcleo com a estrutura de concreto. Ressalta-se que, foi também relatado, que houve autocicatrização (embuchamento) do entubamento, graças às características do cascalho de terraço usado no núcleo da barragem (Viotti *et al.*, 2006).

Outro fator, considerado na construção da Árvore de Eventos, foi a possibilidade de ruptura do barramento em consideração, devido ao progresso do *piping* para proporções de um grande entubamento.

4.3 – Avaliação da possibilidade de ocorrência de *piping* pela fundação

O estudo dos fatores condicionantes geológico-geotécnicos da área permitiu identificar que, nas barragens de terra, direita e esquerda, a fundação da barragem foi construída sobre rocha de

basalto alterado, solo transportado e solo de características residuais, sendo este último fator favorável à eventual erosão regressiva nas áreas próximas às margens. Esses fatores foram levados em consideração para desenvolver o diagrama de influência.

Outro fato, observado durante o estudo, foi o tratamento da rocha alterada com *slush-grout*, após limpeza com jatos de água e de ar. A elaboração da Árvore de Eventos levou em consideração a possibilidade de haver fluxo de água percolada pela fundação, mesmo após o tratamento descrito. Isto poderia ser decorrente de alguma rocha fraturada sujeita à erosão ou a alguma junta aberta entre rochas.

A análise de relatórios *CEMIG* (1976, 1978, 1982, 1986 e 2003) permitiu verificar que, em boa parte das seções da barragem, houve construção de tapete drenante na base da barragem, a jusante do núcleo. O dimensionamento de filtros, de acordo com os critérios de Terzaghi, assegura a graduação do material para que o filtro seja suficientemente aberto para permitir a percolação de água, mas suficientemente fechado para não permitir carreamento de material granular do maciço pelos espaços vazios do filtro. Entretanto, mesmo assim, na elaboração da Árvore de Eventos, o fato de haver carreamento de material granular e eventual colmatação de filtros foi considerado um evento aleatório, possível de ocorrer.

Na elaboração da Árvore de Eventos foi considerado o sistemático monitoramento de dados da instrumentação das barragens de terra, que controla as condições de descarga de água percolada desses filtros nas canaletas de drenagem. Não foram observadas condições preocupantes nestes anos de operação, apenas obras de reparo e melhorias para separar a descarga de filtros da água escoada pelo talude da barragem.

Apesar das boas condições descritas, outro evento aleatório, levado em consideração, foi o aumento do gradiente hidráulico e a incapacidade de descarga dos sistemas internos de drenagem, que levariam à tensão efetiva nula e ao início de erosão regressiva.

O estudo identificou que, na região do *random*, a jusante da barragem esquerda, houve formação de surgências, que estavam relacionadas com o período de maior intensidade de precipitação, não se observando as suas ocorrências no período de estação seca. Esse fato foi considerado como uma possível falha nos sistemas de ligação de filtros e dos dispositivos de saída da água drenada, podendo haver falhas, que levassem ao fluxo de água pela fundação à formação de surgências e ao aumento de subpressão a jusante das barragens de terra. Essa situação também influenciou a elaboração da Árvore de Eventos.

O monitoramento realizado pela *CEMIG*, através do *software Inspektor*, módulo *Monitor*, permitiu concluir que não houve aumento súbito em vazões de descarga ou aumento súbito de porpressões, identificados nos medidores de vazão e nos piezômetros instalados na fundação, respectivamente. Na elaboração da Árvore de Eventos considerou-se a possibilidade de aumento de porpressões.

Na elaboração da Árvore de Eventos foi considerada a possível ocorrência de áreas de drenagem abaixo da fundação da barragem, que pudessem direcionar as linhas de fluxo de água, sem controle na vazão de descarga, conduzindo-a a camadas de material com alta permeabilidade, podendo ocorrer surgências a jusante, com aumento de subpressão.

Como a fundação de parte da barragem foi construída sobre solo transportado, na área próxima das margens direita e esquerda, a medida preventiva tomada foi a construção de *cutoff* de grande extensão, para que as linhas de fluxo de água na fundação tivessem um grande caminho a percorrer e com isso houvesse perda de carga hidráulica. Essa solução foi praticada para se evitar o aumento de porpressões, eventual condição favorável à formação de *piping* pela fundação, fato que também foi considerado na elaboração da Árvore de Eventos.

Na construção da Árvore de Eventos, procurou-se, também, considerar a capacidade máxima de vazão dos sistemas de drenagem interna na fundação e as estruturas de ligação destes com o sistema de drenagem externa, numa eventual formação e progresso de *piping*. Outro evento relacio-

nado foi se estas estruturas suportariam um aumento de fluxo de água sem haver colapso ou deslizamento no talude de jusante, com consequente formação de brecha. Na sequência dos eventos considerados, cogitou-se a possibilidade do *piping* ocorrer, se desenvolver e permanecer aberto tempo suficiente para drenar grande volume de água, até ocorrer colapso da crista da barragem e total escoamento da água do reservatório.

4.4 – Avaliação da possibilidade de ocorrência de *piping* do barramento para a fundação

Foi identificado que as barragens de terra tiveram parte de sua estrutura construída sobre *cutoff* de base larga e grande extensão, para aumentar o caminho da água percolada pela base da barragem, na região próxima das margens. A área crítica para a fundação seria o antigo leito do rio, mas observou-se que houve adequado tratamento da rocha alterada.

Os estudos dos fatores condicionantes geológico-geotécnicos identificaram que, na área, havia sete derrames e interderrames, de espessura aproximada de 200 m, entre as cotas 220,0 e 420,0 m. Além disso, Viotti *et al.* (2006) relatam que, desde o primeiro enchimento, ocorreram surgências a jusante da ombreira esquerda, pois parte da água percolada não era captada pelo sistema de drenagem da barragem. Essas surgências estão relacionadas, principalmente, com as características da rocha de fundação – basalto com intemperismo esferoidal.

Na construção da Árvore de Eventos, esses fatos foram considerados, pois poderia haver juntas abertas, mesmo após o tratamento realizado. Outra possível situação seria o solo residual de base da fundação da barragem esquerda, próximo da margem, permitir o carreamento de material do núcleo junto ao fluxo de água, levando ao início de erosão regressiva.

Outro fator preponderante, já comentado, foi o dimensionamento e a construção de filtro do tapete drenante. Análises de dados de volume de água percolada mostraram que os resultados atenderiam aos parâmetros de controle, permitindo concluir que esses filtros têm funcionado de forma apropriada. Mesmo assim, foi considerada a possibilidade desse sistema não suportar alta descarga a jusante das barragens de terra, vindo a dar condições de formação de *piping*.

Nas situações de possibilidade de ocorrência de *piping* pelo barramento e do barramento para a fundação, foi levado em consideração o progresso do fenômeno, em função de possíveis falhas no *cutoff*, de eventual falha no sistema de filtros ou de surgimento de trincas na fundação, mesmo após tratamento aplicado na rocha alterada. Como o *cutoff* construído na área de solo residual é extenso, com longo caminho para o fluxo de água, isso favorece a perda de carga e a eventual cicatrização da erosão regressiva, que se viesse a iniciar.

4.5 – Cálculo da probabilidade de ruptura por *piping* na barragem da UHE São Simão

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam as Ávores de Eventos para avaliação da probabilidade por *piping* através do barramento, da fundação e do barramento para a fundação na UHE – São Simão. O quadro 2 apresenta as probabilidades, estimadas pelas Ávores de Eventos.

Quadro 2 – Probabilidade anual de ruptura por *piping* nas barragens UHE – São Simão (modificado de Ladeira, 2007).

Modo de ruptura	Probabilidades estimadas (ETA)
<i>Piping</i> através do barramento	$P_e = 5,3 \times 10^{-5}$
<i>Piping</i> através da fundação	$P_f = 4,7 \times 10^{-5}$
<i>Piping</i> do barramento para a fundação	$P_{ef} = 1,3 \times 10^{-5}$

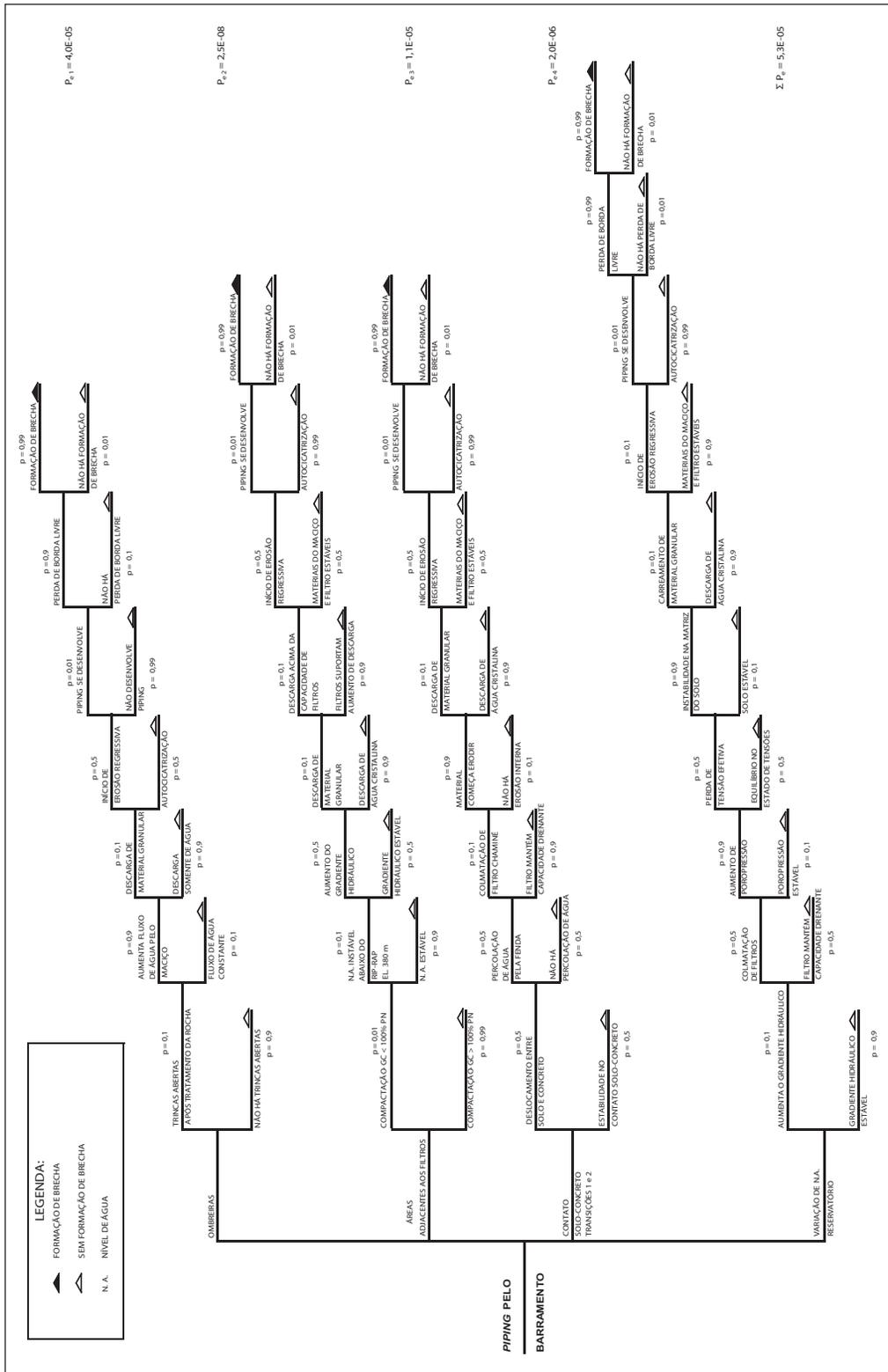


Fig. 6 – ETA: piping através do barramento (Ladeira, 2007).

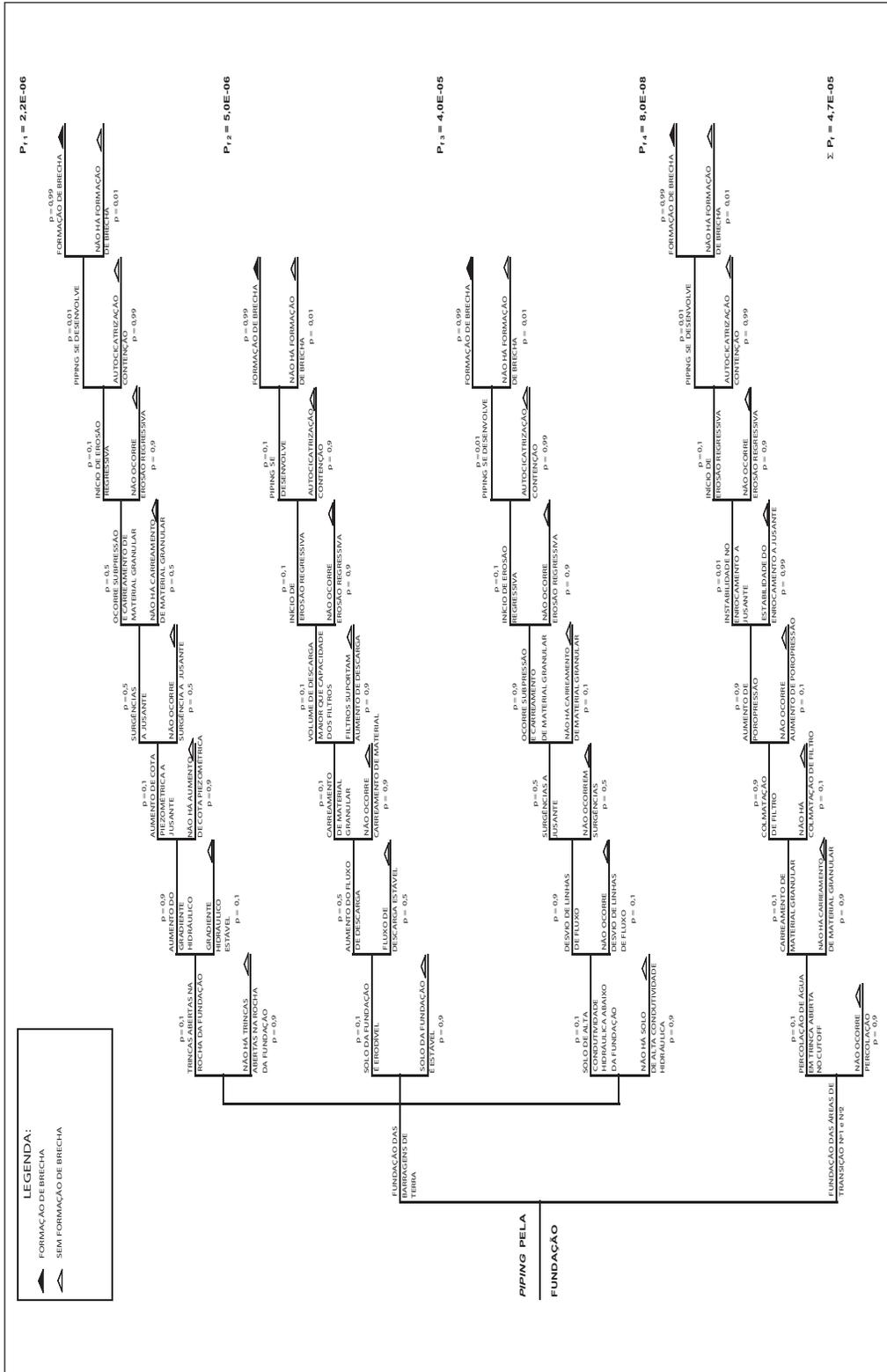


Fig. 7 – ETA: piping através da fundação (Ladeira, 2007).

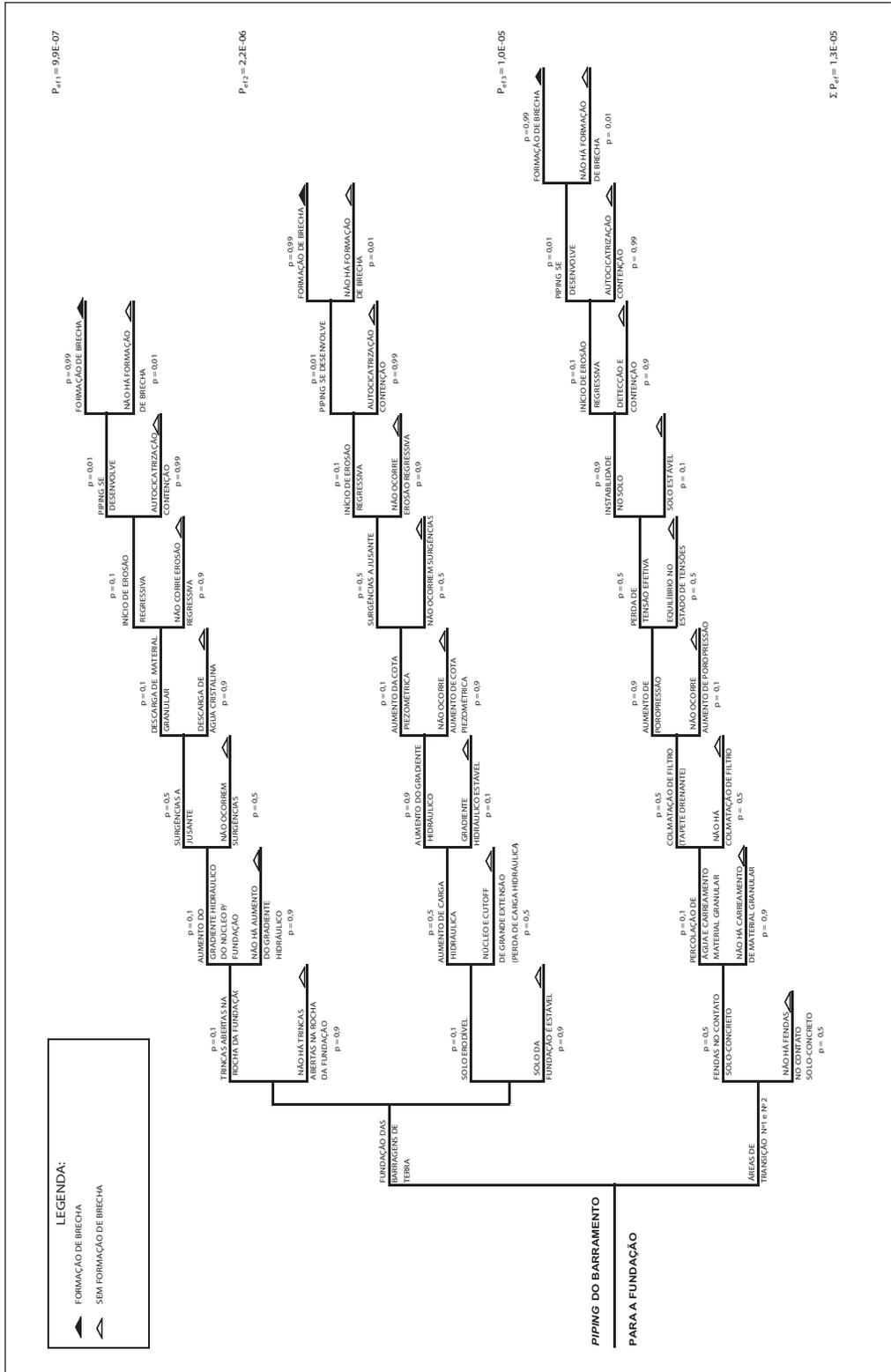


Fig. 8 – ETA: piping através do barramento para a fundação (Ladeira, 2007).

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de análise por Árvore de Eventos (*ETA - Event Tree Analysis*) foi apresentado numa abordagem que procurou demonstrar a sua fundamentação teórica em relação aos aspectos qualitativo e probabilístico. A partir dessa fundamentação teórica, foi feita uma aplicação dessa metodologia às barragens de terra da Usina Hidrelétrica São Simão (*UHE – São Simão*), para avaliação da probabilidade de ruptura por *piping* pelo barramento, pela fundação e do barramento pela fundação.

Os resultados obtidos para a probabilidade de ruptura devem ser entendidos, não como a possibilidade de rompimento do barramento. O método usado foi de determinação semi-quantitativa, subjetivo nas determinações de valores de probabilidades, mas que se apresenta viável na comparação de dados do mesmo sistema.

As análises por Árvores de Eventos tiveram probabilidades marginais da mesma ordem de grandeza para os três modos de *piping*, ou seja, 10^{-5} . A observação de cada uma das Árvores de Eventos permitiu concluir que a estrutura da barragem mais vulnerável foi o barramento, com valor de probabilidade de $5,3 \times 10^{-5}$.

Na Árvore de Eventos que considerou a probabilidade de ruptura por *piping* através do barramento (Figura 6), observa-se que os pontos mais vulneráveis são as áreas das ombreiras e as áreas de contato solo-concreto, nas barragens de transição, pois foram os ramos de probabilidades que mais contribuíram para a probabilidade marginal desse modo de ruptura.

A Árvore de Eventos, construída para a eventual ocorrência de *piping* pela fundação (Figura 7) apresentou como probabilidade o valor de $4,7 \times 10^{-5}$, mostrando que os ramos que mais contribuíram para a probabilidade marginal foram aqueles relacionados com a fundação das barragens de terra, pois se encontram apoiadas em rocha fraturada, solo residual e solo transportado.

Já na Árvore de Eventos construída para a eventual ocorrência de *piping* do barramento para a fundação (Figura 8), foi encontrado o valor para probabilidade marginal de $1,3 \times 10^{-5}$, com a probabilidade dominante no ramo correspondente às áreas de contato solo-concreto das barragens de transição.

Finalmente, o que se pode concluir através do que foi apresentado neste artigo, é que, além da determinação dos valores das probabilidades de ruptura, o exercício da construção das Árvores de Eventos possibilita que seja exercida uma análise crítica do comportamento da barragem, considerando todo o seu desempenho histórico até ao momento em que a análise é realizada, confirmando, desta forma, que esse método se fundamenta num arcabouço estatístico consistente, e se apresenta realmente como uma ferramenta muito útil para gestão de risco em barragens.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa CEMIG Geração e Transmissão S/A, por permitir a realização deste estudo e a disponibilidade de informações utilizadas e publicadas neste artigo.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aamdal, T. (1998). *Risk analysis for a slab buttress dam in Norway*. In: 66th ICOLD ANNUAL MEETING, New Delhi, India, pp. 314-323..
- Alves, A. M. L.; Maria, P. L. S. (2001). *Análise probabilística de problemas geotécnicos: Aplicação à argila do Rio Sarapuí. Solos e Rochas*, São Paulo, v. 24, pp. 83-93.
- Caldeira, L. (2005). *Análise de Risco em Geotecnia. Aplicação a Barragens de Aterro*, Programa de Investigação para obtenção de Habilitação para funções de Coordenação Científica, LNEC, Lisboa, 238 p.
- Ang, A. H-S.; Tang, W. H. (1990). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Decision, risk, and reliability*, v. II, New York: Copyright dos autores, 562 p.
- CEMIG (1976). *Relatório Final do projeto São Simão SS-RC-97 – Estruturas de terra e enrocamento*, v. I, Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. DOC N°. 05D010364 (Div. Geotécnica).
- CEMIG (1978). *Controle de qualidade de obras de terra e enrocamento e injeção de cimento – Dossier Técnico Final*, v. I, Geotécnica S.A Engenheiros Consultores – PV – 15/73.
- CEMIG (1982). *Instrumentação de Solos – Relatório Final – Estruturas de Terra e Enrocamento. Usina Hidrelétrica de São Simão*. v. I, Divisão de Controle de Estruturas Cíveis 11.128-PG/EE4-001 CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.
- CEMIG (1986). *Relatório de inspeção da barragem de terra e enrocamento de São Simão 11.128-PG/EE-121, Usina Hidrelétrica de São Simão*. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. DOC No 728-01-P1-E – Div. Geotécnica.
- CEMIG (2003). *Relatório Final da Drenagem das Áreas a jusante da Margem Esquerda e Projeto Como Construído - Usina Hidrelétrica de São Simão*. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, Rel. 11.128-140103, GA/SM – Gerência de Segurança de Barragens e Manutenção Civil.
- Cruz, P. T. (1996). *100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.
- Cummis, P. (2003). *Guidelines on risk assessment*. ISBN: 0 731 027 620, Sydney, Austrália: Ed. Australian National Committee on Large Dams Inc. ANCOLD, 156 p.
- Foster, M.; Fell, R.; Spannagle, M. (1998). *Analysis of embankment dam incidents*. UNICIV Report N° R-374 - UNSW, Sydney, Austrália.
- Foster, M.; Fell, R. (1999). *A framework for estimating the probability of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods*. UNICIV Report No R-377, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales. ISBN 85841 344 2, Sydney, Austrália.
- Foster, M.; Fell, R.; Spannagle, M. (2000). *The statistics of embankment dam failures and accidents*. Can. Geotech. J. 37, pp. 1000–1024.
- Hartford, D. N. D.; Baecher G. B. (2004). *Risk and uncertainty in dam safety – CEA Technologies Dam Safety Interest Group*. ISBN 0 7277 3270 6, Londres, Inglaterra: Thomas Telford Publishing, 391 p.

- Jansen, R.B.; Aldrich, H. P.; David, S. D. (1986). *Safety of existing dams – Evaluation and Improvement*. 3 ed. Washington DC: Ed. National Academy of Sciences, 1986. 354 p.
- Ladeira, J. E. R. (2007). *Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos. O caso UHE - São Simão*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 210 p.
- Ladeira, J. E. R., Espósito, T.; Naghettini, M. (2007). *Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por método probabilístico*. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – SBRH, 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa – 8º SILUSBA. São Paulo, Brasil.
- Ladeira, J. E. R., Espósito, T.; Naghettini, M. (2008). *Avaliação de Segurança em Barragem de Terra*. XI CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA. Coimbra, Portugal, ISBN 978-989-95740-2-1, V. II, pp. 337-344.
- Latham, M. (1994). *Construction the Tea, Final report of the government/industry review of procurement and contractual arrangements in the construction industry*, HSMO, London.
- Menescal, R. A. Org. (2004). *A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil*. Brasília: Proágua, 314 p.
- Ministério de Integração Nacional (2002). *Manual de Segurança e Inspeção de Barragens*. Brasília, Brasil. 148 p.
- Ross, S. (1988). *A first course in probability*. ISBN: 0 02 946600 8. 3 ed. New York: Macmillan Publishing Company, 565 p.
- RSB (1990). Regulamento de Segurança de Barragens. Decreto-Lei No 11/90. Portugal.
- Viotti, C. B.; Carvalho, E.; Brito, S. N. A. (2006). *Relatório da Inspeção Formal - Usina Hidrelétrica de São Simão*. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais - GA/SM – Gerência de Segurança de Barragens e Manutenção Civil.