

Análises por Árvores de Eventos Aplicadas em Planos de Ação de Emergência de Barragens: Auxílio ao Processo de Tomada de Decisão

Luiz Filipe Venturi Vianna

UFMG, Belo Horizonte, Brasil. E-mail: luizfilipevianna@gmail.com

Terezinha Espósito

UFMG, Belo Horizonte, Brasil. E-mail: esposito@etg.ufmg.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a aplicação de técnicas de análise de risco, especificamente as Análises por Árvores de Eventos (Event Trees Analysis – ETA), visando contribuir para o processo de tomada de decisão dos Planos de Ação de Emergência – PAE's de barragens. O estudo de caso foi realizado na barragem da usina hidrelétrica de Irapé, considerando informações de projeto, dados de relatórios de instrumentação, relatórios de inspeção em campo e informações da literatura. Diferentemente dos estudos tradicionais de ETA, que procuram descrever o comportamento atual da barragem, foram adotados valores hipotéticos de probabilidade buscando presumir qual seria o comportamento da estrutura caso a mesma venha a sofrer uma ruptura. Estes valores foram devidamente justificados, de acordo com as particularidades da barragem. Como foram utilizados valores que simulam uma condição crítica, os resultados obtidos são, naturalmente, majorados em relação à condição atual de segurança da barragem. Apesar dos resultados não serem representativos da condição atual de segurança da barragem, estas informações têm potencial para serem utilizadas nos processos de tomada de decisão dos PAE's. As Árvores de Eventos previamente elaboradas podem favorecer a visualização e compreensão de um eventual modo de falha durante uma situação emergencial, aprimorando a percepção da evolução do fenômeno no decorrer do tempo por todos os envolvidos, o que torna os procedimentos de resposta mais rápidos e efetivos. Além de favorecer a classificação de risco e emissão de sinais de alerta para as comunidades a jusante, estas Árvores de Eventos podem ser utilizadas para a realização de análises comparativas considerando intervenções preventivas e corretivas no contexto do PAE para reduzir o risco de acidente. Sendo assim, estes estudos podem favorecer o processo de tomada de decisão durante situações emergenciais, visando reduzir o risco de um acidente.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Risco, Gestão de Risco, Plano de Ação de Emergência, Segurança de Barragens.

1 INTRODUÇÃO

Avanços técnicos e legais vêm acontecendo no âmbito da gestão da segurança de barragens. Entretanto, a ocorrência de acidentes recentes, inclusive no Brasil, demonstra que tanto os empreendedores quanto o poder público precisam atuar de maneira mais efetiva nesta questão. Partindo do princípio de que a

segurança absoluta não pode ser garantida e que o risco de ruptura de barragens não pode ser descartado, o Plano de Ação de Emergência - PAE visa estabelecer um conjunto de ações de resposta para atuação em situações críticas, a fim de evitar a ocorrência de acidentes ou minimizar suas consequências.

2 SEGURANÇA DE BARRAGENS

2.1 Gestão de Riscos

Segundo Pimenta (2009), a gestão de segurança de barragens apresenta, tradicionalmente, uma abordagem orientada para a segurança centrada nas obras, porém é necessário evoluir para abordagens orientadas para o risco, buscando tratar as ações, desempenho e consequências de forma integrada.

A Figura 1 apresenta as atividades fundamentais na gestão de riscos.

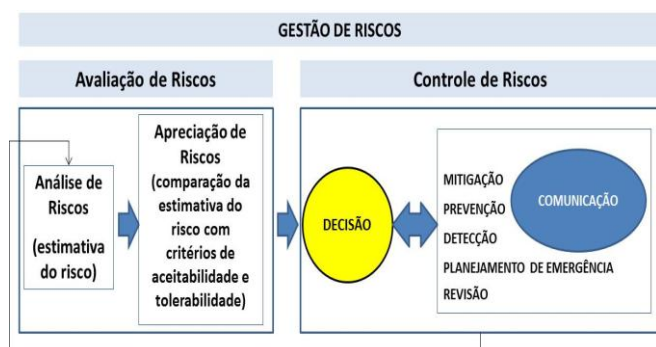


Figura 1. Atividades fundamentais na gestão de riscos.
Fonte: PIMENTA, 2008

2.2 Plano de Ação de Emergência - PAE

Os Planos de Ação de Emergência têm como objetivo preparar os empreendedores, órgãos fiscalizadores, organismos de defesa civil e a população do vale a jusante para o enfrentamento de situações críticas relacionadas à barragem.

De acordo com Vianna (2015), o fator tempo pode ser considerado o maior desafio do PAE, sendo que uma resposta rápida, eficiente e organizada é primordial para alcançar os objetivos propostos. Neste contexto, o PAE busca pré-estabelecer um fluxo de ações a serem desempenhadas pelos diversos atores envolvidos neste tipo de cenário, assim como a infraestrutura necessária, visando reduzir a probabilidade de ocorrência de acidentes e os seus respectivos impactos sociais, ambientais e econômicos. Caso o acidente ou evento crítico seja inevitável, deseja-se ao menos reduzir as suas consequências, evitando, principalmente, a perda de vidas humanas. O histórico de acidentes demonstra que quando existe um

alerta anterior a um rompimento de barragem, o número de vítimas reduz de maneira bastante significativa, como é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Relação entre o alerta antecipado e o número de vítimas

Barragem	Alerta	Vítimas fatais	Fonte
St. Francis EUA, 1928	Sem alerta	≈ 470	USBR, 1998
Malpasset França, 1959	Sem alerta	421	USBR, 1998
Vega de Tera Espanha, 1959	Sem alerta	144	Balbi, 2008
Vajont Itália, 1963	Sem alerta	≈ 2.600	Balbi, 2008
Baldwin Hills EUA, 1963	> 3 horas	5 mortos. ≈1600 pessoas evacuadas.	Balbi, 2008
Teton EUA, 1976	> 1 hora	11	Balbi, 2008
Mirai Brasil, 2007	> 1 hora	Sem vítimas fatais. 765 pessoas evacuadas.	Balbi, 2008

A gestão da segurança de barragens sempre evoluiu significativamente a partir da análise de erros cometidos no passado e, aparentemente, com os PAE's não será diferente.

Um evento ocorrido recentemente, o rompimento da barragem de Fundão, localizada no município de Mariana, que deixou 18 mortos, 1 desaparecido até o momento e mais de 600 pessoas desabrigadas e desalojadas, considerado por muitos como o maior desastre ambiental do Brasil, pode ser considerado como um marco em relação à evolução dos PAE's de barragens (MINAS GERAIS, 2016), apesar da Lei 12.334/2010 já contemplar este assunto.

A partir da ocorrência deste acidente, diversos projetos de lei (PL) têm sido propostos, tais como o PL 3650/2015, PL 3561/2015, PL 3563/2015, PL 3775/2015 e PL 4287/2016.

Não obstante, no momento, diversas perguntas ainda não têm uma resposta satisfatória, tais como: Estamos preparados para

os piores cenários? Os empreendedores, órgãos fiscalizadores e instituições de defesa civil têm a estrutura adequada? Como serão divididos os custos? Como serão tratadas as rupturas em cascata? Quem é o responsável em caso de acidente? É cabível um Plano de Auxílio Mútuo? Quem irá elaborar e atualizar o cadastro de pessoas das áreas de risco? Os sistemas de Alarme e Alerta serão padronizados? Serão contemplados seguros? Os PAE's terão interferência dos Órgãos Ambientais, Ministério Público, Órgãos Fiscalizadores e de Defesa Civil? Como a informação será transmitida para a população? Como serão realizados os treinamentos? Como serão tratadas as cheias naturais?

Ao mesmo tempo, deve-se atentar para que os esforços direcionados para os PAE's não impactem as ações de investigação, monitoramento, manutenção e operação segura das barragens.

A criação de uma Norma Técnica para os PAE's de barragens talvez seja uma alternativa para alcançar o equilíbrio neste processo, mantendo um grupo multidisciplinar devidamente capacitado para tratar o assunto. Para uma atuação eficiente, é importante que as atividades sejam embasadas no conhecimento técnico e no trabalho em equipe, tendo como premissa principal o compromisso com a segurança do vale a jusante.

Outro aspecto fundamental relacionado aos PAE's é o processo de tomada de decisão. As ações de resposta durante situações críticas em barragens envolvem, normalmente, processos de tomada de decisão muito complexos, onde diversas variáveis devem ser consideradas em um curto espaço de tempo, sendo que decisões equivocadas podem levar, inclusive, à perda de vidas humanas.

A aplicação de técnicas de análise de risco pode contribuir com estes processos de tomada de decisão, por meio da realização de avaliações prévias dos diversos mecanismos de falha.

Estas simulações podem ser utilizadas como um indicativo da gravidade de cada cenário, favorecendo a emissão de sinais antecipados de alerta, com a respectiva remoção de pessoas das áreas de risco.

Podem ainda apresentar uma diretriz, por

meio da realização de análises comparativas, para a escolha das melhores ações de resposta a serem adotadas para evitar o agravamento de uma situação crítica.

Os itens descritos a seguir apresentam um exemplo de aplicação de Análise por Árvore de Eventos para auxílio ao processo de tomada de decisão dos PAE's. Informações mais detalhadas do trabalho podem ser verificadas em Vianna (2015).

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi elaborado considerando um estudo de caso da barragem da Usina Hidrelétrica (UHE) Irapé, cujos dados são apresentados resumidamente a seguir. As principais fontes de informações foram Relatórios de Inspeção de Segurança da barragem, Relatórios de Instrumentação e dados de projeto disponíveis no acervo da Cemig – Companhia Energética de Minas Gerais, além de informações disponíveis na literatura.

Apesar deste trabalho estar associado aos PAE's de barragens, cabe ressaltar que esta metodologia aborda exclusivamente dados relativos às características da barragem, de forma que não contempla, de maneira direta, aspectos relacionados à condição de uso e ocupação do vale a jusante.

3.1 Análise por Árvore de Eventos – ETA

Foi aplicada a metodologia de análise por árvore de eventos (ETA) para elucidar como se espera que uma eventual evolução do fenômeno avaliado leve à ruptura da barragem. Diferentemente dos estudos tradicionais de ETA, que procuram descrever o comportamento atual da barragem, foram adotados valores hipotéticos de probabilidades direcionados para a ocorrência da falha. Deste modo, em cada nó da árvore foi levantada a seguinte questão: a partir deste ponto qual a condição mais provável para que ocorra a evolução do respectivo modo de falha? Os valores foram devidamente justificados com base nas especificidades da estrutura, favorecendo, deste modo, revisões e adequações futuras.

Como foram utilizados valores de probabilidade que simulam uma condição crítica os resultados obtidos foram, naturalmente, majorados em relação à condição atual da barragem. Deste modo, estes valores não podem ser comparados aos estudos convencionais de ETA que estimam a probabilidade anual de ruptura, como foi realizado por Ladeira (2007). Para a avaliação da probabilidade de ocorrência de cada evento foram utilizadas análises qualitativas tendo como base as informações previamente levantadas. Os valores de probabilidade foram baseados nos descritores adotados por Vick (1992) citado por Foster e Fell (1999), conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Descrições de incertezas

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) Não apresenta probabilidade de acontecer (2) Muito difícil de ocorrer. (3) Duvidoso ou indeterminado (4) Apresenta probabilidade de ocorrer (5) Contém condições essenciais à sua realização, quase certo de ocorrer.	

Fonte: Vick, 1992, citado por Foster e Fell, 1999

3.2 Elaboração de ETAs considerando Intervenções Preventivas no Contexto do PAE

Nesta etapa, após a elaboração da árvore de eventos descrita no item 3.1, foram elaboradas novas árvores de eventos considerando intervenções emergenciais realizadas na barragem. Deste modo, pode-se variar tanto as técnicas utilizadas para controlar as situações adversas, quanto o momento em que as intervenções são realizadas, favorecendo uma percepção mais apurada da melhor ação de resposta a ser implementada caso este cenário venha a ocorrer em uma situação real.

Sendo assim, estes estudos podem favorecer o processo de tomada de decisão durante situações emergenciais, visando reduzir o risco de um acidente.

Nesta fase também foram utilizados os descritores apresentados na Tabela 2. Os

critérios para a escolha da probabilidade de ocorrência de cada evento, porém, podem ser ainda mais subjetivos, sendo passíveis, portanto, de maiores variações conforme o conhecimento e a interpretação de cada autor. Por este motivo, é importante que todas as notas sejam devidamente justificadas, favorecendo adequações futuras.

3.3 Caso Estudo – Barragem da UHE Irapé

A UHE de Irapé ou Usina Presidente Juscelino Kubitschek, gerenciada pela Cemig, está localizada no rio Jequitinhonha, na divisa dos municípios de Berilo (na margem direita), e Grão Mogol (margem esquerda), região nordeste do estado de Minas Gerais (Figura 2).



Figura 2. Vista geral da UHE Irapé Fonte: Arquivo CEMIG GT

A área inundada, considerando o NA Máximo Normal, é de 137,16km², sendo que o volume operativo máximo do reservatório é de 5.963,92 hm³.

As obras civis se iniciaram em 2002, sendo que o enchimento do reservatório teve início em dezembro de 2005. A inauguração ocorreu em julho de 2006.

O arranjo geral compreende uma barragem de enrocamento com núcleo de argila fechando o vale, túneis de desvio na margem direita, tomada de água, vertedouro e extravasor na margem esquerda e casa de força a jusante da barragem.

De acordo com o trabalho de Lima (2009), que apresenta uma descrição geológica detalhada do local de implantação da UHE Irapé, pode-se dizer que o maciço rochoso da área de implantação da UHE Irapé é representado, predominantemente, por um pacote de mica-quartzo xisto grafitoso, de coloração cinza escura, com granulação fina a grosseira, marcado pela presença significativa

de sulfetos (pirrotita, piritita e eventualmente, calcopirita e esfalerita) disseminados na matriz rochosa e por baixas concentrações de carbonato.

A barragem de enrocamento com núcleo de argila possui comprimento de 551 m e altura máxima de 210m, com volume de aterro da ordem de 11.000.000m³, constituindo-se na barragem mais alta do Brasil e a segunda mais alta da América Latina. Os taludes de montante e de jusante têm inclinação média de 1V:1,5H.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A abordagem empregada neste trabalho favorece a realização de análises comparativas entre o comportamento previsto para o fenômeno e os resultados esperados após a aplicação de ações preventivas e corretivas no contexto do PAE. A partir do momento que se conhece o comportamento esperado para determinado modo de falha pode-se simular quais ações de resposta apresentam uma perspectiva de maior eficiência para controlar a evolução do evento indesejado, favorecendo assim o processo de tomada de decisão durante situações críticas.

Normalmente não é recomendado que as árvores sejam muito longas, entretanto optou-se por este procedimento, conforme verificado em Vianna (20015), tendo em vista favorecer a localização mais precisa da evolução do fenômeno pelo Coordenador do PAE e a respectiva classificação do nível de perigo da barragem.

Foram considerados os seguintes cenários:

A. Árvore de eventos descrevendo o comportamento mais provável esperado para a ocorrência de piping na ombreira esquerda da barragem de Irapé. Esta pode ser considerada a árvore de eventos central do trabalho, uma vez que é utilizada como referência para as respectivas comparações;

B. Árvore de eventos considerando a aplicação de um filtro invertido no talude de jusante, devidamente dimensionado, capaz de envolver toda a região que apresenta carreamento de partículas;

C. Árvore de eventos considerando a

aplicação de material vedante a montante da região que apresenta carreamento de partículas, visando reduzir o gradiente hidráulico;

D. Árvore de eventos considerando o rebaixamento do reservatório, reduzindo ou eliminando o gradiente hidráulico na região afetada;

E. Árvore de eventos considerando o rebaixamento do reservatório, reduzindo ou eliminando o gradiente hidráulico na região afetada, associada à aplicação de filtro invertido a jusante.

Um trecho da árvore elaborada para o cenário A, assim como as justificativas para as notas aplicadas, são apresentados no Anexo I (Figura 3 e Tabela 4). Já o Anexo II apresenta o ramo equivalente ao cenário A, considerando, porém, a aplicação de um filtro invertido no talude de jusante, devidamente dimensionado, capaz de envolver toda a região que apresenta carreamento hipotético de partículas (Cenário B). No Anexo II foram justificadas apenas as notas que sofreram alteração em relação à anterior (Figura 4 e Tabela 5).

Verificou-se que a aplicação do método pode ser rápida, dinâmica, e eficiente, desde que exista um conhecimento prévio sobre a estrutura e os modos de falha. Os resultados obtidos neste estudo, que tem como principal foco a manutenção das condições de segurança da barragem durante situações emergenciais, podem ainda ser cruzados com outras informações pertinentes, a saber: a viabilidade de implantação das respectivas medidas no sítio da barragem, de acordo com as condições locais, ou o tempo necessário para cada ação de resposta. Estas medidas, porém, não foram consideradas neste trabalho, ficando a cargo do responsável pelo processo de tomada de decisão.

O Anexo II apresenta também uma visualização rápida das probabilidades hipotéticas encontradas para cada ramo das ETA's que levaria à ruptura da barragem (Tabela 6). Apresenta também a soma destas probabilidades para cada cenário, assim como uma análise comparativa entre o valor do comportamento esperado para o fenômeno e os valores obtidos após a adoção das respectivas ações emergenciais propostas.

Como esperado, percebe-se que o valor mais elevado de probabilidade ocorre em relação à descrição do fenômeno hipotético de ocorrência de piping pela ombreira esquerda da barragem de Irapé. À medida que foram simulados cenários considerando a aplicação de medidas corretivas e preventivas previstas no PAE, percebe-se a redução da probabilidade de ocorrência de uma ruptura, conforme a ação adotada e o momento em que é aplicada. As árvores demonstram que, assim como nas situações reais, quanto mais rápida for implantada a ação de resposta, e quanto maior sua eficiência, menor será a possibilidade de ocorrência de uma ruptura de barragem.

A metodologia proposta neste trabalho demonstra que técnicas de análise de risco podem favorecer não só a avaliação do comportamento atual das barragens, como é geralmente utilizada, mas também a visualização e análise da evolução mais provável para determinados modos de falha, favorecendo o processo de tomada de decisão relacionado ao PAE de barragens. Estas técnicas podem tornar a resposta a uma situação emergencial mais rápida e confiável, quando utilizados critérios adequados de avaliação.

A condição ideal é que estes estudos sejam desenvolvidos com antecedência, como ação preventiva, ainda que possa ser utilizado também durante a ocorrência de situações emergenciais, desde que exista um conhecimento prévio adequado.

Quanto mais estudos forem realizados na área de análise de risco, maiores serão as informações disponíveis para a realização de análises comparativas, e mais experientes serão as pessoas envolvidas neste tipo de atividade, favorecendo a percepção do risco e todo o seu processo de gerenciamento.

Este tipo de informação também tem grande utilidade para a realização de treinamentos, uma vez que leva os responsáveis a refletir sobre os diversos aspectos relacionados à segurança da barragem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFMG e à CEMIG GT pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- Balbi, D.A.F. (2008). Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens: estudo de caso: Barragem de Peti - MG. Dissertação. Mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- 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.
- 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. 210p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Lima, A. L. C. (2009). Influência da presença de sulfetos na implantação da UHE Irapé - Vale do Jequitinhonha - Minas Gerais. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO. Ouro Preto. 206 p.
- Minas Gerais. (2016) Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana. Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Disponível em <http://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/770/relatorio_final_ft_03_02_2016_15h5_min.pdf>. Acesso em 10/03/2016. 289p.
- Pimenta, M.L.B. (2009). Abordagens de riscos em barragens de aterro. Doutorado em Engenharia Civil. Lisboa: LNEC, 570 p.
- United States Bureau of Reclamation - USBR. (1998) Concrete Dams – Case Histories of failures and nonfailures with back calculations. Dam Safety Office. Denver, Colorado, EUA. 100p.
- Vianna, L.F.V. (2015). Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: Auxílio ao processo de tomada de decisão. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 171 p.

ANEXO I

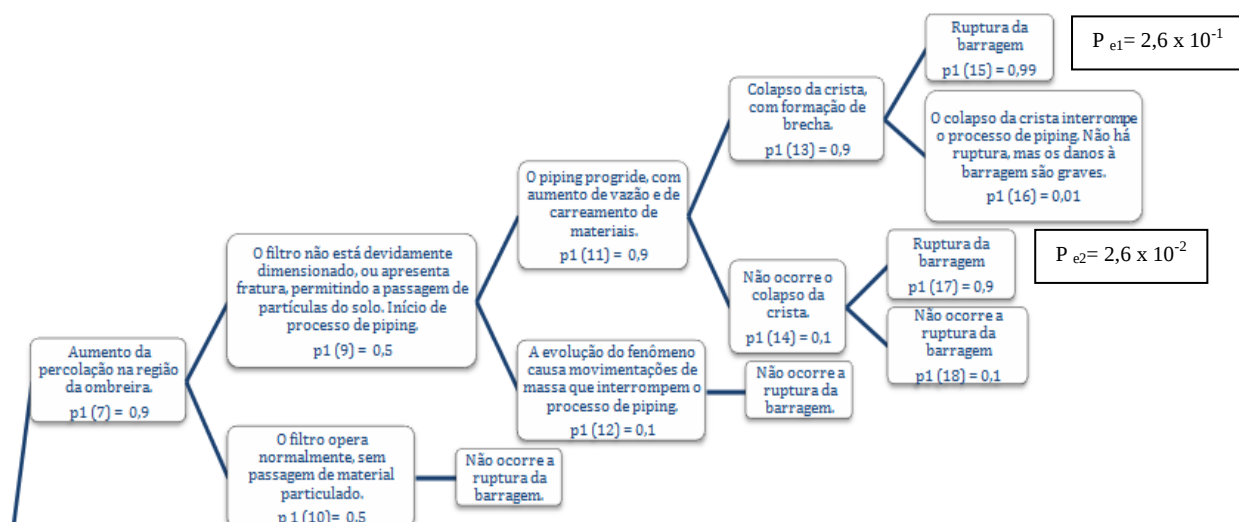


Figura 3. Trecho da ETA para o cenário A

Tabela 4. Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA (Cenário A)

Árvore de eventos do comportamento esperado para o piping		
	Valor	Justificativa
p1 (7)	0,9	A partir do momento que existe formação de caminhos preferenciais e aumento de poropressões, é provável que ocorra aumento de percolação na região da ombreira. O fato do VV004 operar normalmente, apesar de eventual interferência com o nível do reservatório, também reforça esta informação.
p1 (9)	0,5	Considerando que foram utilizados critérios adequados de projeto para o dimensionamento do filtro, e que a areia pode se moldar ao formato do vale em caso de deslocamentos, considera-se incerta a possibilidade de falha no filtro e início de formação de processo de piping. Ressalta-se que, caso os deslocamentos sejam acentuados, associados também os efeitos de arqueamento, estas falhas podem ocorrer.
p1 (10)	0,5	Complemento do ramo p1(9).
p1 (11)	0,9	Caso exista uma elevação de poropressão, associada a um mal comportamento do filtro e início de piping, é provável que ocorra aumento de vazão e carreamento de materiais particulados (progressão do piping). Este fato pode ser reforçado pela altura significativa do barramento e volume do reservatório.
p1 (12)	0,1	Complemento do ramo p1(11). É improvável que movimentações de massa decorrentes do processo de formação de piping interrompam o fenômeno.
p1 (13)	0,9	Considerou-se provável a possibilidade de colapso da crista e formação de brecha, pois o tamanho do reservatório, durante uma ocorrência de piping, tende a produzir grandes aberturas que levam ao colapso da crista. A distribuição de tensões na região da ombreira e os efeitos de arqueamento longitudinal podem amenizar este processo, mas ainda assim adotou-se a probabilidade de 0,9 para este efeito.
p1 (14)	0,1	Complemento do ramo p1(13).
p1 (15)	0,99	Caso ocorra o colapso da crista e formação de brecha, é quase certo que ocorrerá a ruptura da barragem.
p1 (16)	0,01	Complemento do ramo p1(15). É quase impossível que o colapso da crista interrompa o processo de piping.
p1 (17)	0,9	Mesmo que não ocorra o colapso da crista, é provável que o piping leve ao rompimento da barragem. Este fato somente não aconteceria caso o piping ocorra em uma altura muito elevada, e o rebaixamento do reservatório paralisasse o processo.
p1 (18)	0,1	Complemento do ramo p1(17).

ANEXO II

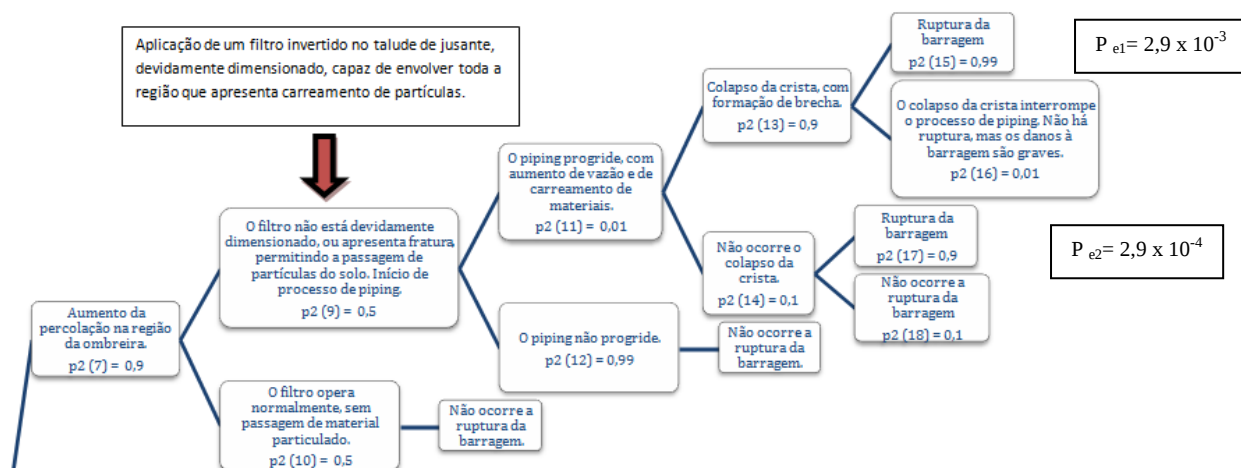


Figura 4. Trecho da ETA para o cenário B

Tabela 5. Justificativa das notas aplicadas nos estudos de ETA (Cenário B)

Árvore de eventos do comportamento esperado para o piping após a aplicação de filtro a jusante		
Valor	Justificativa	
$p2(11)$	0,01	Após a aplicação de um filtro invertido no talude de jusante, devidamente dimensionado, capaz de envolver toda a região que apresenta carreamento de partículas, espera-se que seja quase impossível a progressão do piping. A literatura aponta que, mesmo com gradientes elevados, não ocorre carreamento de partículas quando o filtro é devidamente dimensionado. Cabe ressaltar, porém, que a aplicação deste tipo de intervenção em uma barragem de enrocamento de grande dimensão pode ser complexa e demandar um tempo significativo. Deste modo, deve-se avaliar a velocidade de evolução do piping em relação ao tempo previsto para implementar esta intervenção.
$p2(12)$	0,99	Complemento do ramo $p2(11)$. Caso a intervenção proposta seja devidamente implementada, é quase certo que o piping não irá progredir.

Tabela 6. Resultados obtidos (Vianna, 2015)

Cenário	P_{E1}	P_{E2}	P_{E3}	P_{E4}	Somatória	Relação entre valor inicial e final
Comportamento mais esperado para a ocorrência de piping na ombreira esquerda da barragem de Irapé.	$2,6 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$3,15 \times 10^{-1}$	
Aplicação de um filtro invertido no talude de jusante, devidamente dimensionado, capaz de envolver toda a região que apresenta carreamento de partículas.	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-5}$	$3,51 \times 10^{-3}$	89,7
Aplicação de material vedante a montante da região que apresenta carreamento de partículas, visando reduzir o gradiente hidráulico.	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,69 \times 10^{-1}$	1,9
Rebaixamento do reservatório, reduzindo ou eliminando o gradiente hidráulico na região afetada.	$3,2 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-4}$			$3,53 \times 10^{-3}$	89,1
Rebaixamento do reservatório, reduzindo ou eliminando o gradiente hidráulico na região afetada, associada à aplicação de filtro invertido a jusante.	$3,2 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-5}$			$3,52 \times 10^{-4}$	893,8

P Probabilidade