

## **APLICAÇÃO DO MÉTODO DA ÁRVORE DE FALHAS (FTA) PARA AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE FALHA DAS COMPORTAS DO VERTEDOIRO DE UMA BARRAGEM**

*Fernando Neves Lima<sup>1\*</sup>; Mauro Naghettini<sup>2</sup> & Terezinha Espósito<sup>3</sup>*

**Resumo** – Este artigo tem como objetivo descrever uma aplicação do método da árvore de falhas na avaliação da probabilidade de falha de uma comporta do tipo segmento, componente do vertedouro de uma barragem. Embora pareça ser pouco explorado na literatura técnica, com poucas aplicações no domínio da engenharia de recursos hídricos, o método em foco, conhecido por FTA (Fault Tree Analysis), apresentou-se bastante útil e prático. Nesta análise por árvore de falhas, o evento de topo foi definido como a falha de uma única das oito comportas que compõem o vertedouro de superfície da pequena central hidrelétrica de Cajuru, localizada no rio Pará, no centro-sul de Minas Gerais. Todos os mecanismos e princípios de funcionamento da comporta foram analisados. O resultado obtido gerado foi considerado satisfatório e compatível com os resultados de estudos semelhantes reportados na literatura.

**Palavras-Chave** – Análise de Risco; Árvore de Falhas; Comportas

## **APPLICATION OF FAULT TREE ANALYSIS FOR ASSESSING THE PROBABILITY OF FAILURE OF THE GATES OF A DAM SPILLWAY**

**Abstract** – This paper aims to describe an application of the Fault Tree Analysis (FTA) to evaluate the probability of failure of a tainter gate of a dam spillway. Although FTA do not seem to be a well explored method in the technical literature, with just a few applications in the domain of water resources engineering, the focused method has proved to be useful and practical. In the present application, the fault tree top event has been defined as the failure of one of the eight tainter gates that make up the overflow spillway of the small hydropower plant of Cajuru, located in the Pará river, in the Brazilian state of Minas Gerais. All gate mechanisms and operating principles have been analyzed. The final result was considered satisfactory and compatible with those obtained in reported similar studies.

**Keywords** – Risk Analysis; Fault Tree Analysis; Spillway Gates.

<sup>1\*</sup> Afiliação: Engenheiro Civil, mestrando em Recursos Hídricos na Universidade Federal de Minas Gerais-fneveslima@gmail.com.

<sup>2</sup> Afiliação: Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG.

<sup>3</sup> Afiliação: Professora do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG.

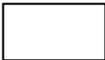
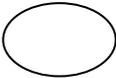
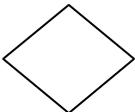
## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a prática de projetos de engenharia de barragens vem se aperfeiçoando, certamente com maior rigor técnico. Porém, ainda há muito a ser feito no que concerne à análise de risco e à gestão de segurança. Hartford e Baecher (2004) comentam que as análises de risco são úteis para a operação, a manutenção e a vigilância da barragem e de seu reservatório. Neste contexto, encaixam-se as análises quantitativas de risco, entre as quais, a análise por árvore de falhas (FTA-Fault Tree Analysis) tem particular destaque.

O método da árvore de falhas foi desenvolvido em 1961, pela empresa americana Bell Telephone. Segundo Baptista (2008) é o método de maior aplicação no âmbito de análises de riscos das mais diversas áreas, designadamente, nas indústrias aeronáutica, nuclear e química. As primeiras aplicações desse método remetem-se a estudos de confiabilidade de lançamento de mísseis (INERIS, 2003).

A FTA tem uma metodologia dedutiva, ou seja, parte-se de um determinado evento geral indesejável para se conhecer suas possíveis causas particulares. No contexto da árvore de falhas, esse evento indesejável é conhecido como evento de topo, a partir do qual é desenvolvida a árvore na direção vertical. Caldeira (2005) aponta que o evento de topo (ET) deve ser definido com base na condição ou no estado que constitui a ruptura de um sistema, em condições externas e nas condições e procedimentos de operação. Além do ET, outros elementos constituem a FTA, como os eventos primários que são aqueles que não sofrem qualquer desenvolvimento na análise, ou seja, são assumidos independentes dos outros eventos e, se a análise em questão for quantitativa, a eles devem ser atribuídas as respectivas probabilidades. Os demais eventos estão apresentados de forma sintética na Tabela 1. A análise da árvore de falhas pode ser qualitativa, quando se quer identificar as vulnerabilidades de um sistema ou individualizar os modos de falhas mais sensíveis, ou quantitativa, quando se quer avaliar a probabilidade de ocorrência de um evento indesejável e estimar a confiabilidade geral do sistema.

Tabela 1- Elementos da Árvore de Falhas. Fonte: Baptista(2008)

Símbolo Lógico	Evento	Observações
	Evento intermediário ou evento de topo	-----
	Evento básico	Acontecimento iniciador, falha inicial ou evento que não carece de maior desenvolvimento.
	Evento condicional	Condições específicas ou restrições que se aplicam a qualquer porta lógica.
	Evento exterior	Evento que ocorre habitualmente.
	Evento por desenvolver	Ramo que não é objeto de maior desenvolvimento por não ter importância ou por não haver informação suficiente que o fundamente

Entre os eventos da FTA existem relações denominadas portas lógicas. Tais portas possuem propriedades Booleanas semelhantes à teoria elementar dos conjuntos, tais como as propriedades comutativa, como  $(A \times B = B \times A)$ ; associativa, como  $[A \times (B \times C)] = [(A \times B) \times C]$ ; distributiva como  $[A \times (B + C)]$ ; de inalterabilidade, como  $(A + A = A)$ ; de absorção, como  $(A + A \times B = A)$ ; as de Morgan, como  $[(A \times B)' = A' + B']$  e  $(A + B)' = A' \times B'$ ; e da relação do conjunto vazio com o espaço amostral, em que o complementar do conjunto vazio é o próprio espaço amostral. Se a análise for quantitativa, a probabilidade de ocorrência de um evento será calculada dependendo do tipo de porta lógica que está associada ao evento indesejável (e.g., segundo Hartford e Baecher (2004), a porta OU equivale à união da álgebra Booleana, e, portanto, devem-se somar as probabilidades). A Tabela 2 apresenta as portas lógicas e suas aplicações.

Tabela 2 - Portas Lógicas da FTA e suas funções. Fonte: Adaptado de Baptista (2008)

Símbolo	Definição Porta	Observações
	Porta OU	O evento de saída ocorre se pelo menos um evento ocorrer.
	Porta E	O evento de saída ocorre se todos os eventos anteriores ocorrerem.
	Porta de Entrada	O evento advém de outra sequência (ou folha) e dá continuidade na folha corrente.
	Porta de Saída	Este símbolo representa uma transferência, ou seja, que a árvore continua em outra folha

## APLICAÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS (FTA) EM COMPORTAS

O objeto deste trabalho é uma aplicação do método FTA, a fim de realizar-se a avaliação quantitativa da probabilidade de uma possível falha de uma comporta do vertedouro da barragem de Cajuru. Essa barragem localiza-se no rio Pará, próximo ao município de Divinópolis, em Minas Gerais. De acordo com Reis (2007), a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) de Cajuru possui área de drenagem igual a 2230 km<sup>2</sup>, um vertedouro com capacidade de vazão máxima igual a 1002 m<sup>3</sup>/s e um reservatório com área máxima igual a 23,3 km<sup>2</sup>. A equipe técnica da concessionária do aproveitamento, ou seja, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), forneceu a informação de que a operação das comportas, que são do tipo segmento, é realizada individualmente por um motor que aciona um conjunto de engrenagens, o qual, através de uma haste, aciona duas caixas redutoras que movimentam duas correntes de erguimento da estrutura. A equipe técnica da CEMIG informou ainda que o comando é realizado no local. Além disso, possui como fonte de energia principal a própria unidade geradora da central, ou seja, quando esta falha, a energia se dá pelo retorno da linha. Se tais elementos falharem, entra em ação a fonte externa rural de 13,8 kV, cuja falha aciona um motor a diesel de emergência. Por fim, se todas as possibilidades anteriores falharem, há a opção de acionamento manual.

Com essas informações, foi elaborada uma árvore de falhas contendo os elementos necessários para o funcionamento da comporta, cuja construção apoiou-se no trabalho de Patev e Putcha (2005). Esses autores apontam que a avaliação de riscos em comportas e equipamentos associados é um processo complicado, uma vez que o cálculo do risco envolve componentes estruturais, mecânicos e elétricos. Para a atribuição das probabilidades de falha aos componentes da FTA, neste presente trabalho, foi utilizada a metodologia proposta por Patev *et al.* (2005), composta por um sistema de classificação. Este sistema permite atribuir pesos às probabilidades e as

probabilidades, propriamente ditas, são calculadas partindo-se da premissa que os componentes seguem uma distribuição exponencial. Com isso, a equação (1), que define a probabilidade, é a função acumulada de probabilidades da lei exponencial dada por:

$$P(\text{falha}) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

na qual,  $t$  é o tempo de operação da comporta, aqui adotado como 1000 horas;  $\lambda$  é a taxa de falha, a qual pode ser obtida a partir de dados observados ou, na ausência deles, pela equação (2):

$$\lambda = \frac{\chi^2}{2t} \quad (2)$$

Na equação (2),  $\chi^2$  corresponde ao valor da estatística do Qui-Quadrado (PATEV *et al.*, 2005) com dois graus de liberdade e, neste estudo de caso, com confiabilidade de 99,9%. A Tabela 3 apresenta os valores de  $\lambda$  que foram admitidos como típicos, segundo o estudo de Patev *et al.* (2005).

Tabela 3 - Valores de  $\lambda$  sintetizados a partir de Patev *et al.*(2005).

Evento	$\lambda$
Linhas de Transmissão	$0,2 \times 10^{-6}$
Energia de emergência	$0,4 \times 10^{-6}$
Circuito de controle	$0,2 \times 10^{-6}$
Falha no motor	$0,1 \times 10^{-6}$
Turbina geradora	$1,2 \times 10^{-6}$
Falha no mancal	$1,2 \times 10^{-6}$

Além das atribuições das probabilidades de falha para os diversos componentes, o método da FTA também pressupõe os atributos de criticalidade. As tabelas 4 e 5 apresentam um sumário da classificação das criticalidades atribuídas a cada componente.

Tabela 4 - Criticalidade dos componentes

Criticalidade do componente	Efeito Potencial de Falha
1	Inoperável: Comporta não irá abrir ou fechar.
2	Perda de elementos que exigem métodos não padrões para abertura ou fechamento da comporta.
3	Não irá afetar o funcionamento significamente.

Tabela 5-Criticalidade da Funcionalidade

Criticalidade da Funcionalidade	Efeito Potencial de Falha
1	Uma única falha pode resultar em uma comporta inoperante
1R	Componentes dos quais se todos falharem pode resultar em uma comporta inoperante
2	Perda de um único item requer uma medida não padrão para abrir/fechar comporta
2R	Componentes dos quais se todos falharem requer uma medida não padrão para abrir/fechar comporta
3	Não irá afetar significativamente o funcionamento

A Tabela 6, por sua vez, apresenta os pesos ( $W_i$ ) a serem atribuídos às probabilidades de cada elemento da FTA.

Tabela 6- Peso das Probabilidades para cada combinação. Adaptado de Patev *et al.* (2005)

Combinação das criticalidades	Peso das probabilidades( $W_i$ )
1/1	0,99
1R2	0,9
1R3	0,7
1Rn (n>3)	$0,7^{(n-2)}$
2/2	0,01
2R3	0,001
2Rn (n>3)	$0,001^{(n-2)}$
3/3	0,001

### PROBABILIDADE DE NÃO ATENDIMENTO PELO VERTEDOURO

O vertedouro da barragem de Cajuru, conforme citado anteriormente, tem a capacidade para escoar a vazão máxima de 1002 m<sup>3</sup>/s. CPRM (2001) elaborou um estudo de regionalização das médias das vazões máximas para a região, considerada no estudo como região homogênea, do alto e médio Rio Pará. O modelo de regressão que relaciona as cheias médias (index-flood) às respectivas áreas de drenagem é :

$$Q_{\text{Max-Med}} = 0,2451 \cdot A^{0,8751} \quad (269 \leq A \leq 26553 \text{ km}^2) \quad (3)$$

Substituindo em (3) o valor da área de drenagem de Cajuru, a qual é de 2230 km<sup>2</sup>, obtém-se o valor da vazão máxima média, ou cheia média, igual a 208,66 m<sup>3</sup>/s. No estudo da CPRM (2001), definiu-se, após testes de aderência e pelo posicionamento dos valores regionais no diagrama Curtose-L versus Assimetria-L, que a melhor distribuição estatística válida para a região, foi a Logística Generalizada, cuja função acumulada de probabilidades é dada por

$$F(x) = \frac{1}{1+e^{-y}} \quad (4)$$

onde  $y = \left\{ -k^{-1} \ln \left[ 1 - k \left( x - \frac{\xi}{\alpha} \right) \right] \right\}$  para  $k \neq 0$ . As estimativas dos parâmetros da distribuição são  $\xi$  (Posição) = 0,918;  $\alpha$  (Escala) = 0,223;  $k$  (Forma) = -0,213.

Com isso, tem-se que  $F(x)$ , tal como particularizada para o conjunto paramétrico dado e para  $x = Q_{\text{Cajuru}}/Q_{\text{Max-Med}} = 1002/208,66 = 4,80$ , resulta em  $F(x) = 0,9993$ . Em hidrologia, quando se estuda eventos de máximos anuais, a definição do tempo de retorno, ou seja, o tempo médio necessário em anos para que o evento recorra em um ano qualquer, é dada por:

$$T_r = \frac{1}{1-F(x)} \quad (5)$$

Para as condições definidas anteriormente, o tempo de retorno associado ao dimensionamento do vertedor foi de 1445,28 anos. Portanto, a probabilidade de um valor superar a vazão de 1002 m<sup>3</sup>/s é o inverso do tempo de retorno, ou seja, 0,00069 que é a única probabilidade calculada diferentemente das demais, uma vez que o componente vertedouro na FTA tem um risco hidrológico que está associado à probabilidade de ele estar subdimensionado, assim provocando cargas indevidas na comporta.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figura 1 e 2 apresentam a árvore de falhas gerada, levando em consideração as hipóteses de falha relatadas na literatura (PATEV e PUTCHA, 2005) e informações técnicas fornecidas pela equipe técnica da CEMIG.

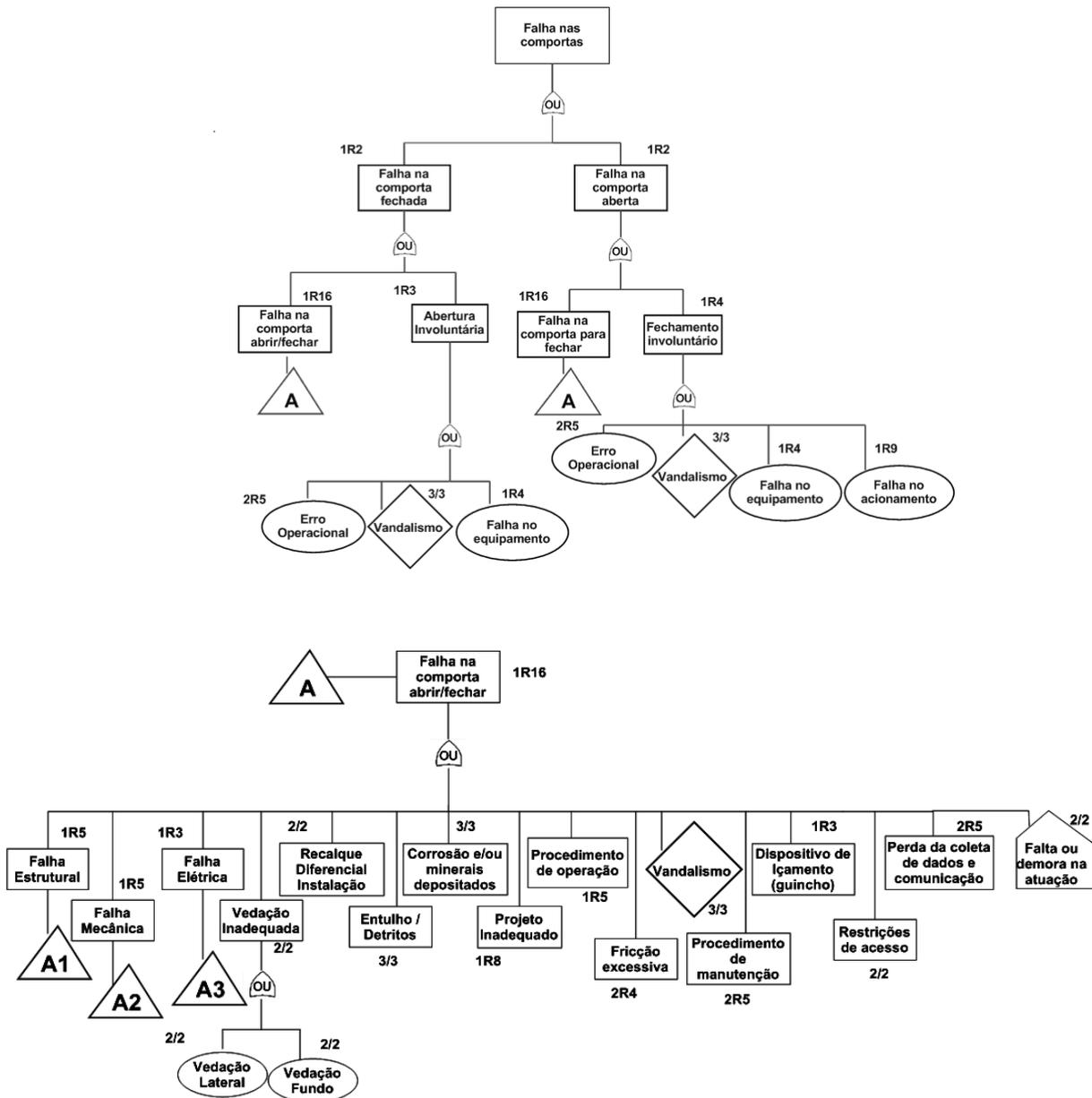


Figura 1 - FTA da comporta de Cajuru. Parte I

Na construção da árvore de falhas, o tipo de comporta (segmento) foi determinante para a definição dos componentes da FTA, bem como o tipo de acionamento que é feito através de correntes. Alguns fatores exteriores como vandalismo e restrições de acesso foram considerados, porém com um peso ( $W_i$ ) menor devido à pouca nocividade que representa na análise em questão. Todos os pesos foram atribuídos aos componentes seguindo a metodologia proposta por Patev *et al.* (2005). Por exemplo, o componente "falha no equipamento" foi classificado como 1R4 visto que a falha de quaisquer dos quatro elementos associados a este componente, a saber, motor, haste,

correntes e caixas redutoras, pode resultar em uma comporta inoperante. Outro fator importante inserido na análise e que atende especificamente a PCH de Cajuru, é a falta ou demora na atuação, uma vez que a central hidrelétrica é desassistida, de acordo com informações da equipe técnica da CEMIG.

As portas lógicas foram levadas em conta no momento de atribuição das probabilidades e constatou-se que a porta OU gerou maiores valores probabilísticos em relação à porta E, uma vez que, na porta OU, as probabilidades são somadas. Esta diferença se mostrou bem ampla quando comparada às falhas mecânicas, elétricas e estruturais, visto que na falha elétrica havia muitas portas E, o que resultou em uma pequena probabilidade (0,00017), enquanto na falha estrutural, a probabilidade de falha foi de 0,00029, e, na falha mecânica, o valor foi de 0,00077. Analisando o sistema é plausível que seja menos provável ocorrer uma falha elétrica devida à combinação de eventos que devem acontecer simultaneamente, como a falha no sistema de fonte principal e fonte retaguarda.

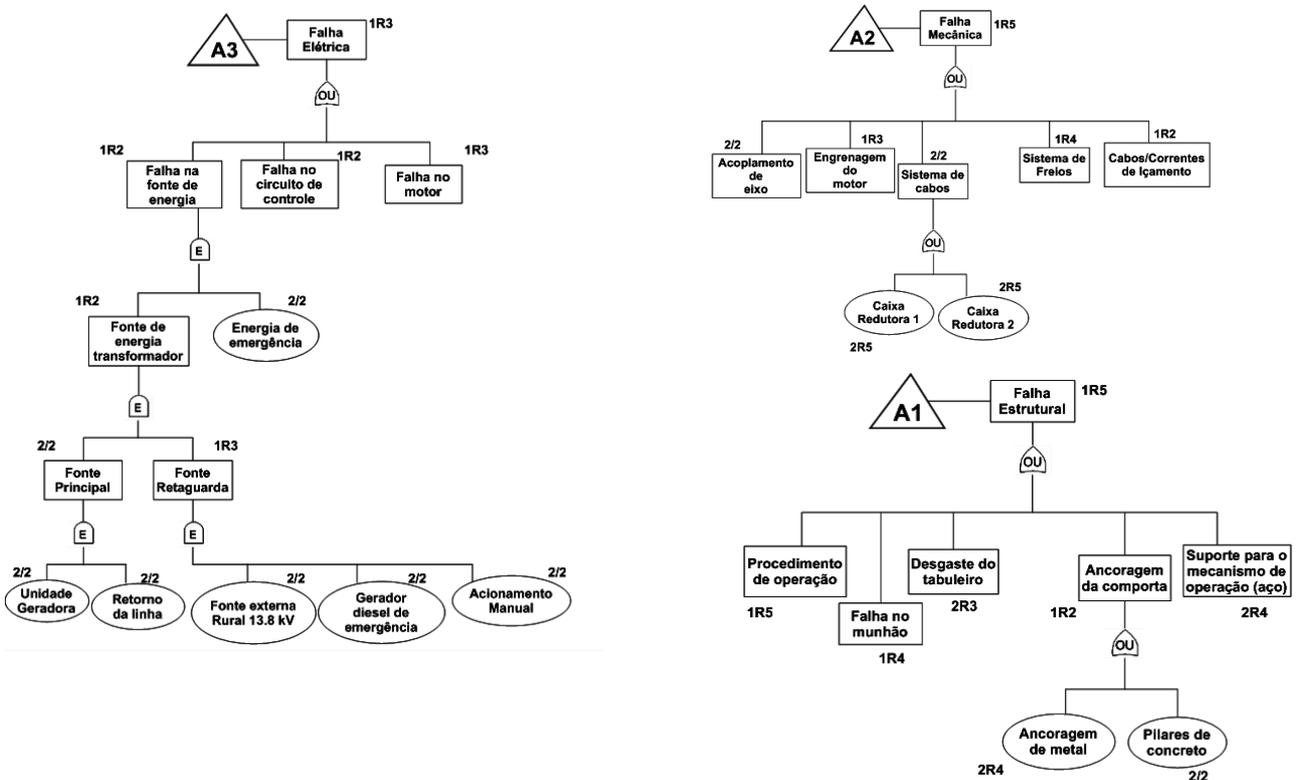


Figura 2 - FTA da comporta de Cajuru. ParteII.

Lewin *et al.*(2003) afirmam que, em muitos casos, a falha em comportas individuais não resulta em consequências sérias, mas a possibilidade existe se tal evento ocorrer durante um período crítico de cheia. Os referidos autores ainda apontam que a falha no suprimento de energia é o principal fator que causa o mau funcionamento das comportas, ainda que as falhas nos sistemas de içamento da comporta sejam mais frequentes se forem analisadas as comportas individualmente.

O valor final para a falha de uma comporta calculado para a PCH de Cajuru, ressaltando que na barragem há oito comportas, foi de  $8,62 \times 10^{-5}$ , o que está aceitável comparado com valores de literatura reportados por Lewin *et al.*(2003), que apresentam, em um estudo de confiabilidade de comportas, que quatro em cada cinco comportas excedem o limite de probabilidade anual de falha de 1 em 10000. Cabe ressaltar que Estes *et al.*(2005) apontam que, no primeiro ano de

funcionamento, o sistema da comporta apresenta uma probabilidade de falha igual a  $2,77 \times 10^{-5}$  e que este valor vai aumentando ao longo dos anos.

## CONCLUSÕES

Apresentou-se neste artigo o relato de aplicação do método FTA (Fault Tree Analysis) para a avaliação quantitativa da probabilidade de falha de funcionamento de uma comporta do tipo segmento do vertedouro da PCH de Cajuru. O cálculo levou em consideração os diversos componentes estruturais, mecânicos e elétricos associados ao funcionamento e erguimento da comporta. A aplicação exemplificou a utilidade e a praticidade do método de FTA, e conduziu a resultados compatíveis com aqueles reportados na literatura especializada. Na sequência dos trabalhos desta pesquisa, espera-se poder incluir os resultados aqui obtidos na avaliação geral da probabilidade de eventual colapso da barragem de Cajuru, decorrente de falhas individuais, ou em conjunto, de suas estruturas hidráulicas.

**Agradecimentos:** os autores agradecem a Companhia Energética de Minas Gerais pela oportunidade deste estudo e pelo suprimento das informações necessárias à sua consecução. À agência CNPq pelo apoio ao projeto 131760/2012-2 e também à FAPEMIG pela participação no XX SBRH.

## REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, Maria de Lurdes Pimenta. *Abordagens de riscos em Barragens de aterro*. 2008. 570 f. Dissertação (Doutorado) - Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.
- CALDEIRA, Laura Maria Mello Saraiva. *Análises de Riscos em Geotecnia: Aplicação a barragens de aterro*. 2005. 248 f. Dissertação (Doutorado) - Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005.
- CPRM. *Regionalização de Vazões Sub-Bacias 40 e 41: Relatório Final Volume IV*. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais, 2001.
- ESTES, Allen C.; FOLTZ, Stuart D.; MCKAY, David T. Estimating Risk from Spillway Gate Systems on dams using condition assessment data. *Us Army Corps Of Engineers*, Washington, p.1-97, Outubro 2005.
- 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.23
- INERIS - Institut National de L'Environnement Industriel et des Risques. *Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle*, 2003. Disponível em: <<http://www.perfspot.com/docs/doc.asp?id=110229>> Acesso em: 06 mar. 2013.
- LEWIN, Jack; BALLARD, Geoffrey; BOWLES, David S. Spillway Gate Reliability in the context of Overall Dam Failure Risk. *USSD Annual Lecture*, Charleston, p. 1-17. 01 abr. 2003.
- PATEV, Robert; PUTCHA, Chandra. Development of Fault Trees for Risk Assessment of Dam Gates and Associated Operating Equipment. *International Journal Of Modeling And Simulation*, United States Of America, p. 190-201. Março 2005.
- PATEV, Robert; PUTCHA, Chandra; FOLTZ, Stuart. Methodology for Risk Analysis of Dam Gates and Associated Operating Equipment Using Fault Tree Analysis. *Engineer Research And Development Center*, Washington, D.C, p. 01-40. Maio 2005.
- REIS, Alberto Assis Dos. *Estudo Comparativo, Aplicação e Definição de Metodologias apropriadas para a determinação da vazão ecológica na bacia do Rio Pará, em Minas Gerais*. 2007. 191 f. Dissertação (Mestre) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, 2007.