

# RISCO ASSOCIADO À RUPTURA POR GALGAMENTO DE BARRAGENS EM ATERRO

**J. Brito dos Santos**

DECivil, Instituto Superior Técnico

**M.J. Franca**

Departamento de Engenharia Civil  
Pólo II da Universidade de Coimbra  
Pinhal de Marrocos 3030-788 Coimbra, Portugal  
mfranca@dec.uc.pt

**A. Betâmio de Almeida**

DECivil, Instituto Superior Técnico

**Resumo:** O enorme potencial destrutivo que constitui o volume de água armazenado numa albufeira induz um factor risco no vale a jusante de uma barragem. O conceito de risco assenta na estimativa de probabilidades de ocorrência e danos provocados pelo acidente, conduzindo à necessidade de modelação de fenómenos. O presente artigo aborda a modelação física e matemática e a análise de incertezas associadas aos modelos de ruptura de barragens no âmbito da análise do risco. Ao tratar-se da condição de fronteira a montante na análise de propagação de cheias, a modelação física e matemática da ruptura de barragens constitui a base da análise do risco. A modelação da ruptura de barragens não se trata de uma modelação determinística; os resultados provenientes da modelação transportam incertezas de natureza epistémica e aleatória que devem ser integradas na análise do risco. Neste documento apresentam-se resultados provenientes de um estudo experimental e numérico de ruptura de barragens em aterro, assim como resultados da aplicação de um método de propagação de incertezas (probabilidades) a um modelo de ruptura de barragens.

## INTRODUÇÃO

Apesar de constituir um evento com baixa probabilidade de ocorrência, as consequências catastróficas de uma cheia resultante de um acidente numa barragem leva os organismos responsáveis pela segurança e protecção civil e a comunidade técnico-científica a se debruçarem sobre a problemática relacionada com este tipo de acidente, para o correcto planeamento das acções de prevenção e mitigação dos seus efeitos. A maior exigência e percepção dos potenciais perigos a que as populações estão sujeitas tornam os aspectos relacionados com a segurança ambiental e riscos tecnológicos um assunto de emergente interesse público ao qual o poder político não deve ficar indiferente.

A preocupação patente no Regulamento de Segurança de Barragens (RSB 1990) em vigor em Portugal que impõe estudos de ruptura e a realização de cartas de inundação no vale a jusante correspondentes a cheias resultantes de uma eventual e hipotética ruptura da barragem

é resultante desta perspectiva de segurança e presença de risco potencial admitido. Segundo o RSB, o conceito de segurança de barragens pode ser definido como a capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes ou acidentes (art. 3).

No sentido de melhorar a segurança das barragens e dos vales a jusante, o Comité Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) leva a cabo acções sistemáticas para aprofundar o conhecimento sobre a problemática da ruptura de barragens, baseadas em dados relativos aos casos conhecidos de acidentes, e a preparação de recomendações e critérios de projecto. Tarefa essencial para a caracterização da cheia induzida por um acidente do tipo ruptura de barragem é a modelação hidrodinâmica e simulação computacional da mesma. É com base nos resultados obtidos através da simulação que se elaboram os mapas de inundação e de zonamento e as cartas de risco de forma a ser feito o estudo das consequências e das possíveis medidas a tomar para

mitigação do acidente. Contudo, as incertezas associadas à modelação deste tipo de processos não podem ser negligenciadas. Estas devem ser analisadas por métodos apropriados, caso a caso, para que a estimativa obtida revele o estado de conhecimento actual, caminhando-se de um conceito de segurança para um conceito de risco.

## ENQUADRAMENTO

### Breve historial

Os primeiros regulamentos com procedimentos de segurança nos vales a jusante de barragens surgiram na segunda metade do século XX. A ocorrência de alguns acidentes com barragens na Europa, hoje considerados como casos paradigmáticos, levaram a comunidade técnico-científica, associada ao projecto, construção e exploração de barragens, a reflectir sobre os efeitos de um acidente deste tipo e as medidas a adoptar, preventivas e mitigadoras. Referem-se três destes acidentes com barragens na Europa na segunda metade do Século XX (Almeida 2001):

- Barragem de Malpasset (1959), França, de betão (abóbada) com 61 m de altura, a cheia induzida provocou 421 mortes ao longo dos 11 km do vale até ao Mediterrâneo;
- Barragem de Vega de Tera (1959), Espanha, de contrafortes com 34 m de altura, colapsou parcialmente provocando a morte de 144 pessoas no vale a jusante;
- Barragem de Vajont (1963), Itália, de betão (abóbada) com 265 m de altura, foi galgada pela água inicialmente armazenada na albufeira ( $150 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), em resultado de um deslizamento de cerca de  $240 \times 10^6 \text{ m}^3$  de rocha de uma encosta, provocando a morte a cerca de 2 600 pessoas no vale a jusante.

A eficácia dos procedimentos de segurança de barragens e dos vales a jusante foi posta à prova nos acidentes com as barragens de Baldwin Hill (1963) e San Fernando (1971), ambas nos Estados Unidos da América.

A partir da década de 70 tem sido feito um esforço para a melhoria dos sistemas de protecção civil, incluindo uma maior participação pública, por forma a que as populações locais passem

a estar conscientes dos planos de emergência, complementando as acções de segurança estrutural e hidráulico-operacional das barragens (Almeida 2001).

Nas décadas de 80 e 90 surgem novos conceitos e metodologias integradas para a segurança nos vales a jusante de barragens que aglomeram diversos domínios, não só o domínio tradicional respeitante à tecnologia de engenharia de barragens, como também novas tecnologias de apoio à decisão e à protecção civil, os meios de comunicação social, as ciências sociais aplicadas e o ordenamento e a gestão do vale (Almeida 2001 e Almeida 2000a,b).

Kreuzer (2000) enuncia os motivos que conduzem ao crescente interesse da utilização da análise do risco no processo de decisão relativos à segurança de barragens e gestão do risco:

- o aumento da idade das barragens;
- a opinião que a análise de risco permite avaliar margens de segurança mais realisticamente que a abordagem tradicional (determinística) baseada em critérios de segurança;
- o desejo público de quantificar os riscos decorrentes de catástrofes;
- o julgamento da segurança dentro de um quadro de condições de mudança climática;
- o aumento das consequências nos vales de jusante resultantes de um aumento da densidade populacional;
- possibilidade de atingir benefícios económicos da quantificação do risco.

### Causas de ruptura de barragens

Diversas são as causas que podem levar à ruptura de uma barragem podendo um acidente ocorrer devido a um factor isolado ou a um conjunto de factores combinados.

Johnson & Illes (1976) apresentam uma descrição dos vários tipos de ruptura, relacionando cada tipo de barragem (aterro, betão-gravidade e betão em arco) com a forma de ruptura mais comum. Também Singh (1996) apresenta um resumo com as causas de ruptura ligadas a cada um destes três tipos de barragens. Apresenta-se um quadro resumo, Tabela 1, elaborado com base em ambas as referências.

<b>Tipo de barragem</b>	<b>Tipo de ruptura</b>
Aterro	Galgamento Erosão interna Escorregamento da fundação Acção de ondas da albufeira Erosão da fundação a jusante da barragem
Betão gravidade	Deterioração dos materiais Falha da fundação da barragem Falta de estabilidade do corpo da barragem Erosão da fundação a jusante da barragem Actos de guerra
Betão em arco	Falha dos encontros laterais do vale de fundação Saturação das fundações rochosas Carga excessiva resultante de um excessivo enchimento da albufeira Deslizamento do corpo da barragem Erosão da fundação a jusante da barragem

**Tabela 1.** Causas da ruptura de barragens, segundo em Johnson e Illes (1976) e em Singh (1996)

Segundo Serafim (1981), as principais causas de ruptura de barragens são o galgamento (em geral devido à ocorrência de cheias excepcionais ou a falha dos mecanismos de abertura de comportas), responsável por cerca de um terço do total dos desastres, a erosão interna (fenómenos de piping ou uplifting) que corresponde a outro terço e ainda a inadequação das fundações, sismos, falta de capacidade resistente dos materiais, erros de projecto e de construção, como sendo as restantes causas responsáveis pela ruptura de barragens. O galgamento e a erosão interna são causas de ruptura de barragens de aterro, o que indica a maior vulnerabilidade deste tipo de barragens.

### **Definição de emergência em acidentes com barragens**

Actualmente, o conceito relacionado com segurança de barragens mais comum assenta em duas componentes relacionadas com a segurança do vale a jusante (Almeida 2001 e Almeida 2000a):

- Emergência: elaboração, planeamento e treino de procedimentos especiais preventivos para dar resposta a situações de emergência ocasionadas pela ocorrência de situações críticas que possam constituir perigo;
- Gestão do Risco: avaliação dos níveis de risco envolvidos nas diversas fases da vida de uma barragem, desde a construção até ao abandono da obra, e promoção de medidas mitigadoras de danos causados por eventuais acidentes face à inevitabi-

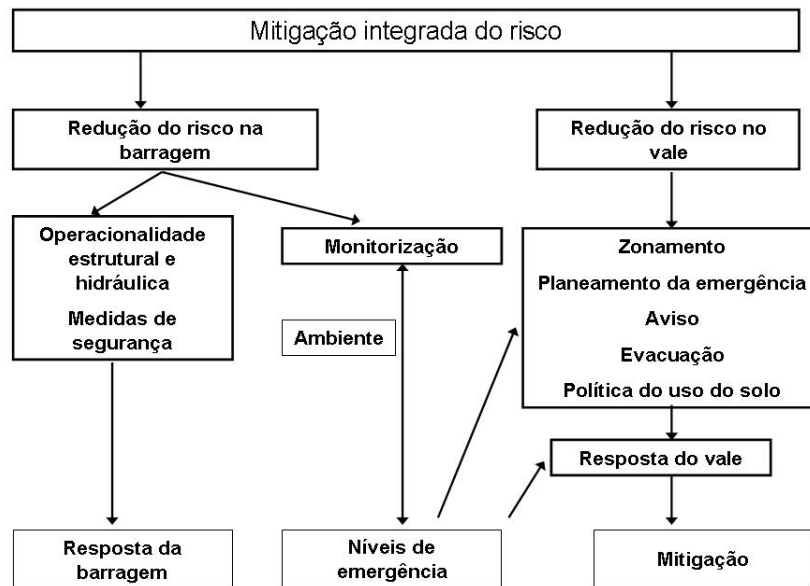
lidade de uma segurança não absoluta ou sujeita a incertezas.

Wahl (1997) introduz três noções úteis para o enquadramento temporal de todo o processo relacionado com o accionamento dos mecanismos de emergência de aviso e possível evacuação no vale de jusante, em caso de acidente numa barragem: tempo de início da brecha: tempo entre o início da ocorrência de condições críticas de formação da brecha, suficientes para accionar os dispositivos de alerta, (por exemplo galgamento da barragem por um caudal significativo) e o começo da formação da brecha; tempo de ruptura ou tempo de formação da brecha: tempo entre a formação inicial da brecha e a sua formação total (configuração final); tempo de aviso (em relação a uma determinada posição no vale a jusante): soma do tempo de ruptura com o tempo de início da brecha e com o tempo de chegada da onda de cheia desde a barragem à posição considerada.

A Figura 1 ilustra o esquema integrado de mitigação do risco que deverá ser montado o sistema barragem-vale a jusante.

### **Análise do risco**

O objectivo fundamental na análise do risco associado à ruptura de uma barragem é a avaliação do risco para as populações e bens a jusante da barragem para aplicação nos seguintes domínios: avaliação de soluções de projecto e dimensionamento alternativas; a verificação dos regulamentos e normas de segurança; estabelecimento de sistemas de protecção das populações, nomeadamente no que respeita à definição dos



**Figura 1.** Sistema integrado de mitigação do risco no vale de jusante (Almeida *et al.* 2003)

planos de emergência e à garantia de níveis de risco aceitáveis; desenvolvimento de metodologias de implementação de sistemas integrados de defesa não estrutural; obtenção de instrumentos de apoio à decisão que promovam a percepção pública dos riscos e a partilha de responsabilidades da sociedade (Almeida 2001).

Na terminologia adoptada pelo ICOLD (Kreuzer 2000), o risco é uma medida de probabilidade de um acontecimento adverso para a vida, saúde, bens ou ambiente, devendo ser estimado matematicamente pelos valores esperados das consequências do acontecimento adverso (i.e. produto de uma probabilidade de ocorrência e os danos provocados), ou pela probabilidade associada a um conjunto de cenários e as suas consequências. Em Portugal, o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, Art. 3) define dois tipos de risco: o risco efectivo (produto do risco potencial pela probabilidade de ocorrência de acidente relacionado a esse risco num determinado período de tempo ou de vida da obra) e o risco potencial (quantificação das consequências de um acidente, independentemente da probabilidade de ocorrência).

De acordo com Almeida *et al.* (2003), o risco ( $R_i$ ) devido ao acontecimento  $E_i$  é dado por:

$$R_i = P(E_i) \int_0^{D_{\max}} \int_0^{Q_{\max}} P(Q_p|E_i)P(D|Q_p)D dD dQ \quad (1)$$

em que  $P(Q_p|E_i)$  é a probabilidade condicional de ocorrência de uma cheia anormal com caudal de ponta de cheia igual a  $Q_p$  induzido pela resposta da barragem ao acontecimento  $E_i$ ;  $P(D|Q_p)$  é a probabilidade condicional de ocorrerem  $D$  perdas ao longo do vale devido ao caudal de ponta induzido  $Q_p$ ;  $Q_{\max}$  é o caudal de ponta máximo possível,  $D_{\max}$  são os maiores danos possíveis.

A dificuldade de caracterizar as probabilidades condicionadas em toda a extensão do intervalo de integração é um aspecto evidente, constituindo uma das razões dos "opositores" da análise do risco em detrimento da aplicação de critérios de segurança. Esta dificuldade é contornada através de simplificações à equação descrita, decomposição dos acontecimentos (e.g. árvores de eventos), atribuição de probabilidades subjectivas, consideração de critérios ou conjunto de cenários de combinação dos eventos considerados e análise das incertezas de parâmetros no encadeamento de acontecimentos (Almeida 2001), tornando-se para tal essencial a modelação dos fenómenos implicados.

## MODELAÇÃO DA RUPTURA DE BARRAGENS

### Considerações gerais

No âmbito dos estudos sobre ruptura de barragens levados a cabo no CEHIDRO (IST),

desenvolveram-se modelos físicos à escala reduzida de barragens de aterro (Franca & Almeida 2002) e elaborou-se um modelo numérico computacional em ambiente amigável denominado RoDaB - Rockfill Dam Breaching (Franca & Almeida 2004, Franca *et al.* 2004). Este pretende ser uma ferramenta para a prática de engenharia e também de suporte à investigação em metodologias matemáticas para a simulação de rupturas de barragens.

### Modelação física

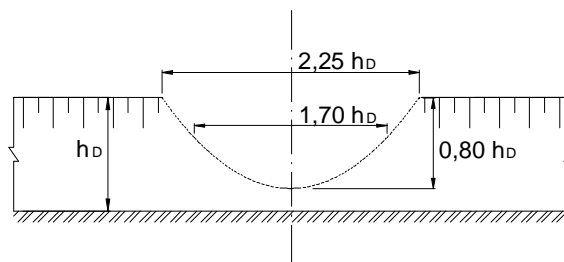
A avaliação dos efeitos de uma ruptura de barragens deverá ter em conta a quantidade de água armazenada na albufera, o caudal afluente à albufera, a forma e as dimensões da brecha, a carga hidráulica e o tempo de formação da brecha (FEMA 1999 e Atallah 2002). A escassez de dados existentes e a incerteza relacionada com a determinação dos parâmetros físicos da brecha em barragens de aterro justificam o recurso à modelação em laboratório de forma a obter formulações empíricas para os parâmetros descritores da brecha, permitindo a sua implementação em modelos numéricos do desenvolvimento de brechas. No âmbito do projecto de investigação POCTI/ECM/2688/2003 - Ruptura de Barragens: Estudo de Causas Naturais e Tecnológicas e Modelação das Questões Hidrodinâmicas Associadas, foi levada a cabo uma campanha de ensaios laboratoriais no CEHIDRO em ruptura de barragens de enrocamento (Franca 2002), ver Figura 2.



**Figura 2.** Modelação física da ruptura de barragens em enrocamento (Franca 2002))

A modelação física permitiu fornecer informação adicional à fenomenologia da ruptura de

barragens de enrocamento de onde se destaca: a confirmação de um critério de instabilização e de início de ruptura definido em termos de caudal específico, para barragens de enrocamento sujeitas a galgamento; a evolução da brecha e o respectivo hidrograma efluente não são contínuos, estando sujeitos a escorregamentos no talude de jusante que o fragilizam e permitem a continuação do processo erosivo; a configuração final da brecha tem uma forma parabólica com uma relação entre a largura no topo e a altura da barragem de cerca de 2,25, e entre a largura média e a altura da barragem de cerca de 1,70 (Figura 3); a taxa de evolução da largura da brecha é inferior à taxa de evolução da soleira, verificando-se que nos instantes iniciais a brecha adquire uma largura da ordem de grandeza da altura da barragem; a deposição dos blocos de enrocamento a jusante trava o processo erosivo, limitando a profundidade da brecha a cerca de 80% da altura da barragem (Figura 3). Dos ensaios laboratoriais em modelo reduzido é possível prever um tempo de ruptura entre 0.9 a 2.4 horas para uma barragem protótipo tipo com 25 m de altura.



**Figura 3.** Modelo da configuração final da brecha para barragens de enrocamento (Franca 2002)

O processo de experimentação laboratorial envolve diversos erros e incertezas que virão associados aos resultados obtidos e que deverão ser tidas em conta aquando modelação dos processos em situações da prática de engenharia.

### Modelação numérica - RoDaB

O RoDaB, inicialmente concebido para ser aplicado a barragens de enrocamento, é um modelo computacional simplificado, para a simulação de ruptura por galgamento de barragens em aterro (Franca & Almeida 2004, Franca *et al.* 2004). O modelo é baseado numa metodologia simples de esvaziamento de albufera (reservoir routing), tendo como condição fronteira de jusante a vazão na brecha que, por sua vez, é dependente da erosão da brecha. O RoDaB

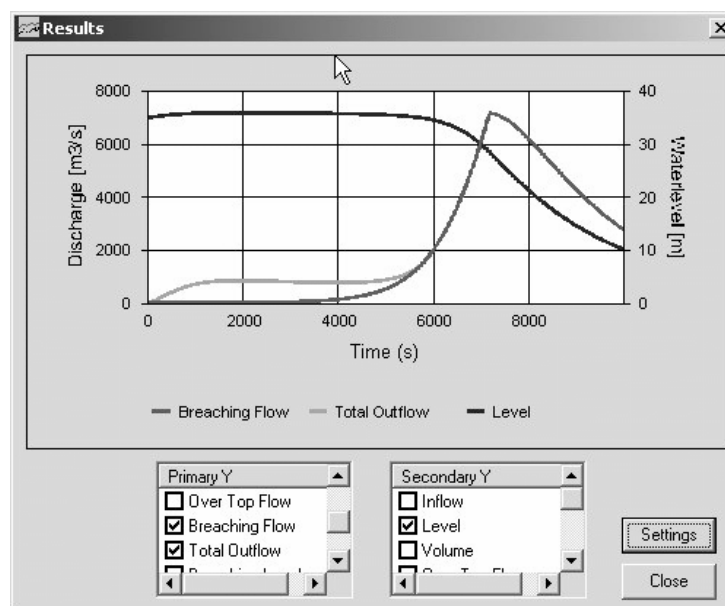


faz o cálculo da evolução da brecha recorrendo a três metodologias diferentes: i) totalmente empírica; semi-racional e racional. A primeira abordagem baseia-se no conhecimento a priori dos parâmetros da brecha (geometria final, tempo de formação e tipo de evolução da brecha). A metodologia semi-racional requer o conhecimento da geometria final da brecha mas a sua evolução é controlada pela erodibilidade do material da barragem, usando para tal uma equação de erosão de Exner (Exner 1925) adaptada. Por fim, na abordagem racional, toda a simulação é baseada nas características de erodibilidade do material da barragem (uma vez mais utilizando uma equação de erosão de Exner adaptada).

Franca (2002), com base numa versão preliminar do modelo RoDaB, efectuou diversas simulações numéricas que permitiram avaliar a consistência dos seus resultados físicos face a outras formulações existentes para a determinação dos parâmetros da brecha, e a sensibilidade do hidrograma de cheia a factores como o tempo de ruptura e o volume da albufeira. A aplicação dos parâmetros baseados na experimentação física ao caso real da ruptura da barragem de Castlewood mostrou uma boa concordância com a aplicação das formulações de Froehlich (1987). Verificou-se a influência das taxas de evolução da brecha diferentes na forma dos hidrogramas resultantes. Verificou-se a importância da determinação do tempo de ruptura para a correcta avaliação do hidrograma de cheia e do correspondente caudal máximo efluente pe-

la brecha (a sensibilidade destes é grande à variação do tempo de formação da brecha). O valor de pico do hidrograma efluente e o instante da sua ocorrência são sensíveis ao volume de água libertado no momento do acidente. A simplicidade da formulação na metodologia racional do modelo RoDaB reside na sua simples dependência de dois parâmetros de erosão determinados empiricamente em função do material constituinte da barragem e do coeficiente de resposta dinâmica da albufeira que é função da geometria desta.

Franca *et al.* (2004) aplicaram o modelo RoDaB para o caso de estudo da ruptura da barragem de Salles Oliveira no Brasil, ocorrido no ano de 1977 (Figura 4). O empreendimento, destinado à produção de energia eléctrica, foi construída no ano de 1966, cerca de 10 km a jusante da barragem de Euclides da Cunha. A barragem de Salles de Oliveira foi galgada durante sete horas (Ponce 1982) até que o caudal de cheia proveniente da ruptura da barragem de Euclides da Cunha despoletou a formação de uma brecha e consequente ruptura. O tempo de formação da brecha foi aproximadamente de duas horas. De acordo com Singh (1996) o caudal máximo resultante da ruptura da barragem de Euclides da Cunha foi de  $1,01 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este valor é útil para a definição do hidrograma afluente à secção da barragem de Salles Oliveira. A calibração do modelo teve em conta os dados conhecidos acerca do tempo de formação da brecha e do caudal máximo de ruptura.



**Figura 4.** Apresentação de resultados do RoDaB para o caso da simulação numérica da ruptura da barragem de Salles Oliveira, recorrendo a uma abordagem racional

## INCERTEZAS ASSOCIADAS À MODELAÇÃO DA RUPTURA DE BARRAGENS

### Considerações gerais

De acordo com Parry (1996) há três elementos a executar na análise da incerteza de um modelo no âmbito da análise do risco:

- caracterização da incerteza dos elementos do modelo;
- propagação dessas incertezas de forma a obter uma caracterização da incerteza dos resultados do modelo;
- interpretação dos resultados e das incertezas.

O modelo computacional RoDaB, simula a abertura de uma brecha na barragem de enrocamento decorrente do galgamento, baseando-se nos seguintes parâmetros: altura crítica; coeficiente de vazão da brecha; expoente e coeficiente de erosão do fundo; expoente e coeficiente de erosão lateral; altura e largura finais da brecha; largura inicial da brecha. O resultado do modelo computacional adoptado é um hidrograma afluente e, em particular, o caudal de ponta e o seu tempo de ocorrência.

A caracterização das incertezas baseia-se em ensaios experimentais, tornando-se de especial relevância a modelação física levada a cabo, e bibliografia disponível, representando-se a incerteza associada aos parâmetros e variáveis de entrada do modelo através de funções de densidade de probabilidade.

Essas incertezas são propagadas através do modelo com o método de simulação de Monte Carlo, utilizando um método de amostragem estratificado, o Latin Hypercube Sampling (Helton & Davis 2003). Os resultados do método

de simulação de Monte Carlo são a caracterização da incerteza dos resultados do modelo RoDaB, nomeadamente no que respeita ao caudal de ponta e à obtenção de probabilidades de não excedência de caudais.

O método de simulação de Monte Carlo consiste na repetição sistemática de um fenómeno de modelação, atribuindo-se, a cada iteração, diferentes valores aos parâmetros e às variáveis de entrada ("input"), por forma a obter uma caracterização estatística dos resultados, ou seja, o método de simulação de Monte Carlo é um estimador da incerteza. O método de simulação de Monte Carlo compreende três etapas: a geração de números aleatórios, a amostragem e as iterações do método de simulação.

Através deste método foi analisado um caso de estudo (Santos 2004) que compreende uma barragem de enrocamento e uma albufeira com as características definidas na Tabela 2, cujas dimensões têm um factor de escala igual a 50 relativamente à barragem dos ensaios levados a cabo por Franca e Almeida (2002, 2004). A solicitação que desencadeia o galgamento da barragem é um caudal efluente é igual a 700 m<sup>3</sup>/s, encontrando-se a albufeira à cota do nível de pleno armazenamento no instante inicial de cada simulação.

### Caudal de Ponta

O método de simulação de Monte Carlo aplicado a todos os parâmetros e variáveis de entrada permite concluir que o caudal de ponta médio é igual a 4957 m<sup>3</sup>/s, numa amostra com um desvio-padrão igual a 630 m<sup>3</sup>/s e um coeficiente de assimetria igual a 0,217. O intervalo de confiança, com um grau de 95 %, obtido para a média é [4956,3; 4958,8]. O caudal de ponta máximo da amostra é igual a 6814 m<sup>3</sup>/s e o caudal mínimo da amostra é igual a 3325 m<sup>3</sup>/s. Estes valores traduzem a forte incerteza relativamente ao caudal de ponta, que pode também ser verificada no gráfico da Figura 5.

Altura da Barragem [m]	Coroamento		Inclinação do Paramento	
	Comprimento [m]	Largura [m]	Montante [V : H]	Jusante [V : H]
25	100	10	2:3	2:3
Diâmetro Característico dos Blocos de Enrocamento [m]			Área Superficial da Albufeira [km <sup>2</sup> ]	
0,1			0,50	

**Tabela 2.** Caracterização da barragem do caso de estudo

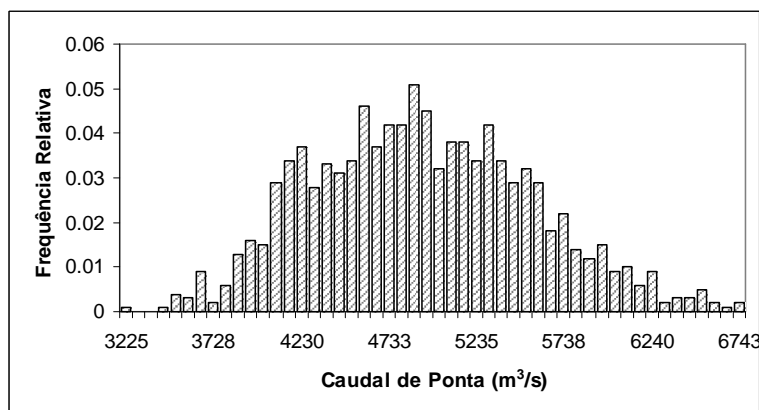


Figura 5. Histograma da amostra de caudais de ponta (Santos 2004)

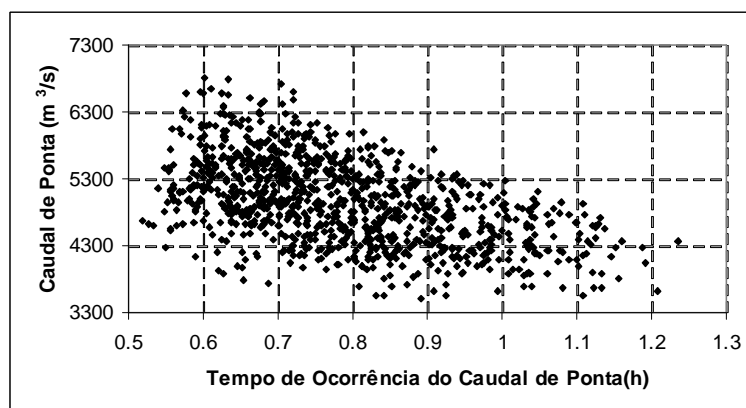


Figura 6. Registo do tempo de ocorrência do caudal de ponta para os caudais de ponta obtidos por simulação (Santos 2004)

Foi conduzida uma simulação da brecha com as melhores estimativas dos parâmetros (abordagem determinística) de forma a comparar com os valores obtidos, verificando-se um caudal de ponta igual a  $4653 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor ligeiramente inferior ao valor médio da amostra de caudais de ponta.

A avaliação do tempo de ocorrência do caudal de ponta, contabilizado desde o início do galgamento, é um aspecto essencial na análise do risco associado à ruptura de uma barragem. Contudo, o tempo de ocorrência do caudal de ponta apresenta uma forte incerteza, registando-se um valor mínimo de 31 minutos e um valor máximo de 74 minutos, podendo verificar-se a dispersão dos resultados obtidos no gráfico da Figura 6.

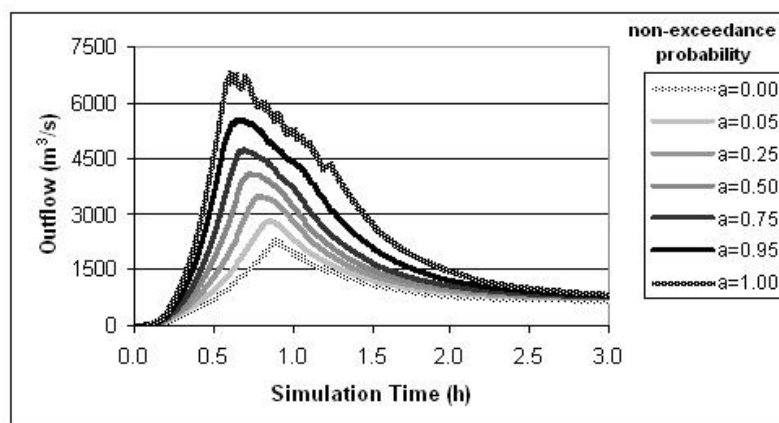
Verifica-se não ser possível estabelecer uma correlação entre o caudal de ponta e o tempo de ocorrência, optando-se por não se proceder ao cálculo da média da amostra. Considera-se que o procedimento mais correcto consiste na

análise dos valores de tempo de ocorrência em função de um caudal de ponta escolhido para análise.

#### Probabilidade de não excedência de caudais em função do tempo

Almeida (2001) introduz o conceito de Tempo de Avanço de Alarme, tratando-se de um dos aspectos a ser considerado na elaboração de planos de emergência. O tempo de ocorrência de caudais que possam colocar em risco populações e bens não é uma medida determinística, não depende apenas da morfologia e ocupação do vale, mas também do estado da incerteza relativamente ao fenómeno de ruptura. Um resultado útil deste tipo de análise de incertezas são as curvas de probabilidade de não excedência de caudais em função do tempo semelhantes às da Figura 7, convém notar que não se tratam de hidrogramas efluentes decorrentes da ruptura da barragem.





**Figura 7.** Curvas de probabilidade que traduzem para cada instante a probabilidade de não excedência do caudal  $P(x \leq Q) = a$

## CONCLUSÕES

No presente artigo apresentam-se resultados de estudos levados a cabo no Centro de Estudos de Hidrossistemas sobre a problemática da ruptura de barragens de aterro e análise de risco associado. Enquadrou-se o conceito de risco na questão da segurança de barragens como resultado das incertezas associadas à modelação do fenómeno. Apresentam-se resultados provenientes de testes laboratoriais em modelos à escala reduzida de barragens em aterro de enrocamento, nomeadamente sobre critérios de ruptura, evolução da brecha e respectivo hidrograma efluente, geometria da brecha e taxas de erosão. É apresentado o modelo numérico de ruptura de barragens RoDaB e são referidos resultados provenientes da experimentação numérica no que diz respeito a análises de sensibilidade a parâmetros da brecha, da albufeira e de taxas de erosão. O modelo RoDaB é aplicado a um caso de estudo cujos resultados são discutidos. Com base no modelo RoDaB é apresentada uma análise de incertezas associadas à modelação da brecha numa barragem fictícia, utilizando o método de propagação de Monte Carlo. Inclui-se a análise do caudal de ponta e da probabilidade de não excedência de caudais em função do tempo.

## AGRADECIMENTOS

Joana Brito dos Santos agradece à Fundação para a Ciência e Tecnologia (POCTI/ECM/2688/95) e Centro de Estudos de Hidrossistemas o apoio financeiro individual. Mário Franca agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o apoio financeiro individual (BPD 21712/2005). O trabalho experimental

foi realizado com apoio o financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (POCTI/ECM/2688/95).

## REFERÊNCIAS

- Almeida A.B., (2000a). La Gestion du Risque Barrage - Vallée du Portugal. La Houille Blanche, Vol. 7/8, 53.
- Almeida A.B., (2000b). Risco de Infra-Estruturas Tecnológicas. Gestão Integrada, Protecção e Percepção. Aplicação a Barragens e Vales a Jusante. 5º Congresso Nacional da Água, Setembro.
- Almeida, A.B., (2001). Emergência e Gestão do Risco. In Quintela, A.C. (coord.), Curso de Exploração e Segurança de Barragens, Lisboa, INAG.
- Almeida, A.B., Matias Ramos, C., Santos, M.A. e Viseu, T. (ed.), (2003). Dam Break Flood Risk Management in Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Atallah T.A., (2002). A review on dams and breach parameters estimation. Relatório de tese Master of Sciences in Hidrosystem engineering, Blacksburg VA, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Exner F.M., (1925). Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen. Academia das Ciências Austríaca, Viena.
- FEMA (1999). Federal guidelines for dam safety: selecting and accommodating Inflow Design Floods for dams. Federal Emergency Management Agency report.

- Franca, M.J. e Almeida, A.B., (2002). Experimental tests on rockfill dam breaching process. IAHR - International Symposium on Hydraulic and Hydrological Aspects of Reliability and Safety Assessment of Hydraulic Structures, St. Petersburg, 29–31 Maio 2002.
- Franca, M.J. e Almeida, A.B., (2004). A Computational Model of Rockfill Dam Breaching Caused by Overtopping (RO-DaB). *Journal of Hydraulic Research*, 42(2), 197–206.
- Franca, M.J., Braunschweig, F. e Almeida A.B., (2004). RODAB: um novo modelo de ruptura de barragens baseado em resultados experimentais. 7º Congresso da Água, Lisboa, Março 2004.
- Franca, M.J., (2002). Caracterização e modelação numérica e experimental da ruptura provocada por galgamento de barragens de enrocamento. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Froehlich D.C., (1987). Embankment-Dam Breach Parameters. *Proceedings of National Conference on Hydraulic Engineering - ASCE*, Nova Iorque.
- Helton C.J. e Davis F.J., (2003). Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems. *J. Reliability Engineering & System Safety*, 81(1), 23–69.
- Johnson F.A. e Illes P., (1976). A Classification of Dam Failures. *Water Power and Dam Construction*, Vol. 28(12), 43–45.
- Kreuzer, H. (ed.) (2000). The Use of Risk Analysis to Support Dam Safety Decisions and Management. Question 76. 20th ICOLD Congress, Beijing.
- Parry, G.W., (1996). The characterization of uncertainty in Probabilistic Risk Assessments of complex systems. *J. Reliability Engineering & System Safety*, 54 (2-3), 119–126.
- Ponce, V.M., (1982). Documented cases of earth dam breaches. SDUS - Civil Eng. Series No. 82149, San Diego State University, San Diego.
- RSB (1990). Regulamento de segurança de barragens. Decreto-Lei n.º 11/90 de 6 de Janeiro.
- Santos J.A.B., (2004). Incertezas na análise do risco. Trabalho de fim de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Serafim J.L., (1981). Safety of Dams Judged from Failures. *Water Power and Dams Construction*, Dezembro.
- Singh V.P., (1996). *Dam Breaching Modeling Technology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Wahl T.L., (1997). Predicting Embankment Dam Breach Parameters - A Needs Assessment. *Proceedings of Energy and Water: Sustainable Development*, São Francisco, Agosto 1997.