

MODELAÇÃO DO HIDROGRAMA DE CHEIA INDUZIDO PELA ROTURA DO DIQUE VAN COC NO RIO VERMELHO

Maria Teresa VISEU

Eng^a Civil, PhD, Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101; 1700 LISBOA,
tviseu@lnec.pt

Sílvia AMARAL

Eng^a Civil, Bolseira de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101; 1700 LISBOA,
samaral@lnec.pt

Paula ANTÃO DA SILVA

Eng^a do Ambiente
paula.antaosilva@gmail.com

RESUMO

É evidente a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de previsão dos impactos de inundações em leitos de cheia decorrentes da rotura de barragens ou de diques de aterro. Com efeito, a eventual rotura deste tipo de estruturas pode traduzir-se na ocorrência de danos elevados e na perda de vidas humanas nas zonas a jusante. A simulação de cheias induzidas obriga à modelação de dois processos distintos: o processo de formação da cheia induzida e o processo da sua propagação.

Desenvolveu-se um modelo de simulação simplificado para o processo de formação de cheias induzidas pela rotura de barragens ou de diques de aterro – modelo DYBREACH. A modelação do hidrograma efluente, resultante da rotura de aterros, é efectuada, neste modelo, por recurso à simulação prévia da evolução da brecha na secção do aterro em rotura. De forma a completar a modelação das cheias induzidas pela rotura de barragens ou diques de aterro, os hidrogramas efluentes resultantes da aplicação do modelo DYBREACH devem ser utilizados como condições de fronteira de montante em modelos de simulação do processo de propagação de cheias induzidas.

A modelação do processo de formação de cheias induzidas é efectuada, no modelo DYBREACH, recorrendo a duas abordagens diferentes: i) modelo paramétrico e ii) modelo baseado num método físico. A primeira abordagem requer a definição da geometria da brecha (largura e forma final) e do tempo de rotura por parte do modelador. Na segunda abordagem o processo de evolução da brecha baseia-se numa equação de erosão.

Neste trabalho apresenta-se uma descrição detalhada do modelo DYBREACH e analisam-se os resultados da aplicação do mesmo à simulação da rotura do dique Van Coc, situado no rio Vermelho (Vietname), ocorrida em 1986. Estes resultados são, posteriormente, comparados com os obtidos através da utilização do modelo numérico BOSS DAMBRK.

PALAVRAS-CHAVE

Formação da cheia induzida, rotura barragem, rotura dique, brecha, modelo numérico.

1. INTRODUÇÃO

A existência de barragens ou diques a montante de zonas ocupadas por populações ou por actividades económicas coloca riscos acrescidos relativamente à ocorrência de cheias induzidas pela eventual rotura dessas estruturas. A simulação deste tipo de cheias obriga à modelação de dois processos distintos: o processo de formação da onda de inundação ou cheia induzida e o processo da sua propagação.

Para simular o processo de formação da cheia induzida pela rotura de barragens ou diques foi desenvolvido um modelo de simulação simplificado – modelo DYBREACH – que tem a capacidade de modelar a formação da brecha e calcular o hidrograma efluente resultante, na secção da estrutura em rotura (VISEU, 2006). Por forma a completar a modelação deste tipo de cheias, os hidrogramas efluentes resultantes da aplicação do modelo DYBREACH devem ser utilizados como condições de fronteira de montante em modelos de simulação do processo de propagação de cheias induzidas.

Os modelos existentes para simular o processo de formação de cheias induzidas pela rotura de barragens ou diques de aterro podem ser agrupados em três categorias (WAHL, 1998):

1. modelos baseados em equações empíricas de previsão;
2. modelos paramétricos;
3. modelos baseados em métodos físicos.

Os *modelos baseados em equações empíricas de previsão* utilizam expressões que relacionam o caudal máximo efluente da brecha com as características da barragem e/ou da albufeira (geralmente, altura, volume armazenado ou uma variável que compreenda estas duas características). Estas expressões são desenvolvidas com base em casos de estudo, essencialmente derivados de roturas históricas, e apenas determinam o caudal máximo efluente, ou seja, não simulam a evolução temporal da brecha e, conseqüentemente, não definem um hidrograma efluente da mesma. Note-se que estas relações de regressão apresentam, geralmente, coeficientes de correlação baixos devido à escassez de informação de base.

Nos modelos paramétricos, o modelador define a geometria da brecha (largura e forma final) e o tempo de rotura, utilizando valores que resultam do tratamento estatístico da informação de roturas históricas (protótipos), de resultados experimentais (modelos físicos) ou recorrendo a expressões empíricas para aferir as características da brecha a adoptar. Estes modelos simulam a evolução morfológica da brecha em função com o tempo e calculando o hidrograma efluente. O uso de modelos paramétricos para simular o hidrograma efluente de barragens ou diques de aterro em rotura justifica-se, por um lado, pela falta de informação fenomenológica detalhada sobre o processo de formação e evolução de brechas, nomeadamente, no que respeita aos fenómenos hidrodinâmicos e geotécnicos envolvidos e, por outro, pela complexidade de definir um modelo numérico com capacidade de caracterizar: i) os episódios de rotura geotécnica que ocorrem durante a evolução da brecha e ii) a interacção entre a erosão hidrodinâmica e a rotura geotécnica (Wahl 2004). Note-se que está actualmente a ser desenvolvido em Portugal um modelo numérico de simulação da brecha com capacidade de caracterizar os dois fenómenos acima mencionados, no âmbito do projecto "*Modeling flood hazards and morphological impacts of levee breach and dam failure*" (<http://www.ce.sc.edu/centersandprograms/pire/index.html>).

Relembra-se que as barragens e os diques de aterro apresentam um modo de rotura que se aproxima do gradual, no qual as dimensões da brecha crescem com o tempo, pelo que se tornou bastante popular adoptar a hipótese simplificativa de assumir roturas lineares (i.e. um aumento linear das dimensões da brecha no tempo, entre dois estados especificados da brecha). Esta hipótese provou ser capaz de produzir, na rotura de aterros, hidrogramas de caudais efluentes realistas.

Os *modelos baseados em métodos físicos* simulam a evolução da brecha e calculam os respectivos hidrogramas efluentes, utilizando modelos de erosão baseados no comportamento físico do sistema em rotura, ou seja, em princípios de hidráulica, de transporte sólido e de mecânica dos solos. Estes modelos são, usualmente, desenvolvidos acoplando as equações do regime variável às equações de erosão e de transporte sólido.

2. MODELO DYBREACH

2.1. Introdução

A modelação do processo de formação e evolução das brechas é efectuada, no modelo DYBREACH, por recurso a duas abordagens diferentes: i) modelo paramétrico e ii) modelo baseado num método físico. Tal como já foi referido, a primeira abordagem requer o conhecimento das características da brecha (geometria e tempo de rotura), enquanto que, na segunda abordagem, a evolução morfológica da brecha é baseada numa equação de erosão.

O modelo DYBREACH fornece séries temporais de dados associados às seguintes variáveis: i) caudal efluente pela brecha (Q_{bre}); ii) cota da soleira inferior da brecha (Z_{ibre}); e iii) largura da brecha (B_{ibre}). Estes dados são apresentados num ficheiro ASCII e podem ser exportados e editados numa folha de cálculo de utilização comum do tipo *MsExcel*.

2.2. Modelo paramétrico

Na opção do modelo paramétrico do modelo DYBREACH, ambas as variáveis, cota da base e largura da brecha, são estipuladas em função do tempo de rotura t_{rot} . A cota da base da brecha num dado instante i , $Z_{ibre}(i)$, varia de acordo com as seguintes expressões (FREAD, 1984 e SINGH, 1996):

$$\begin{cases} Z_{ibre}(i) = Z_{barr} - H_{bre} \frac{t_{rot}(i)}{t_{rot}} & \text{se } 0 < t_{rot}(i) < t_{rot} \\ Z_{ibre}(i) = Z_{ibre} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

onde:

Z_{barr} - cota do coroamento da barragem;

H_{bre} - altura da brecha;

Z_{ibre} - cota final da base da brecha.

A largura da brecha varia de acordo com as expressões:

$$\begin{cases} B_{ibre}(i) = B_{ibre} \frac{t_{rot}(i)}{t_{rot}} & \text{se } 0 < t_{rot}(i) < t_{rot} \\ B_{ibre}(i) = B_{ibre} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

onde:

B_{ibre} - largura *final* da base da brecha;

$B_{ibre}(i)$ - largura da *base* da brecha num dado instante i .

2.3. Modelo baseado num método físico

Na opção do modelo baseado num método físico do modelo DYBREACH, a erosão do material da barragem é calculada utilizando a fórmula de caudal sólido de Meyer-Peter e Müller que considera as variáveis tensão tangencial de arrastamento provocada pelo escoamento (τ) e tensão tangencial crítica de arrastamento (τ_c). O caudal sólido por metro de largura do canal formado pela brecha, expresso em $m^3/s/m$, é obtido pela seguinte expressão:

$$q_s = \frac{8\sqrt{g}}{\gamma_w^{0,5} \gamma'} (\tau - \tau_c)^{1,5} \quad (3)$$

onde:

γ_w - peso volúmico da água;

γ' - peso volúmico submerso do material da barragem $\gamma' = \gamma_{sed} - \gamma_w$;

γ_{sed} - peso volúmico do material da barragem.

A tensão tangencial crítica de arrastamento junto ao fundo, τ_c , provocada pelo escoamento, é dada pela expressão:

$$\tau_c = 0,047 \gamma' D_{50} \quad (4)$$

onde D_{50} é o diâmetro mediano das partículas do material da barragem, em m.

A tensão tangencial de arrastamento provocada pelo escoamento, τ , é igual a:

$$\tau = \gamma_w R_{bre} J_{bre} \quad (5)$$

onde R_{bre} é o raio hidráulico da secção de escoamento da brecha e J_{bre} é a perda de carga unitária do escoamento no canal aberto pela brecha no corpo da barragem, que se calcula recorrendo à fórmula de Chézy:

$$J_{bre} = \frac{U_{bre}^2}{C^2 R_{bre}} \quad (6)$$

Na equação 6, U_{bre} é a velocidade do escoamento através da brecha de rotura e C é o factor de Chézy, cujo cálculo é realizado com base no diâmetro médio dos sedimentos que compõem o material da barragem, D_{50} :

$$C = 7,66 \left(\frac{R_{bre}}{D_{50}} \right)^{1/6} \quad (7)$$

Em suma, a equação 5 pode ser escrita na seguinte forma:

$$\tau = \gamma_w R_{bre} \frac{U_{bre}^2}{C^2 R_{bre}} = \gamma_w \frac{U_{bre}^2}{C^2} = \gamma_w \frac{U_{bre}^2}{\left(7,66 \left(\frac{R_{bre}}{D_{50}} \right)^{1/6} \right)^2} \quad (8)$$

O caudal sólido total é calculado por:

$$Q_s = P_{bre} \times q_s \quad (9)$$

onde P_{bre} é o perímetro molhado da brecha.

A variação da altura da brecha, entre dois instantes de cálculo, é dada pela expressão seguinte:

$$\Delta H'_{bre} = \Delta t \frac{Q_s}{P_{bre} L_{bre} (1-p)} \quad (10)$$

Na expressão 10, p é a porosidade e L_{bre} é o comprimento total do canal aberto pela brecha no corpo da barragem e é traduzido pela expressão seguinte:

$$L_{bre} = L_{barr} + H_{bre} (z_{down} + z_{up}) \quad (11)$$

onde:

L_{barr} - largura do coroamento;

z_{down} e z_{up} - inclinação dos taludes da barragem, dadas pelo ratio 1 (vertical): z (horizontal).

2.4. Algoritmo de cálculo

Modelar a evolução morfológica de uma brecha num aterro em rotura é um processo iterativo, já que o escoamento através da brecha se relaciona com a altura e largura da mesma, características estas que dependem da capacidade de transporte sólido através da brecha que é, por sua vez, função das dimensões da brecha e das características do próprio escoamento (nomeadamente, da velocidade).

Foi desenvolvido um algoritmo iterativo para modelar a evolução morfológica de brechas em aterros, tendo em consideração a interdependência do escoamento através da brecha com o transporte sólido e com as características da brecha. No caso da abordagem do modelo baseado num método físico apenas se simulam brechas rectangulares. O modelo DYBREACH assume que, na entrada do canal formado pela brecha, ocorre o regime crítico, i.e., a altura do escoamento é igual a:

$$h_{bre}(i) = 2/3 (Z_{esc}(i) - Z_{ibre}(i)) \quad (12)$$

O algoritmo iterativo segue os seguintes passos (VISEU, 2006):

1. Características da brecha:

- 1.1. arbitrar uma primeira estimativa para a variação da altura da brecha num dado instante de cálculo ΔH_{bre} ;
- 1.2. calcular a altura da brecha através de $H_{bre}(i) = H_{bre}(i-1) + \Delta H_{bre}$;
- 1.3. calcular a cota da base da brecha através de $Z_{ibre}(i) = Z_{barr} - H_{bre}(i)$;
- 1.4. calcular a largura da brecha, assumindo a condição: $B_{bre}(i) = 2 \times h_{bre}(i)$;
- 1.5. calcular as características da brecha: área da brecha $A_{bre}(i) = B_{bre}(i) \times H_{bre}(i)$; perímetro molhado $P_{bre}(i) = B_{bre}(i) + 2H_{bre}(i)$ e raio hidráulico $R_{bre}(i) = A_{bre}(i)/P_{bre}(i)$.

2. Escoamento através da brecha:

O caudal escoado através da brecha é calculado na hipótese deste se comportar como o caudal escoado através de um descarregador de soleira espessa:

$$Q_{bre}(i) = C_1 (Z_{esc}(i) - Z_{ibre}(i))^{1,5} \quad (13)$$

C_1 é o coeficiente de vazão na brecha, tendo sido considerado os valores para descarregadores laterais de parede espessa propostos por (SWAMEE, 1988). A velocidade na secção da brecha vem igual a: $U_{bre} = Q_{bre}/A_{bre}$.

3. Erosão:

O cálculo do caudal sólido e da nova estimativa da variação da altura da brecha $\Delta H'_{bre}$ é realizado pela aplicação sucessiva das equações 8, 3, 9 e 10.

4. Condição de paragem do algoritmo iterativo:

O cálculo iterativo termina quando se verifica a condição $|\Delta H_{bre} - H'_{bre}| < E$, sendo E o valor do erro da solução (o valor deste erro é estipulado pelo modelador no início da simulação).

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Características gerais da região

O rio Vermelho é um rio internacional: nasce na China e estende-se ao longo de 1 150 km, atravessando o Vietname e desaguando no Golfo de Tonkin (Figura 1 - a) e b)). A grande quantidade de óxido de ferro que transporta, concedem-lhe uma cor avermelhada, donde provém o respectivo nome (Figura 1 - c)). A bacia hidrográfica correspondente, que abrange também território no Laos, cobre uma área total de 169 000 km², dos quais 86 660 km² (51% da área total) se encontram em território Vietnamita (VISEU e ANTÃO da SILVA, 2003).

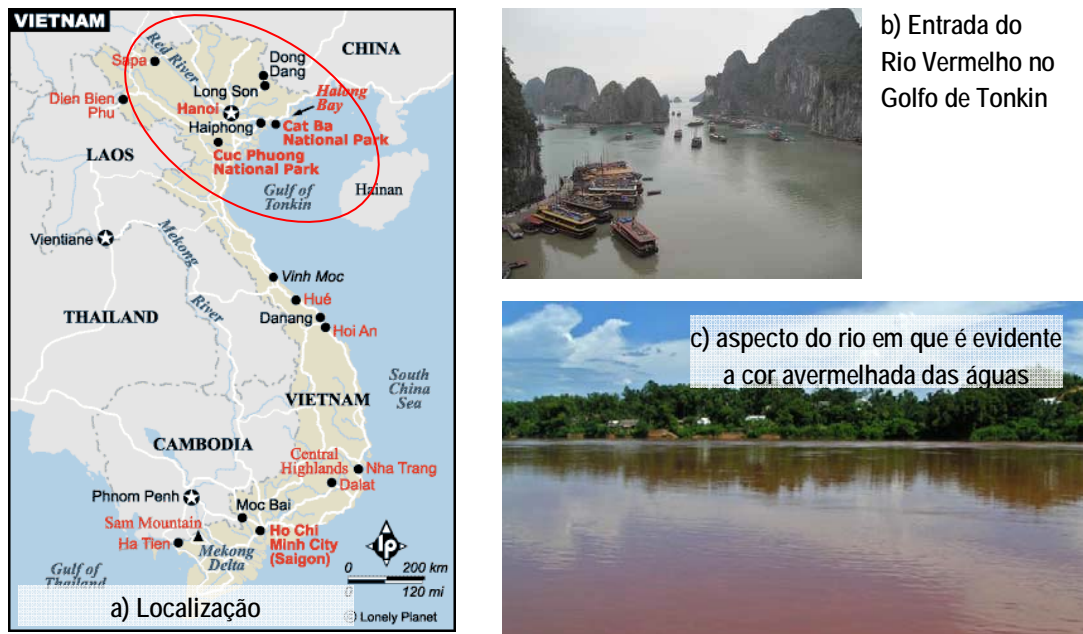


Figura 1 – Rio Vermelho. Localização e aspectos gerais

O delta do rio Vermelho insere-se numa região com cerca de $1,5 \times 10^6$ ha (4,5 % da área do país), a que correspondem cerca de 120 km de extensão e 140 km de largura, e tem uma população de, aproximadamente, 18×10^6 habitantes (2,7 % do total da população), pertencentes a nove das 61 províncias que constituem o Vietname, o que o torna uma das áreas rurais mais densamente povoadas a nível mundial, com cerca de 1 000 hab/km² (HANSSON e EKENBERG, 2002).

Esta região (Haiphong) corresponde ao centro económico do norte do Vietname, caracterizado por uma actividade agrícola intensa (responsável por metade da produção de arroz do país). Como praticamente toda a região do delta se localiza a menos de 3 m acima do nível médio do mar, esta é uma região frequentemente sujeita a grandes inundações; existem locais onde o nível de máxima cheia no rio ultrapassou em mais de 14 m o nível dos terrenos circundantes. Desta forma, esta região é protegida por uma extensa rede de infra-estruturas de protecção de cheias (cerca de 78 % da área cultivada), nomeadamente diques (Figura 2), construídos ao longo de muitos quilómetros de canais de irrigação (FONTENELLE, 2001).

O Vietname tem cerca de 5 000 km de diques fluviais e 3 000 km de diques costeiros e estuarinos. No delta do rio Vermelho, o sistema tem 3 000 km de diques fluviais e 1 500 km de diques costeiros que protegem, das cheias, os centros urbanos e as zonas com elevado interesse económico. O sistema é constituído, em praticamente toda a sua extensão, por duas séries de diques com uma largura média aproximada de 3 m e cerca de 6 - 8 m de altura média. Os diques que protegem a cidade de Hanoi têm uma altura aproximada de 15 m, constituindo cerca de 20 % de toda a extensão de diques fluviais existentes no Vietname (Figura 2).



Figura 2 – Dique de protecção na cidade de Hanoi

O sistema de diques é muito antigo, tendo a maioria sido construída à mão, com materiais locais pouco adequados e assentes em aluviões antigos, dos quais se desconheciam as propriedades geotécnicas. Como os materiais que constituem os diques não foram convenientemente escolhidos ou tratados, ocorrem frequentemente roturas. Por outro lado, em muitos diques, a secção transversal não respeita os requisitos adequados (no que respeita a inclinações dos taludes e à largura do coroamento) e a maior parte das 300 comportas que existem sob os diques estão envelhecidas e degradadas. Frequentemente, durante as cheias, estas passagens hidráulicas são tornadas inoperacionais para garantir a segurança dos diques. A agravar a situação, a monitorização dos diques é baseada em inspecções visuais, não permitindo detectar anomalias no seu corpo ou nas respectivas fundações. A manutenção deste sistema de protecção contra cheias, extenso e envelhecido, torna-se cada vez mais onerosa.

Em resumo, verifica-se que o vale do rio Vermelho é caracterizado por uma elevadíssima ocupação humana (que continua em crescimento) e por uma prática intensiva de agricultura, envolvendo ainda a existência de infra-estruturas hidráulicas de grande dimensão, sistemas de bombagem para drenagem de grandes volumes de água e um sistema de diques de protecção marginal ao longo de centenas de quilómetros (Figura 3). A região possui, também, características naturais particularmente adversas no que respeita à gestão de cheias, nomeadamente, a existência de precipitações intensas de longa duração, a formação de tufões. A elevada extensão das áreas localizadas a cotas baixas e o estado de degradação do extenso sistema de diques completam um cenário de elevada vulnerabilidade às cheias.



Figura 3 – Delta do rio Vermelho. Ilustração da elevada ocupação humana e da intensa prática agrícola

3.2. Características gerais do dique Van Coc

O dique Van Coc localiza-se na margem direita do rio Vermelho, a noroeste da capital vietnamita, a cidade de Hanoi. O seu comprimento total é de 15,6 km, estendendo-se entre a comunidade de Cam Dinh (km 0,0) e a estrada de Tien Tan (km 15,6) (Figura 2). O dique Van Coc tem duas funções importantes:

- prevenção de cheias e protecção de 4 320 ha de áreas residenciais e agrícolas, envolvendo 11 comunidades;
- derivação de caudais de cheia do rio Vermelho para um rio secundário, o rio Day, de forma a minimizar as cheias na capital de Hanoi.

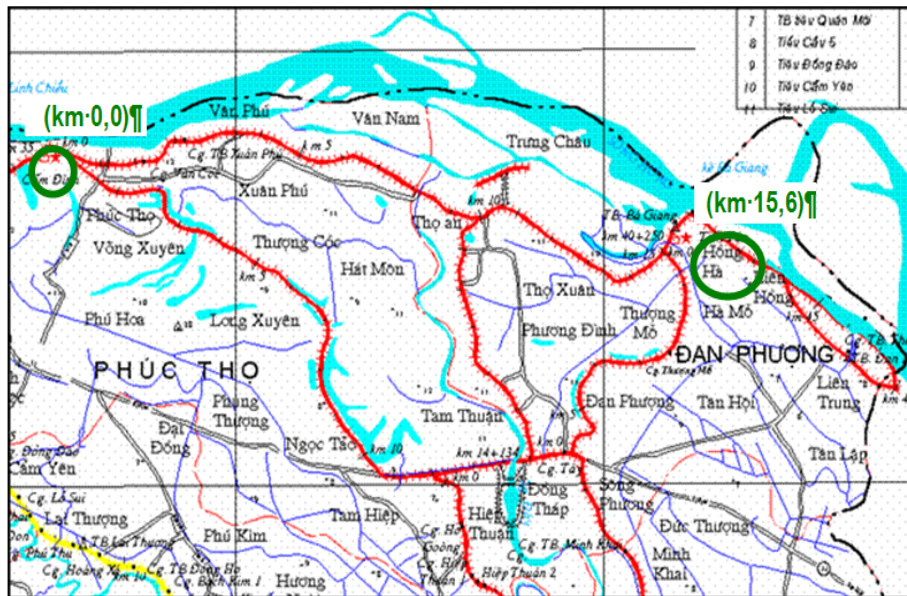


Figura 4 – Localização do dique Van Coc

O dique Van Coc é uma estrutura de aterro homogénea que data de 1965, apresentando materiais com diâmetro médio, D_{50} , de 1 mm e peso volumico de $26,4 \times 10^3 \text{ N/m}^3$. Outras características relevantes do dique Van Coc são (VISEU, 2005):

- cota do coroamento: (+16,50);
- largura do coroamento: 6,0 m;
- altura do aterro: 6,5 m;
- inclinação do paramento de montante: 1V:2H;
- inclinação do paramento de jusante: 1V:3H.

3.3. Rotura do dique Van Coc em 1986

Na sequência de um longo período de operação, o dique Van Coc apresentava, em meados da década de oitenta do século passado, sinais evidentes de degradação, devido a impactos naturais e humanos e ainda ao facto dos fundos necessários à sua manutenção serem limitados. Em 1986, na sequência de cheias significativas no rio Vermelho, o dique Van Coc colapsou ao km 9,3 (Figura 5).



Figura 5 – Dique Van Coc em rotura

O processo de formação e evolução da brecha foi, na altura, registado pelo *Department for Dyke Management, Flood and Storm Control* (DDMF¹), tendo-se concluído que a rotura ocorreu devido ao galgamento do dique, em consequência da cheia no rio Vermelho. Da descrição que consta em VISEU, 2005, retira-se a seguinte informação:

- a brecha final tinha geometria rectangular e largura de 50 m;
- o tempo total de rotura foi de 10 horas de duração.

O DDMF forneceu os hidrogramas de cheia e do nível de água que ocorreram na estação hidrológica de Son-Tay (localizada no rio Vermelho, perto da secção da rotura do dique de Van Coc) durante a cheia que deu origem ao acidente (Figura 6). De realçar que, durante esta cheia, os valores do caudal de ponta no rio Vermelho variaram entre 12 370 m³/s e 36 570 m³/s e os níveis máximos de água apresentaram variações entre 11,66 m e 16,72 m. A este último nível corresponde o galgamento do dique de Van Coc por uma lâmina de água de 0,22 m.

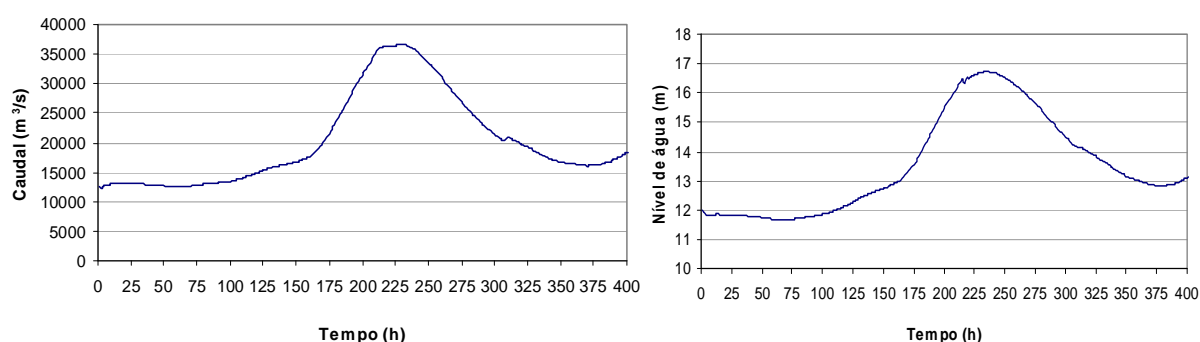


Figura 6 – Hidrogramas registados na estação hidrológica de Son-Tay durante a cheia de 1986

3.4. Resultados obtidos com o modelo DYBREACH

A validação dos resultados de um modelo numérico é usualmente realizada pela comparação dos resultados obtidos pelo modelo em processo de validação com os resultados obtidos por modelos numéricos disponíveis e já testados. No que respeita à última alternativa foi possível, no âmbito deste trabalho, utilizar o modelo comercial BOSS DAMBRK.

Assim, o teste à validade do modelo DYBREACH baseou-se na simulação da rotura do dique de Van Coc, que ocorreu no ano de 1986, com ambos os modelos numéricos, DYBREACH e DAMBRK, comparando-se, neste caso, os hidrogramas efluentes do dique em rotura obtidos por ambos os modelos.

Os hidrogramas efluentes do dique em rotura para as três opções disponíveis (modelos DAMBRK e DYBREACH nas opções do modelo paramétrico (DYBREACH/MP) e do modelo baseado num método físico (DYBREACH/MF)) podem ser graficamente comparados. Assim, na Figura 7, apresentam-se os hidrogramas efluentes para as três simulações efectuadas, verificando-se que, de uma forma geral, o andamento dos hidrogramas é semelhante.

¹ O DDMFC é a instituição responsável no Vietname pela construção e manutenção de todo o sistema de diques.

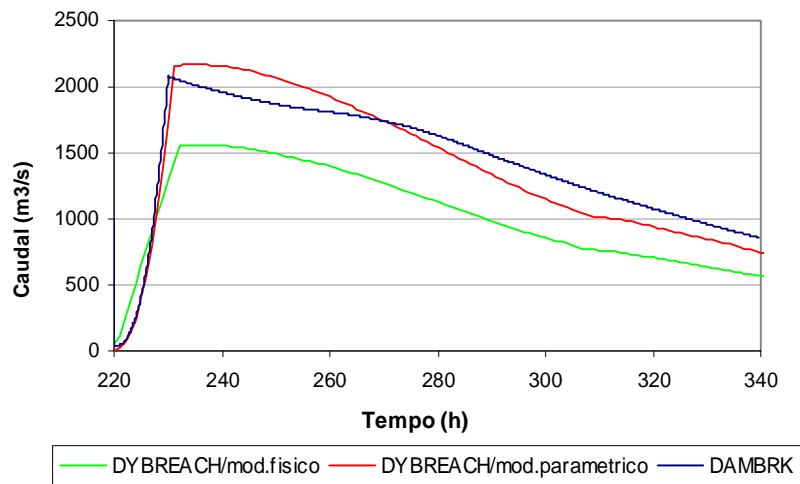


Figura 7 – Rotura do dique Van Coc. Comparação entre os hidrogramas efluentes da secção da brecha dos modelos DYBREACH e DAMBRK

Com o modelo DYBREACH baseado num método físico (DYBREACH/MF) ocorre um valor máximo de 1 563,7 m³/s no instante $t = 233$ h (14 horas após o início da rotura). No mesmo instante, o caudal de ponta correspondente à aplicação do mesmo modelo, mas na opção de método paramétrico (DYBREACH/MP), é igual a 2 168,1 m³/s. Depois deste instante, os valores do caudal decrescem em ambas as opções de modelação do processo de formação e evolução da brecha, essencialmente devido à diminuição da cheia no rio Vermelho.

Verifica-se que existem, no modelo DYBREACH, diferenças assinaláveis nos resultados obtidos com as duas opções de modelação (DYBREACH/MF e DYBREACH/MP), desenvolvendo-se a erosão com a opção de modelo paramétrico mais rapidamente do que com a opção de modelo baseado num método físico, nos instantes iniciais da rotura. As diferenças esbatem-se à medida que a brecha caminha para a sua plena formação. Estas diferenças são consequência do facto da modelação da brecha ser completamente distinta nas duas opções do modelo numérico.

Também da análise da Figura 7 se conclui que os valores do caudal máximo efluente obtidos através dos modelos DAMBRK e DYBREACH/MP são muito semelhantes (2 080,0 m³/s no primeiro e 2 168,1 m³/s no segundo), com uma diferença de 4,2 %. Maior discrepância ocorre para o caudal máximo efluente calculado com o modelo DYBREACH/MF (1 563,7 m³/s), com cerca de 24,8 % de diferença em relação ao caudal correspondente na simulação com o modelo DAMBRK. No que respeita ao instante de ocorrência do caudal máximo efluente, os valores obtidos são praticamente idênticos para as três opções em comparação, assistindo-se a um ligeiro atraso no caso da simulação efectuada com o modelo DYBREACH/MF, que resulta do facto de, neste último, a brecha se desenvolver mais lentamente, nos primeiros instantes.

A semelhança obtida entre os resultados das simulações efectuadas com os modelos DAMBRK e DYBREACH/MP deve-se ao facto de ambos os modelos serem conceptualmente idênticos, por considerarem uma evolução linear da largura e altura da brecha ao longo de igual tempo total de rotura.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho é descrito um modelo de simulação simplificado do processo de formação da cheia induzida pela rotura de barragens e de diques de aterro – modelo DYBREACH – e são analisados os resultados da aplicação do mesmo à simulação da rotura do dique Van Coc, situado no rio Vermelho (Vietname), na sequência da cheia ocorrida em 1986. O modelo DYBREACH faz uso de duas abordagens diferentes para modelar o processo de formação e a evolução da brecha: i) modelo

paramétrico e ii) modelo baseado num método físico. A primeira abordagem requer a definição da geometria da brecha (largura e forma final) e do tempo de rotura por parte do modelador. Na segunda abordagem, o processo de evolução da brecha baseia-se numa equação de erosão.

Verificou-se que existem, no modelo DYBREACH, diferenças assinaláveis nos resultados obtidos com as duas opções de modelação do processo de formação e evolução da brecha (DYBREACH/MF e DYBREACH/MP), desenvolvendo-se a erosão com a opção de modelo paramétrico mais rapidamente do que com a opção de modelo baseado num método físico, nos instantes iniciais da rotura. Estas diferenças, que são consequência do facto da modelação da brecha ser completamente distinta nas duas opções do modelo numérico, esbatem-se à medida que a brecha caminha para a sua plena formação.

Verificou-se, ainda, que os valores de caudal máximo efluente decorrentes das simulações da rotura do dique Van Coc com os modelos DAMBRK e DYBREACH/MP são muito semelhantes. Este facto ocorre por ambos os modelos serem conceptualmente idênticos, ou seja, ambos considerarem uma evolução linear da largura e altura da brecha ao longo de igual tempo total de rotura.

O modelo DYBREACH forneceu resultados que, do ponto de vista qualitativo, se afiguram razoáveis, uma vez que a simulação do caso de estudo aqui apresentado (rotura do dique Van Coc) com um modelo já amplamente testado, como é o modelo DAMBRK, permitiu validar os resultados obtidos com o modelo DYBREACH, indiciando que este último é uma ferramenta adequada à análise do processo de formação de cheias induzidas pela rotura de diques ou de barragens de aterro.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho apresenta parte da investigação conduzida no âmbito do Projecto FLOCODS "*Decision Support System for Ecosystem Upgrading and Flood Control of a Sustainable Development in the Red River System (China, Vietnam)*", suportado pelo V Programa Quadro da Comunidade Europeia.

As autoras agradecem ao Prof. Kim Dan Nguyen da Universidade de Caen, coordenador do projecto FLOCODS. Este agradecimento estende-se ao Prof. Nguyen Van Diep, do *Institute of Mechanics* e ao Eng. Pham Van Tham, Director do *Department of Dyke Management, Flood and Storm Control*, pela partilha de informação referente ao sistema de diques do rio Vermelho.

BIBLIOGRAFIA

FONTENELLE, J.P. (2001) – *Vietnam Red River Delta irrigation management: an incomplete recognition of local institutional innovation*. Groupe de recherche et d'échanges technologiques, Paris, France (in www.gret.org/ressources).

FREAD, D. L. (1984) – *DAMBRK: The NWS dam break flood forecasting model*. National Weather Service (NWS) report, NOAA, Silver Spring, Maryland.

HANSSON, K.; EKENBERG, L. (2002) – *Flood mitigation strategies for the Red River delta*. Department of computer and systems sciences, Stockholm university, Sweden.

SWAMEE, P.K. (1988) – *Generalized rectangular weir equations*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.114, nº8, January, pp. 945-949.

SINGH, V.P. (1996) – *Dam breach modelling technology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.

WISEU, T.; ANTÃO DA SILVA, P. (2003) – *Modelling embankment failures in the Red River dyke system. Volume I. Dykes and failures. Characterization and state-of-the-art*. Relatório do LNEC 202/03.

WISEU, T. (2005) – *Modelling embankment failures in the Red River dyke system. Volume II. DYBREACH and BIPLAN numerical models. Application to Van Coc dyke and Day dam retention zone*. Relatório do Projecto FLOCODS, LNEC, Maio.

WISEU, T. (2006) – *Segurança dos vales a jusante de barragens. Metodologias para apoio à gestão do risco*. Tese de doutoramento em engenharia civil, IST, Lisboa, Janeiro.

WAHL, T.L. (1998) – *Prediction of embankment dam breach parameters. a literature review and needs assessment*. Dam Safety Research report. Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior, Denver, USA, July.

WAHL, T. L. (2004) - *Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 130, nº 5, pp. 389-397.