

# A Análise do risco associado à rotura da barragem de Fernandilho. Modelação hidrodinâmica da onda de cheia.

Rui M. M. Lança  
Área Dep. Eng. Civil

## 1 - Introdução

As cheias provocadas por roturas de barragens constituem eventos catastróficos que podem conduzir a perdas consideráveis de vidas humanas e de bens materiais. Para melhorar a segurança, em relação a este risco potencial, torna-se necessário avaliar a segurança da população e das estruturas, existentes ou a construir, e estimar a extensão dos danos em caso de acidente.

Neste estudo, após a indicação da legislação em vigor, apresenta-se uma descrição sumária do modelo DamBreak. Descrevem-se as equações básicas que definem o modelo de formação da brecha e que caracterizam o processo de formação da cheia. Também se referem as equações de Saint-Venant, as quais caracterizam o processo de propagação da cheia.

De seguida é feita uma descrição da barragem de Fernandilho, do leito do Barranco da Figueirinha que constitui o canal a jusante da barragem, e da aldeia de Fernandilho que se encontra nas suas margens.

Por fim referem-se e comentam-se os resultados da simulação.

## 2. Legislação

A legislação Portuguesa aborda em três documentos as questões relacionadas com a protecção de vidas e bens a jusante de barragens:

Regulamento de segurança de barragens (**RSB**); Normas de projecto de barragens (**NPB**); Normas de observação e inspecção de barragens (**NOIB**).

O **RSB** prevê o estabelecimento de medidas especiais com vista à protecção de pessoas e bens em caso de acidente, que englobam o cálculo da onda de inundação e a elaboração da carta de riscos (Artigo 42º). No Artigo 44º, o RSB prevê a elaboração do Plano de Emergência e, no Artigo 45º, o estabelecimento dum sistema de aviso e alerta.

As **NPB** determinam que os estudos hidrológicos devem ser completados com "a avaliação das áreas inundáveis e do tempo de propagação das cheias provocadas por cenários de rotura da barragem, recorrendo a modelos hidrodinâmicos adequados" (Artigo 6º) e o estudo de sistemas de aviso e previsão de cheias em tempo real.

As **NOIB**, no plano da observação, prevêem, no Artigo 12º, a definição do sistema de observação e, no Artigo 17º, o esquema de comunicação em caso de detecção de comportamento anómalo (meios emissores, formas de transmissão e ensaios periódicos). Os Artigos 35º, 37º e 39º prevêem o aviso à Autoridade e ao SNPC no caso da

ocorrência de cheias, sismos e de outras ocorrências excepcionais ou circunstâncias anómalas.

De acordo com o artigo 6º das normas de projecto de barragens, apresenta-se neste trabalho o estudo hidrodinâmico com vista à avaliação das áreas inundáveis a jusante num cenário de rotura da barragem de Fernandilho.

## 3. Modelo DamBreak

O modelo DamBreak foi desenvolvido pelo "National Weather Service". Este modelo simula a propagação de uma onda de cheia pelo vale a jusante de uma barragem, onde se forma uma brecha que provoca a destruição parcial ou total desta e que em poucos minutos, coloca no vale a jusante uma parte ou a totalidade do volume de água armazenado na albufeira.

A rotura de barragens pode ser provocada por galgamento, que se deve a um mau dimensionamento do descarregador de superfície, e ocorre quando entra na albufeira um caudal grande originado por uma forte precipitação. A rotura de barragens também pode ser causada por erosão interna, onde se formam caminhos preferenciais na percolação da água no corpo da barragem. Este problema é de especial importância nos encontros e nas interfaces entre o corpo do aterro da barragem e os elementos de betão das estruturas hidráulicas, como a conduta da descarga de fundo por exemplo. Convém referir, que a causa mais frequente dos acidentes é o sub-dimensionamento do descarregador de superfície, problema que ocorre com alguma frequência em pequenas barragens.

O modelo utilizado, simula a rotura da barragem, calcula o hidrograma originado pelo esvaziamento do reservatório e permite a modelação da onda de inundação no vale a jusante da barragem. Na definição da topologia do vale é possível considerar passagens hidráulicas, pontões, pontes, açudes ou mesmo outras barragens.

### 3.1. Limitações do modelo

A modelação da onda de cheia é efectuada considerando o escoamento com superfície livre unidireccional. Isto faz com que as secções transversais sejam consideradas perpendicularmente à direcção da linha de água e que a superfície livre do escoamento seja sempre horizontal nessas mesmas secções. Em vales abertos com áreas inundáveis consideráveis onde o processo de avanço e recessão da inundação é mais demorado, verificam-se diferenças entre a simulação e a realidade. Estudos em que se comparam os resultados de modelos unidireccionais com modelos bidireccionais, verifica-se que nos primeiros a onda de cheia propaga-se com maior velocidade e menor amortecimento. O

que conduz a um cenário mais catastrófico do que realmente se verifica.

Em situações onde ocorre o transporte de grande quantidade de sedimentos devido ao poder erosivo da onda de inundação, ou do deslizamento de encostas, a geometria do vale é alterada. Tal situação não é considerada pelo modelo. Também não é considerada a variação da rugosidade durante o tempo de cálculo.

Para a modelação da brecha é necessário fornecer ao modelo a cota a que a brecha se forma, a sua geometria final e velocidade a que esta se forma. Isto são parâmetros difíceis de determinar e que dos quais só se pode ter uma aproximação muito grosseira.

Por motivos de estabilidade numérica no esquema implícito de resolução das equações de Saint-Venant, a altura do escoamento não pode ser nula no início da simulação, embora possa ter um valor reduzido.

Mudanças de regime de lento para rápido ou vice versa, podem ocorrer no tempo ou no espaço, mas nunca nos dois em simultâneo. Tal situação leva a problemas de convergência numérica.

### 3.1. Propagação da onda de cheia

As equações que descrevem o escoamento com superfície livre gradualmente variado são conhecidas como as equações de Saint-Venant.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot \frac{\partial y}{\partial x} - g \cdot (S_0 - S_f) = 0$$

Estas duas equações diferenciais às derivadas parciais são respectivamente as equações de conservação da massa, e conservação da quantidade de movimento num volume de controlo, constituído por um troço de leito. As variáveis têm os seguintes significados:

- $Q$  caudal (m<sup>3</sup>/s);
- $A$  área da secção transversal do escoamento (m<sup>2</sup>);
- $x$  distância medida segundo a direcção do escoamento (m);
- $t$  tempo (s);
- $g$  aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);
- $y$  profundidade do escoamento (m);
- $S_0$  declive do perfil longitudinal da linha de água (m/m);
- $S_f$  declive da linha de energia (m/m).

A sua resolução é efectuada recorrendo a um esquema implícito no qual é possível introduzir condições de fronteira internas que descrevem o comportamento das estruturas hidráulicas que se encontram no leito.

### 3.3. Formação da Brecha

A brecha é a abertura que se forma na barragem durante a sua destruição. Em barragens de betão a formação da brecha é praticamente instantânea, contudo em barragens de aterro, este processo leva algum tempo, pelo que o modelo considera a brecha como um descarregador de geometria variável, cuja dimensão aumenta devido à erosão provocada pela água.

A formação da brecha pode ocorrer por galgamento, Figura 1, ou por erosão interna, figura 2.

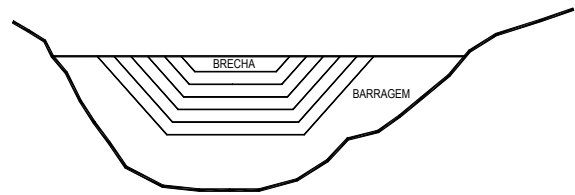


Figura 1 - Possível geometria da brecha numa situação de rotura por galgamento

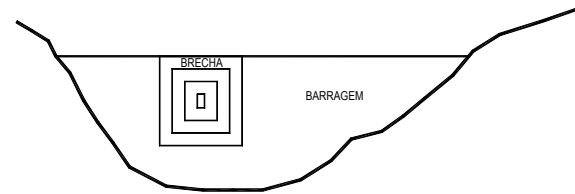


Figura 2 - Possível geometria da brecha numa situação de rotura por erosão interna

## 4. Descrição da barragem

A barragem de Fernandilho localiza-se no Algarve, concelho de Alcoutim (carta militar nº 590), e destina-se essencialmente a rega. É uma barragem de aterro zonado com dreno de chaminé com 21 m de altura. Os solos da Serra Algarvia (litosolos dos climas de regime xérico - Ex) oferecem poucas manchas de empréstimos pelo que o material mais fino é seleccionado para formar um núcleo argiloso pouco permeável que tem por função garantir a estanquidade da barragem. O material de granulometria superior forma os maciços estabilizadores e tem uma função essencialmente estrutural. Na face de jusante do núcleo argiloso, é colocado um dreno que recolhe a água que eventualmente atravesse o núcleo por percolação. Este dreno estende-se pela interface maciço estabilizador de jusante / fundação até ao pé do talude de jusante. De acordo com a classificação unificada o núcleo é formado por uma mistura de solos CL e GC. Os maciços estabilizadores são constituídos por enrocamento xisto-grauvático. O dreno é feito de seixo completamente envolvido por geotextil. Entre o filtro e o núcleo existe um segundo filtro anticontaminante em geotextil.

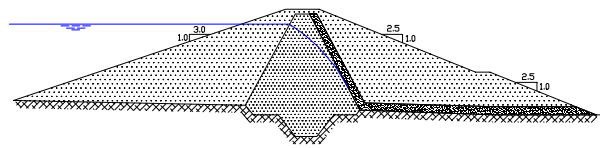


Figura 3 - Perfil transversal da barragem de Fernandilho

## 4. Descrição do vale a jusante

O vale do Barranco da Figueirinha é fracamente povoado. A única povoação existente no vale e que provoca alguns problemas de Protecção Civil é a aldeia de Fernandilho, pertencente ao concelho de Alcoutim (carta militar nº582), com aproximadamente 40 habitantes, a qual se situa 1348 m a jusante da barragem a construir.



Figura 4 - Aldeia de Fernandilho

O vale em estudo é atravessado por estradas em duas secções. A primeira encontra-se a 190 m do corpo da barragem, figura 5, e a segunda a 3097 m, figura 6. As passagens hidráulicas dos pontões têm 3 módulos de 2.89 x 2.80 x 20.00 m (largura x altura x comprimento) separados por pilares parede com 0.25 m de espessura. Os aterros rodoviários sobem cerca de 8 m na primeira passagem e 9.5 m na segunda passagem hidráulica, formando duas "autênticas barragens".



Figura 5 - Passagem hidráulica situada a 190 m do corpo da barragem



Figura 6 - Passagem hidráulica situada a 3097 m do corpo da barragem

O vale é bastante encaixado e praticamente não existem margens de inundação, pelo que o amortecimento da onda de cheia é fraco.



Figura 7 - Aspecto do leito do Barranco da Figueirinha

A única produção do vale é a agricultura que se desenvolve nas poucas áreas em que a topografia e o perfil do solo permitem esta prática.

## 5. Considerações sobre a simulação da rotura

### 5.1. Características da albufeira

A curva cota/volume que traduz a capacidade de armazenamento da albufeira em função da cota da superfície da água, é apresentada na figura 8. No cenário de rotura considerado, a brecha forma-se numa situação de galgamento, quando a cota da superfície da água na albufeira iguala a cota do coroamento (171.1 m).

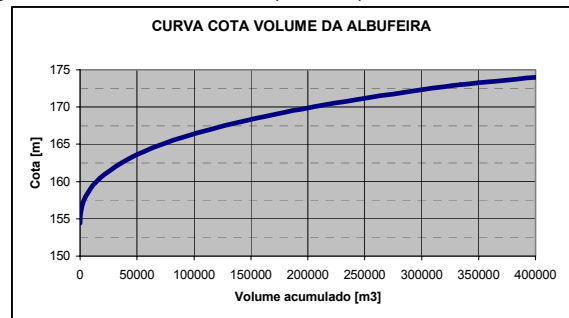


Figura 8 - Curva cota volume da albufeira

### 5.2. Geometria e formação da brecha

Para a modelação da rotura da barragem de Fernandilho, considerou-se uma rotura por galgamento, em que toda a barragem é destruída em 15 minutos. De acordo com estudos efectuados por Froelich, 1987, citado por Viseu, 1996, o tempo de rotura de uma barragem de aterro é dado por:

$$t_{rot} = 0.007 \cdot \left( \frac{V_{bar}}{h_{bar}^2} \right)^{0.50}$$

sendo:

- $t_{rot}$  tempo de rotura da barragem;
- $V_{bar}$  volume de armazenamento da albufeira (m<sup>3</sup>);
- $h_{bar}$  altura da barragem (m).

substituindo para o caso de estudo, vem:

$$t_{rot} = 0.007 \cdot \left( \frac{400000}{20^2} \right)^{0.50} \approx 0.25 \text{ horas} = 15 \text{ min}$$

A geometria final da brecha, para o cenário de rotura total, tem 10 m de base e o declive dos taludes é de 1V:1.5H.

### 5.3. Coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler

Caracterizar a superfície do vale e atribuir os coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler para as secções transversais consideradas não é tarefa fácil, pois estes coeficientes terão que tomar em consideração as micro e macro rugosidades assim como obstáculos existentes.

De acordo com Chow, 1959 o coeficiente de rugosidade de um canal natural pode ser calculado pela seguinte expressão.

$$K_s = \frac{1}{(n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_s}$$

sendo:

- $K_s$  coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler;
- $n_0$  parâmetro função do material do leito do canal;
- $n_1$  parâmetro função do grau de irregularidade;
- $n_2$  parâmetro função da variação da secção transversal;
- $n_3$  parâmetro função do efeito das obstruções;
- $n_4$  parâmetro função da vegetação;
- $n_5$  parâmetro função da meanderização.

De acordo com a bibliografia citada, tem-se, para: fundo de rocha,  $n_0 = 0.025$ ; efeito da irregularidade do canal moderada,  $n_1 = 0.010$ ; variação da geometria da secção transversal do canal alternando frequentemente  $n_2 = 0.010$ ; efeito das obstruções entre pequeno a apreciável,  $n_3 = 0.015$ ; efeito da vegetação médio,  $n_4 = 0.010$ ; efeito da meanderização negligenciável,  $n_5 = 1.000$ , obtém-se:

$$K_s = \frac{1}{(0.025 + 0.010 + 0.010 + 0.015 + 0.010) \cdot 1.000} = 15m^{\frac{1}{3}} \cdot s^{-1}$$

$$K_s = 15m^{\frac{1}{3}} \cdot s^{-1}$$

## 6. Resultados da simulação

Para a análise do risco associado à rotura da barragem de Fernandilho é necessário determinar parâmetros que caracterizam a onda de cheia, tais como: caudal máximo; cota máxima; velocidade máxima; instante de ocorrência do nível máximo; tempo de chegada do início da cheia após a rotura. Tal informação consta nas figuras 9 a 16.

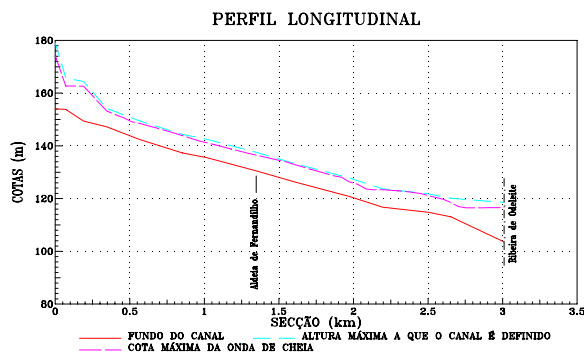


Figura 9 - Perfil longitudinal

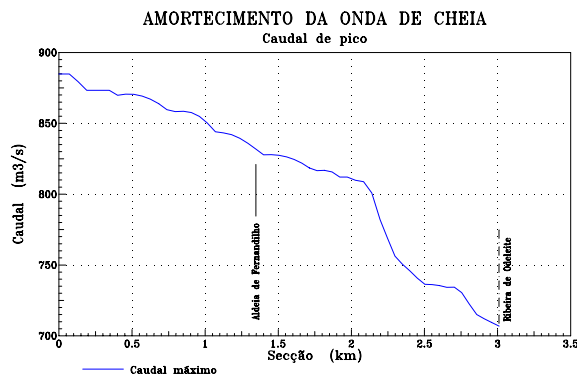


Figura 10 - Amortecimento da onda de cheia

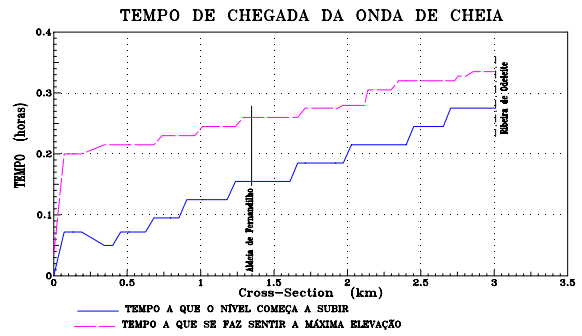


Figura 11 - Tempo de chegada da onda de cheia

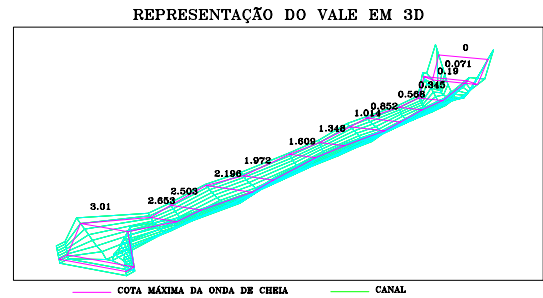


Figura 12 - Representação do vale em 3D

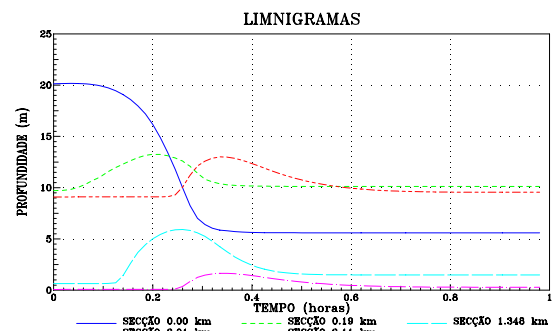


Figura 13 - Limnigramas

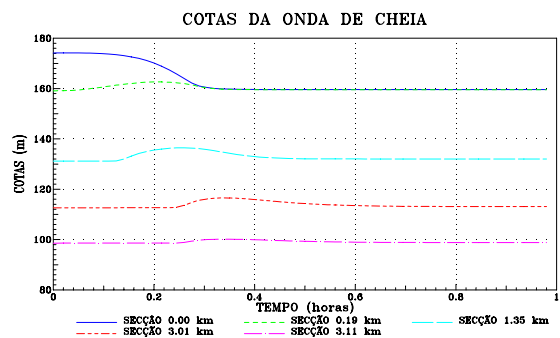


Figura 14 - Cotas da onda de cheia

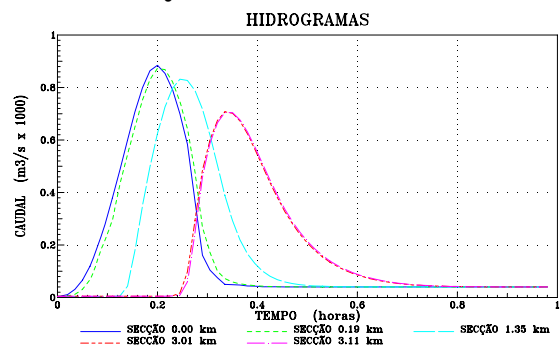


Figura 15 - Hidrogramas

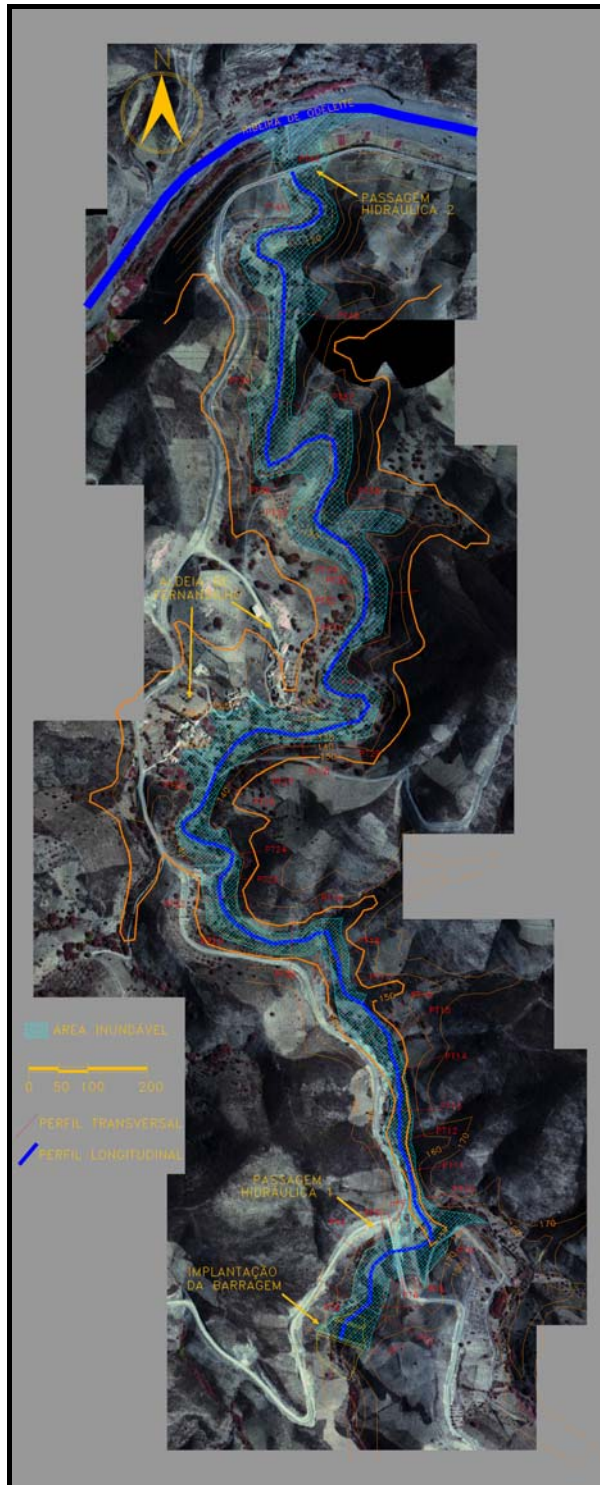


Figura 16 - Carta com a delimitação das áreas inundáveis

## 7. Conclusões

Com base no cenário considerado e nos resultados das simulações efectuadas conclui-se que a eventual rotura da barragem de Fernandilho provoca uma sobrelevação brusca do nível da água no Barranco da Figueirinha. A única povoação existente na margem deste barranco e ponto onde a subida brusca do nível da água pode causar sérios problemas é a aldeia de Fernandilho. Neste local o nível da

água começa a subir 10 minutos após o início da rotura e em 16 minutos é atingido o nível máximo, neste instante é atingida a cota 136.3 m. Os tempos referidos são contados desde o momento em que a brecha se forma, contudo se for considerado a partir do instante em que o caudal máximo é descarregado na barragem até que o caudal máximo é registado em Fernandilho são apenas 2.4 minutos, o que dá uma celeridade média de 9.37 m/s.

Como se pode observar na carta de áreas inundáveis, ver figura 16 a casa da aldeia de Fernandilho situada à cota mais baixa tem o piso à cota 137.05 m, pelo que nenhuma casa é destruída pela inundaçao.

As duas passagens hidráulicas não têm capacidade de vazão para o caudal descarregado no vale, como seria de esperar, pelo que o aterro rodoviário é galgado e as estradas serão cortadas.

As margens de inundaçao são praticamente nulas e as encostas do vale são íngremes, pelo que a fuga de pessoas que se encontram no vale para zonas seguras, é facilitada por a distância a percorrer ser de apenas algumas dezenas de metros.

Do ponto de vista da protecção civil a aldeia de Fernandilho está a salvo e a extensão das áreas submersas é reduzida por o vale ser bastante encaixado, facto que também faz com que a onda seja pouco amortecida.

O Barranco da Figueirinha é um afluente da Ribeira de Odeleite. Esta Ribeira tem um leito bastante largo com cerca de 65 m de largura no local da confluência. A onda de cheia após percorrer 3.11 km no Barranco da Figueirinha tem um caudal de pico de 720 m<sup>3</sup>/s. Este caudal é rapidamente atenuado no leito da Ribeira de Odeleite não causando aí problemas significativos.

## 8. Bibliografia

**Boss International** (1988). "*Boss Dam Break - Hydrodynamic Flood Routing User's Manual*".

**Fread, D. L.; Lewis, J. M.** (1998). "*NWS FLDWAV MODEL*". Hydrologic Research Laboratory, Office of hydrology. National Weather Service.

**Ven-te-Chow** (1959). "*Open Channel Hydraulics*". McGraw-Hill.

**Viseu, Teresa.** (1996). "*Análise do risco associado às roturas das barragens do Funcho e do Arade. Utilização do modelo DamBreak*". Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa - IST.