

ROTURA DA ENSECADREIRA DE ODELOUCA. APLICAÇÃO DE UMA TÉCNICA SIMPLIFICADA DE CÁLCULO DOS HIDROGRAMAS DE CHEIA

Andrea Brito⁽¹⁾; Lurdes Pimenta⁽²⁾; Laura Caldeira⁽³⁾; Teresa Viseu⁽⁴⁾

RESUMO

Hughes et al (2000) propõem a utilização de uma técnica simplificada para cálculo da onda de rotura, visando a identificação e avaliação das consequências no âmbito da realização de análises de riscos por intermédio dos *Diagramas de Localização, Causa e Indicadores das Falhas* (LCI).

Neste trabalho analisam-se os resultados da aplicação desta técnica à ensecadeira de Odelouca e comparam-se com os obtidos através da utilização de um modelo numérico do tipo *dam-break*.

Na sequência de uma breve apresentação do enquadramento em que foi desenvolvido o presente trabalho, faz-se uma descrição sumária do vale e das estruturas e infraestruturas potencialmente interferidas pela rotura da ensecadeira de Odelouca.

Apresentam-se em seguida os resultados da simulação da rotura e propagação da onda de cheia pelo modelo numérico *BOSSDAMBRK*.

Aplica-se a técnica simplificada de cálculo e propagação dos hidrogramas de cheia, procedendo-se a algumas análises de sensibilidade. Comparam-se os resultados obtidos com os da aplicação do modelo numérico *BOSSDAMBRK*, tendo em conta a avaliação das consequências da rotura, e propõe-se a utilização de uma equação alternativa para cálculo do hidrograma efluente resultante da formação da brecha.

Por último, expõem-se algumas conclusões e considerações finais que resultam da aplicação efectuada.

PALAVRAS CHAVE: Onda de rotura, hidrogramas de cheia, análise de riscos.

⁽¹⁾ Bolseira de Iniciação à Investigação Científica do LNEC

⁽²⁾ Bolseira de Doutoramento do LNEC

⁽³⁾ Investigadora Principal do LNEC

⁽⁴⁾ Assistente de Investigação do LNEC

1 - INTRODUÇÃO

O grupo de trabalho de análise de riscos da Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens está presentemente a iniciar algumas aplicações experimentais de análises de riscos a barragens portuguesas.

Na sequência da realização de uma análise de riscos da ensecadeira de Odelouca por intermédio da metodologia baseada nos *Diagramas de Localização, Causa e Indicadores das Falhas* (LCI), considerou-se pertinente, no âmbito da avaliação das consequências, a comparação dos resultados que se obtêm por intermédio da técnica simplificada proposta por Hughes et al (2000) e pela aplicação de modelos numéricos do tipo dam-break.

Os resultados da análise de riscos acima referenciada encontram-se sintetizados numa outra comunicação apresentada ao presente Seminário (Lurdes Pimenta et al, 2005).

A ensecadeira de Odelouca foi concebida como uma estrutura provisória que seria posteriormente integrada nos aterros definitivos da barragem. De acordo com o preconizado no projecto (COBA, 2000), os aterros do corpo da barragem deveriam iniciar-se imediatamente após serem concluídos os aterros da ensecadeira e atingiriam o seu coroamento 9 meses depois. No entanto, em virtude da suspensão da empreitada da barragem no final de 2003, o período de vida útil da ensecadeira foi substancialmente alargado.

Enquanto obra isolada, a ensecadeira de Odelouca é uma grande barragem, de aterro zonado, com 36 m de altura máxima e 19 hm³ de capacidade de armazenamento à cota do coroamento. A obra dispõe de órgãos hidráulicos que permitem a evacuação de uma cheia com um período de retorno de 50 anos e uma folga de 0,8 m.

2 – VALE A JUSANTE DA ENSECADEIRA DE ODELOUCA

A ensecadeira de Odelouca localiza-se na ribeira de Odelouca, cerca de 1 km a montante da confluência com a ribeira de Monchique, num vale de morfologia vigorosa, no Concelho de Silves.

O vale é relativamente encaixado, alargando, duma maneira geral de forma progressiva, de montante para jusante. Após a confluência com o rio Arade, cerca de 23 km a jusante da ensecadeira, verifica-se um alargamento substancial do vale. A largura do leito menor é de 40 m junto à ensecadeira, cerca de 125 m 10 km a jusante e aproximadamente 600 m 25 km a jusante.

No que se refere ao declive médio, regista-se uma variação entre 0,04% e 0,40%, localizando-se os troços mais inclinados a montante.

O leito de cheias da ribeira de Odelouca a jusante da ensecadeira é revestido com vegetação rasteira e árvores esparsamente disseminadas, verificando-se, nos cerca de 17 km iniciais, a existência de construções, em geral isoladas, por vezes associadas a pequenas explorações agrícolas, e o atravessamento por acessos locais de utilização pouco frequente.

A ocupação do vale nos primeiros 5 km é particularmente reduzida, composta, no essencial, por construções dispersas, na sua maioria não residenciais, e por alguma agricultura de subsistência. Entre os 5 e os 17 km, a ocupação do vale aumenta, registando-se um maior número de construções, maior ocupação permanente, maior actividade agrícola e alguma indústria artesanal.

Cerca do km 17,5 a jusante da ensecadeira, a ribeira de Odelouca é atravessada pela EN124, no trecho Silves-Portimão, cujo traçado se desenvolve ao longo da margem esquerda da ribeira até cerca do km 22 e aproximadamente 1 km a montante da confluência com o rio Arade.

O vale do rio Arade a montante da confluência, e até à cidade de Silves, exhibe ocupação assinalável, estando actualmente em franco desenvolvimento, designadamente nas cotas baixas da sua margem direita, onde estão em construção diversas infraestruturas de desporto e lazer.

O vale do rio Arade a jusante da confluência, que termina em Portimão, só exhibe ocupação assinalável cerca do km 27, nas proximidades da cidade.

Nas fotografias 1 a 4 mostram-se algumas vistas do vale a jusante da ensecadeira, no trecho da ribeira de Odelouca. As fotografias foram tiradas a 09/09/2005 durante uma visita de inspecção ao vale no âmbito da realização da análise de riscos da ensecadeira de Odelouca.



Fot. 1 – Vista do vale da ribeira de Odelouca. Trecho entre os 5 e os 10 km a jusante da ensecadeira. Fotografia tirada para montante.



Fot. 2 – Vista de uma exploração agrícola no trecho entre os 5 e os 10 km a jusante da ensecadeira. Fotografia tirada para a margem esquerda.



Fot. 3 – Vista do vale da ribeira de Odelouca. Trecho entre os 10 e os 17 km a jusante da ensecadeira. Fotografia tirada para a margem esquerda.



Fot. 4 – Vista de uma exploração agrícola no trecho entre os 10 e os 17 km a jusante da ensecadeira. Fotografia tirada para a margem esquerda.

3 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO *BOSSDAMBRK*

Na sequência da suspensão da empreitada da barragem de Odelouca, o Instituto da Água (INAG) solicitou a realização de estudos de rotura da ensecadeira com vista ao estabelecimento de um programa de acompanhamento e actuação em situações de aviso às populações e alerta às entidades competentes de protecção civil.

Nos cálculos efectuados (COBA, 2004) foi adoptado um modelo de rotura da ensecadeira de Odelouca por erosão externa na sequência de galgamento.

Na simulação da rotura da ensecadeira de Odelouca foi utilizado o modelo numérico BOSS DAMBRK. Trata-se de um modelo que resolve as equações de Saint-Venant através de um esquema implícito não linear de diferenças finitas, permitindo a consideração de distâncias variáveis entre secções de cálculo.

A largura de cálculo da brecha (b) e o tempo de rotura (t) considerados foram determinados através das expressões de Froëhlich (1987) e são respectivamente iguais a 103 m e 0,8 h. A forma da brecha foi considerada trapezoidal com uma cota de fundo de 35,00 m, uma largura de base igual a 40 m e uma largura de coroamento de 116 m.

Foram calculados 38 perfis transversais, seleccionados ao longo dos 34 km estudados, tendo por base a cartografia à escala 1:25 000.

Em termos de rugosidade, foram considerados valores do coeficiente de Manning-Strickler (K_s) de $16 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (no leito principal) e $13 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (nas zonas mais altas das encostas).

Na simulação foi admitido que seria descarregado para o rio Arade um volume de água da ordem de $2\,750\,000 \text{ m}^3$ e que o nível de maré em Portimão seria de 1 m.

No Quadro 1 e na figura 1 resumem-se os resultados obtidos na simulação.

De acordo com a simulação efectuada, a altura máxima da onda é de cerca de 19 m, junto da ensecadeira, diminuindo para 10 m, 5 km a jusante, e chegando a Portimão com cerca de 2 a 3 m.

4 – APLICAÇÃO DA TÉCNICA SIMPLIFICADA DE CÁLCULO E PROPAGAÇÃO DOS HIDROGRAMAS DE CHEIA DA ONDA DE ROTURA

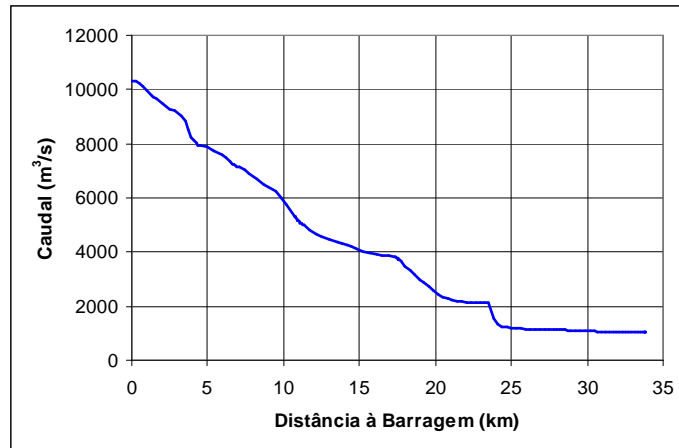
4.1 – Considerações iniciais

A técnica simplificada de cálculo e propagação dos hidrogramas de cheia baseia-se numa metodologia proposta por Hughes et al (2000) no âmbito da realização de análises de riscos por intermédio dos Diagramas de Localização, Causa e Indicadores das Falhas (LCI).

Nas secções 4.2 e 4.3 descreve-se a técnica proposta e na secção 4.4 apresentam-se os resultados da sua aplicação à ensecadeira de Odelouca e comparam-se com os resultados obtidos pelo modelo *BOSSDAMBRK*.

Quadro 1 – Rotura da ensecadeira de Odelouca. Resultados do modelo *BOSSDAMBRK* (COBA, 2004)

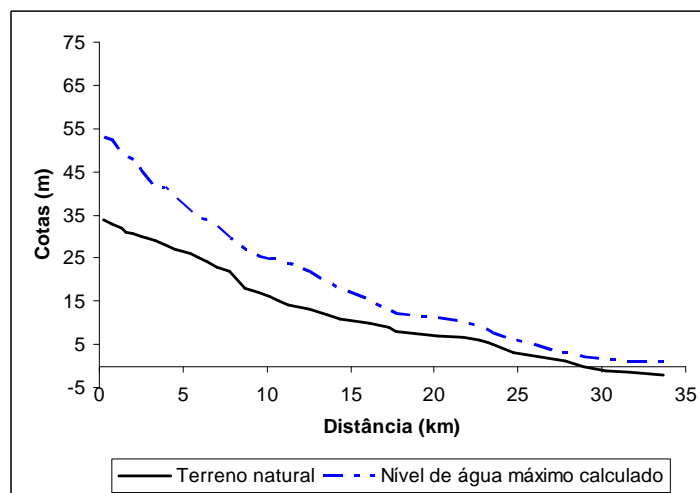
Distância à barragem	Cota de fundo	Cota máxima atingida	Caudal máximo	Tempo para atingir o caudal máximo	Velocidade máxima
(km)		(m)	(m³/s)	(horas)	(m/s)
0,27	34,0	53,08	10303	0,8	6,83
0,75	33,0	52,38	10092	0,8	4,33
1,30	32,0	49,17	9745	0,8	5,70
1,60	31,0	48,55	9660	0,8	4,62
2,00	30,5	47,70	9480	0,8	3,70
2,50	30,0	45,17	9261	0,8	5,47
2,85	29,5	43,45	9214	0,8	5,21
3,30	29,0	41,40	9019	0,9	5,57
3,94	28,0	41,42	8244	0,9	2,01
4,50	27,0	39,18	7937	0,9	5,52
5,40	26,0	35,89	7755	1,0	4,56
5,90	25,0	34,31	7596	1,0	4,17
6,45	24,0	33,80	7316	1,0	2,51
7,05	23,0	32,18	7117	1,0	3,45
7,75	22,0	29,69	6878	1,1	3,55
8,70	18,0	27,14	6515	1,2	3,20
9,50	17,0	25,54	6256	1,4	3,59
10,20	16,0	24,85	5739	1,4	3,05
10,70	15,0	24,65	5330	1,4	1,87
11,30	14,0	23,96	5000	1,5	2,67
12,50	13,0	21,97	4553	1,6	2,70
13,60	12,0	19,54	4367	1,7	3,07
14,40	11,0	18,13	4199	1,8	2,36
16,10	10,0	15,34	3920	1,9	2,19
17,30	9,0	12,71	3812	2,2	2,32
17,70	8,0	12,32	3657	2,4	1,21
20,20	7,0	11,34	2447	2,9	0,99
21,70	6,5	10,28	2177	3,1	1,32
22,70	6,0	9,27	2122	3,2	1,05
23,20	5,5	8,37	2114	3,2	1,71
23,50	5,0	7,58	2113	3,3	1,56
24,70	3,0	6,01	1235	3,7	0,97
27,80	1,0	3,23	1133	4,4	1,14
28,90	0,0	2,03	1106	4,9	0,61
30,20	-1,0	1,55	1072	5,2	0,46
31,70	-1,5	1,26	1062	5,3	0,40
33,70	-2,0	1,00	1065	5,3	0,35



(a) Caudal máximo



(b) Tempo de chegada do caudal máximo



(c) Cotas de água máximas

Fig.1 – Rotura da ensecadeira da Odelouca: (a) caudal máximo, (b) tempo de chegada do caudal máximo e (c) cotas de água máximas, em função da distância à ensecadeira. Simulação pelo modelo *BOSSDAMBRK* (COBA, 2004)

4.2 – Cálculo do hidrograma de cheia na secção de implantação da ensecadeira

O caudal de ponta de cheia resultante da rotura de uma barragem, na sua secção de implantação, é calculado, de acordo com os autores, pela seguinte equação:

$$Q_p = 330BFF^{0,42} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1)$$

em que BFF é o factor de formação de brecha, determinado através da equação:

$$BFF = VH \quad (10^6\text{m}^4) \quad (2)$$

sendo V (10^6m^3) o volume armazenado e H (m) a altura do nível de máxima cheia acima da cota do rio.

O tempo de rotura, T_p , pode ser determinado pela equação:

$$T_p = 120H \quad (\text{s}) \quad (3)$$

Os autores sugerem para o hidrograma de cheia uma forma triangular, como representado na figura 2.

O tempo T_e do hidrograma é determinado assegurando que o volume da cheia corresponde ao volume da albufeira, V . Assim, T_e é tal que:

$$V = \frac{Q_p T_e}{2} \quad (4)$$

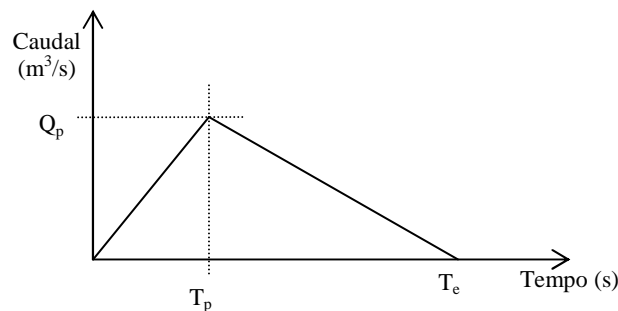


Fig.2 – Hidrograma de cheia. Forma inicial sugerida pelos autores

Em alguns casos, por exemplo quando uma barragem tem um volume armazenado muito baixo e uma altura de aterro elevada, torna-se impossível a obtenção de um hidrograma idêntico ao da figura 2. Assim, quando o valor de T_e é inferior a duas vezes o valor de T_p fixa-se o valor de Q_p e reduz-se o valor de T_p para valores não inferiores a $40H$, mantendo-se o valor de T_e igual a duas vezes o valor de T_p , conforme ilustrado a cheio na figura 3.

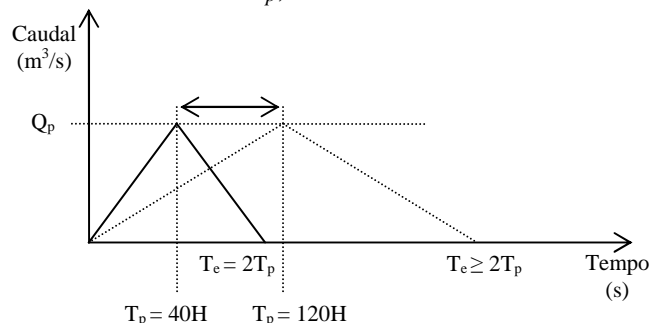


Fig.3 – Hidrogramas de cheia. Forma inicial e forma reduzida mantendo Q_p

No caso do volume de água representado pelo hidrograma reduzido continuar a ser superior ao volume armazenado na albufeira então, mantendo-se $T_p = 40H$ (logo $T_e = 80H$), reduz-se o valor de Q_p até que se igualem os valores do volume de água do hidrograma e o volume armazenado (ver figura 4).

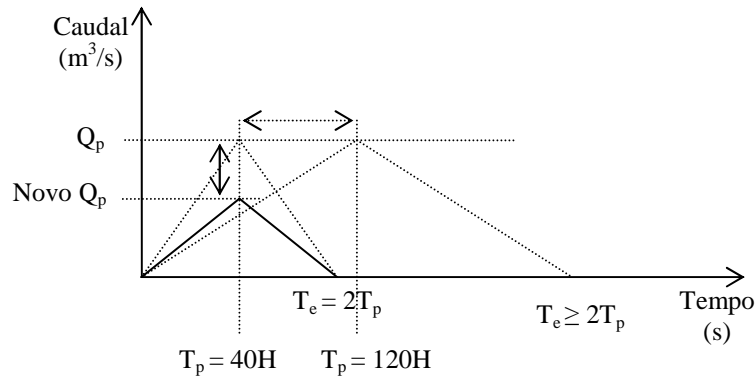


Fig.4 – Hidrograma de cheia. Forma inicial e formas reduzidas (variando Q_p e mantendo Q_p)

4.3 – Cálculo da propagação do hidrograma de cheia

Determinado o caudal na secção da barragem, a altura de água pode ser calculada pela equação de Manning-Strickler:

$$Q_p = K_s \times R^{2/3} \times i^{1/2} \times A \quad (5)$$

sendo Q_p (m^3/s) o caudal descarregado na secção em causa, K_s ($m^{1/3}/s$) o coeficiente da fórmula de Manning-Strickler, R (m) o raio hidráulico da secção, i a inclinação do rio e A (m^2) a área da secção.

O valor de Q_p vai-se reduzindo ao longo do vale devido ao amortecimento. Assim, para estimar a altura de água nas sucessivas secções há que calcular o novo valor de Q_p , através de:

$$Q_p(w+1) = Q_p(w) \exp(-x/L_a) \quad (6)$$

em que $Q_p(w+1)$ (m^3/s) é o caudal na secção $w+1$, $Q_p(w)$ (m^3/s) é o caudal na secção w , x (m) é a distância entre secções e L_a é determinado pela equação:

$$L_a = k \times B^{-0.2} \times i^{1.9} \times n^{-1.8} \times Q_p(0)^{0.2} \times T_h^2 \quad (7)$$

sendo k um factor variável⁵ entre 1 e 10, B (m) a largura estimada da secção, i a inclinação do rio, n o coeficiente de Manning-Strickler e T_h (s) o período de tempo durante o qual o caudal excede metade do caudal de ponta, conforme ilustrado na figura 5.

A largura B é inicialmente estimada, devendo ser posteriormente rectificada, mediante um processo iterativo, pela altura de água resultante da aplicação da equação (5), até que a diferença dos valores inicial e final de B seja inferior a 10%.

⁵ Os autores sugerem o valor de 2,5, reconhecendo no entanto que o valor sugerido requer investigação adicional

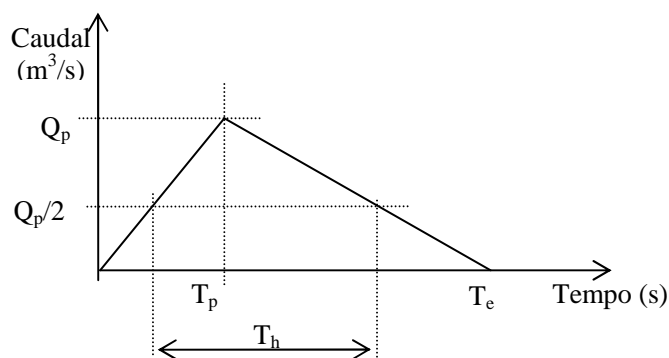


Fig. 5 – Hidrograma de cheia. Representação de T_h

Obtido o Q_p na secção em estudo, o novo valor de T_h pode ser determinado pela equação:

$$T_h(w+1) = T_h(w) \times Q_p(w) / Q_p(w+1) \quad (8)$$

em que $T_h(w+1)$ é o T_h da nova secção e $T_h(w)$ é o T_h da secção anterior.

4.4 – Resultados da aplicação da técnica proposta à ensecadeira de Odelouca

Na aplicação do método simplificado para determinação dos hidrogramas de cheia no vale a jusante resultantes da rotura da ensecadeira, utilizaram-se as mesmas secções usadas na simulação através do modelo numérico *BOSSDAMBRK*, cujas principais características se resumem no Quadro 2.

Atendendo a que a capacidade de armazenamento é igual a 19 hm^3 e a altura máxima da ensecadeira acima da cota do terreno natural é igual a $31,5 \text{ m}$ (considerado igual ao nível de máxima cheia), determinou-se $Q_p = 4\,840,4 \text{ m}^3/\text{s}$ e construiu-se o hidrograma representado na figura 6, considerando que $T_p = 120H$ e $T_e = 2V/Q_p$.

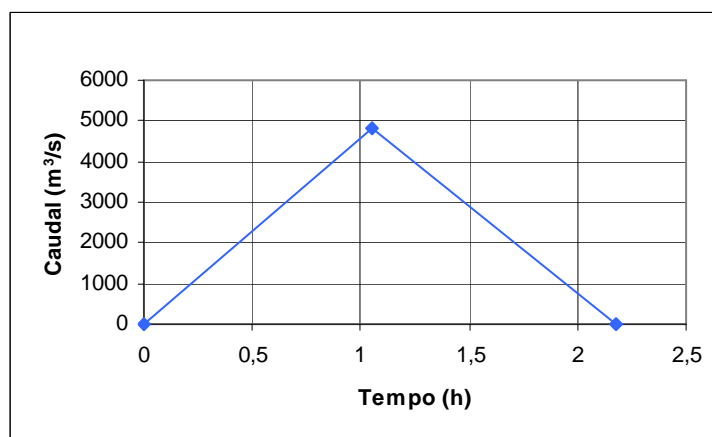


Fig. 6 – Hidrograma da onda de rotura na secção da ensecadeira

Nos cálculos considerou-se um valor de $14 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para o coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning-Strickler e $k = 2,5$ para a determinação de L_a . No Quadro 3 apresentam-se os resultados obtidos.

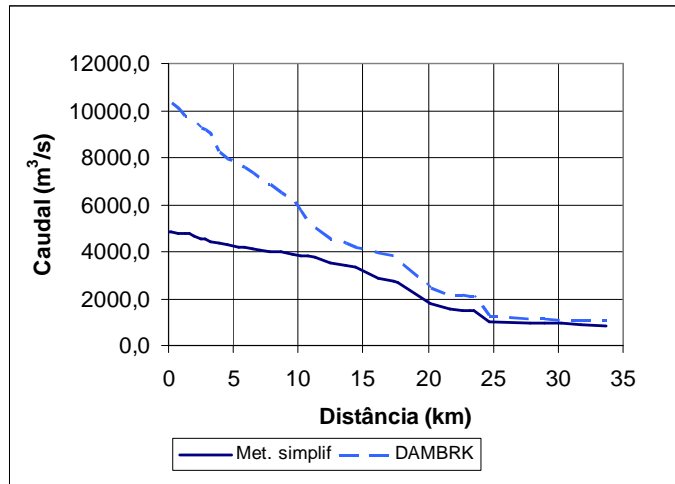
Quadro 2 – Características geométricas das secções analisadas

Secção nº	Distância à barragem (km)	Cota do fundo (m)	Distância entre secções (km)	Inclinação %
Ensecadeira	0+000	35,0	-	-
2	0+270	34,0	0,27	0,370
3	0+750	33,0	0,48	0,208
4	1+300	32,0	0,55	0,182
5	1+600	31,0	0,30	0,333
6	2+000	30,5	0,40	0,125
7	2+500	30,0	0,50	0,100
8	2+850	29,5	0,35	0,143
9	3+300	29,0	0,45	0,111
10	3+940	28,0	0,64	0,156
11	4+500	27,0	0,56	0,179
12	5+400	26,0	0,90	0,111
13	5+900	25,0	0,50	0,200
14	6+450	24,0	0,55	0,182
15	7+050	23,0	0,60	0,167
16	7+750	22,0	0,70	0,143
17	8+700	18,0	0,95	0,421
18	9+500	17,0	0,80	0,125
19	10+200	16,0	0,70	0,143
20	10+700	15,0	0,50	0,200
21	11+300	14,0	0,60	0,167
22	12+500	13,0	1,20	0,083
23	13+600	12,0	1,10	0,091
24	14+400	11,0	0,80	0,125
25	16+100	10,0	1,70	0,059
26	17+300	9,0	1,20	0,083
27	17+700	8,0	0,40	0,250
28	20+200	7,0	2,50	0,040
29	21+700	6,5	1,50	0,033
30	22+700	6,0	1,00	0,050
31	23+200	5,5	0,50	0,100
32	23+500	5,0	0,30	0,167
33	24+700	3,0	1,20	0,167
34	27+800	1,0	3,10	0,065
35	28+900	0,0	1,10	0,091
36	30+200	-1,0	1,30	0,077
37	31+700	-1,5	1,50	0,033
38	33+700	-2,0	2,00	0,025

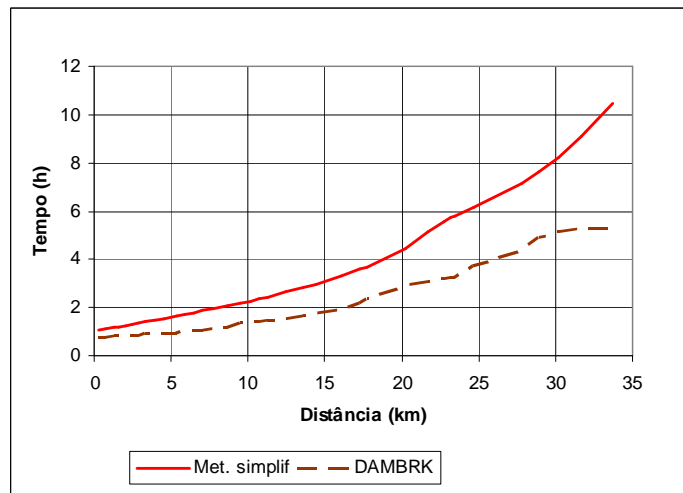
Na figura 7 apresentam-se a traço cheio os caudais máximos, o instante de chegada do caudal máximo e os níveis máximos de água obtidos. A traço interrompido representam-se os resultados obtidos pelo modelo *BOSSDAMBRK* resumidos na secção 3.

Quadro 3 - Rotura da ensecadeira de Odelouca. Resultados obtidos pela técnica simplificada.

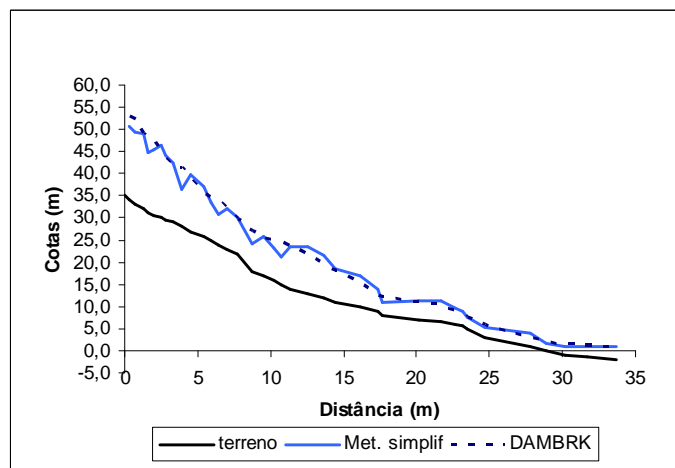
Distância à barragem (km)	Cota de fundo	Cota máxima atingida (m)	Caudal máximo (m ³ /s)	Tempo para atingir o caudal máximo (h)	Velocidade máxima (m/s)
0,27	34,0	50,7	4835,0	1,09	4,25
0,75	33,0	49,3	4803,8	1,10	3,01
1,30	32,0	49,0	4756,5	1,11	2,68
1,60	31,0	44,6	4748,4	1,11	3,14
2,00	30,5	45,5	4678,9	1,13	2,25
2,50	30,0	46,5	4555,3	1,16	2,18
2,85	29,5	44,1	4512,5	1,17	2,24
3,30	29,0	42,5	4429,3	1,19	2,20
3,94	28,0	36,4	4363,0	1,21	1,92
4,50	27,0	39,7	4327,2	1,22	2,86
5,40	26,0	37,2	4177,5	1,26	2,07
5,90	25,0	33,4	4152,3	1,27	2,44
6,45	24,0	30,7	4117,5	1,28	2,07
7,05	23,0	32,3	4071,7	1,30	1,83
7,75	22,0	30,0	4004,6	1,32	1,85
8,70	18,0	24,2	3994,2	1,32	2,93
9,50	17,0	25,7	3906,1	1,35	1,97
10,20	16,0	23,2	3848,2	1,37	1,93
10,70	15,0	21,1	3826,3	1,38	1,98
11,30	14,0	23,5	3788,6	1,39	1,75
12,50	13,0	23,4	3535,5	1,49	1,52
13,60	12,0	21,6	3379,4	1,56	1,69
14,40	11,0	18,4	3320,5	1,59	1,63
16,10	10,0	16,9	2847,1	1,85	1,19
17,30	9,0	14,0	2720,8	1,94	1,14
17,70	8,0	10,8	2715,4	1,94	1,21
20,20	7,0	11,4	1799,1	2,93	0,56
21,70	6,5	11,4	1560,2	3,38	0,68
22,70	6,0	9,6	1504,2	3,51	0,66
23,20	5,5	9,0	1498,0	3,52	0,98
23,50	5,0	7,6	1496,5	3,53	1,08
24,70	3,0	5,3	1013,0	5,21	0,96
27,80	1,0	4,0	983,2	5,37	0,69
28,90	0,0	1,8	977,5	5,40	0,61
30,20	-1,0	1,0	968,3	5,45	0,58
31,70	-1,5	1,0	918,3	5,75	0,43
33,70	-2,0	1,0	821,8	6,42	0,38



(a) Caudal máximo



(b) Tempo de chegada do caudal máximo



(c) Cotas de água máximas

Fig.7 – Rotura da ensecadeira da Odelouca: (a) caudal máximo, (b) tempo de chegada do caudal máximo e (c) cotas de água máximas, em função da distância à ensecadeira. Simulação pelo técnica simplificada versus modelo *BOSSDAMBRK*.

A análise comparativa dos resultados mostra uma razoável aproximação no que se refere à altura de água na globalidade das secções estudadas, embora se verifiquem, nalguns trechos, diferenças significativas desta grandeza, não conservativas. No que se refere ao caudal máximo e ao tempo de chegada do caudal máximo a técnica simplificada não é conservativa, apresentando valores bastante diferentes dos obtidos com a modelação numérica (caudais inferiores e tempos de chegada superiores).

Face às diferenças obtidas, procedeu-se à aplicação da técnica simplificada considerando que o caudal de ponta na secção de implantação da ensecadeira é calculado pela equação de Fread (1981, 1988) em alternativa à equação sugerida pelos autores:

$$Q_p = 540(VH)^{0.5} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (9)$$

em que $V \text{ (hm}^3\text{)}$ é o volume armazenado e $H \text{ (m)}$ é o nível de máxima cheia, obtendo-se $Q_p = 13\,210 \text{ m}^3\text{/s}$.

Conforme referido anteriormente, Hughes et al (2000) aconselham a utilização de um $k = 2,5$ na determinação de L_a mas referem que este factor varia entre 1 e 10, Assim, procedeu-se também a uma análise de sensibilidade para quatro valores de k : 1, 2,5, 5 e 10.

Na figura 8 representam-se os resultados do produto da velocidade pela altura de água (vh) e, na figura 9, o caudal máximo, o tempo de chegada do caudal máximo e as cotas máximas atingidas pela cheia.

A observação das figuras 8 e 9 permite concluir que a equação sugerida por Fread (1981, 1988) para o cálculo do caudal de ponta na secção da ensecadeira ajusta-se bastante melhor ao caudal de ponta calculado pelo modelo numérico *BOSSDAMBRK* do que a equação sugerida pelos autores e sendo as diferenças, neste caso, conservativas. Em consequência, os resultados da subsequente propagação do hidrograma da cheia são também significativamente mais próximos dos calculados pelo modelo numérico. A melhor aproximação, para a globalidade dos resultados, corresponde a $k = 2,5$, conforme proposto pelos autores.

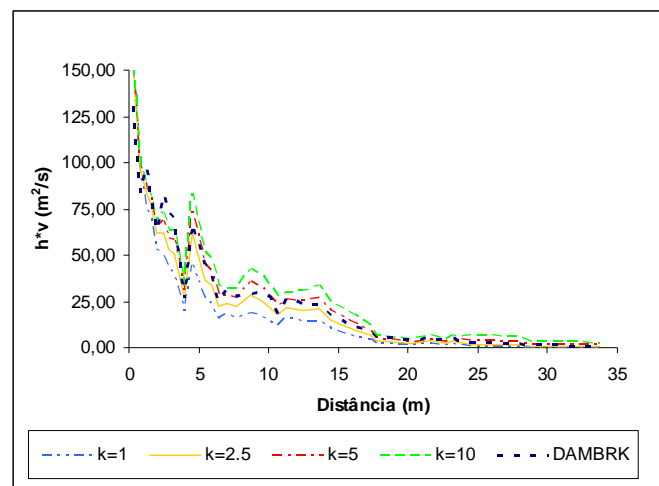
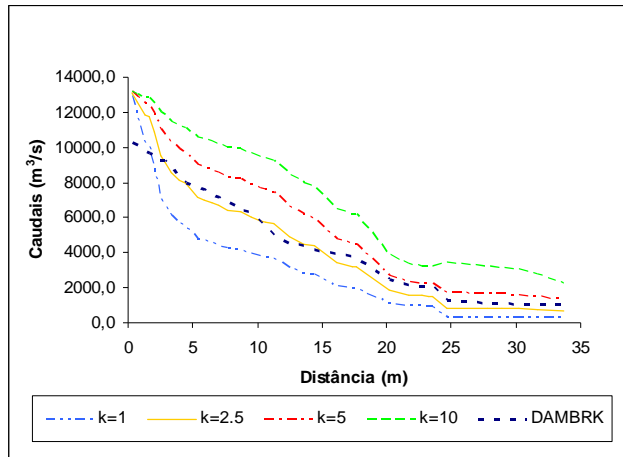
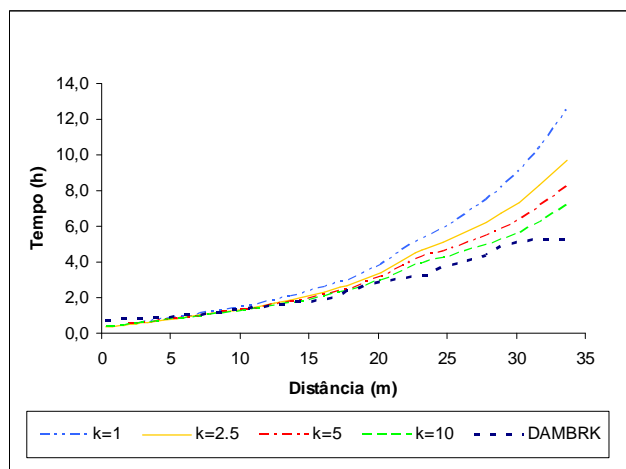


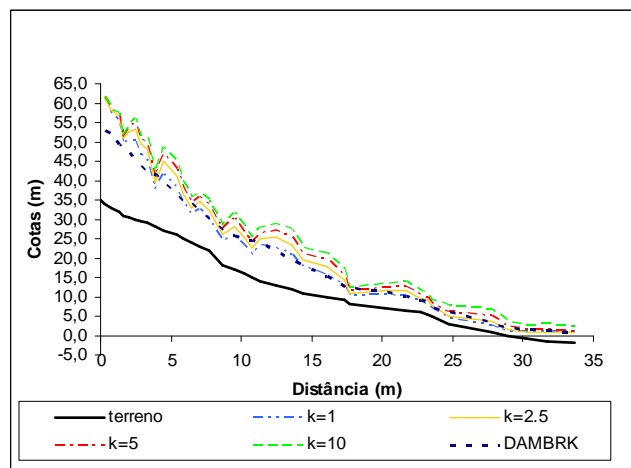
Fig. 8 – Rotura da ensecadeira da Odelouca. Variação de vh em função da distância à ensecadeira. Simulação pelo técnica simplificada para $k=1, 2,5, 5$ e 10 e Q_p na secção da ensecadeira calculado pela equação de Fread (1981, 1988)



(a) Caudal máximo



(b) Tempo de chegada do caudal máximo



(c) Cotas de água máximas

Fig. 9 – Rotura da ensecadeira da Odelouca: (a) Caudal máximo, (b) tempo de chegada do caudal máximo e (c) cotas de água máximas, em função da distância à ensecadeira. Simulação pelo técnica simplificada para $k=1, 2,5, 5$ e 10 e Q_p na secção da ensecadeira calculado pela equação de Fread (1981, 1988) versus modelo *BOSSDAMBRK*

5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES E FINAIS

A análise comparativa dos resultados obtidos pela técnica simplificada proposta por Hughes et al (2000) e pelo modelo numérico *BOSSDAMBRK* mostra que a técnica simplificada conduz a valores não conservativos do caudal máximo, tempo de chegada do caudal máximo e velocidade máxima. As alturas de água são razoavelmente aproximadas, embora nalgumas secções as diferenças não sejam desprezáveis nem conservativas.

O cálculo do hidrograma efluente resultante da formação da brecha é, para o caso estudado, melhor aproximado se se utilizar a equação de Fread (1981, 1988). Verifica-se que para o hidrograma efluente resultante, o processo de propagação e amortecimento do escoamento pela abordagem simplificada se assemelha bastante bem aos escoamentos do modelo numérico para $k=2,5$, no que se refere a todas as variáveis e, designadamente, ao produto vh , de grande interesse como medida das consequências.

A avaliação das consequências da rotura de uma barragem pela metodologia de análise de riscos proposta por Hughes et al (2000), tendo por base a técnica simplificada apresentada no presente trabalho, utiliza no essencial as alturas de água calculadas para contabilizar as estruturas e infraestruturas interferidas.

Assim, apesar das diferenças obtidas pela aplicação da técnica proposta ao caso da ensecadeira de Odelouca (resultantes essencialmente do cálculo do processo de formação da brecha e do correspondente hidrograma afluente), por comparação com o modelo *BOSSDAMBRK*, a avaliação das consequências resultaria semelhante à efectuada a partir dos resultados do modelo numérico disponível. Este facto deve-se, no essencial, às seguintes razões:

- i) as maiores diferenças entre as alturas de água ocorrem nos cerca de 10 km iniciais, trecho em que a ocupação do vale é muito reduzida;
- ii) as maiores diferenças entre as alturas de água ocorrem em trechos de reduzido desenvolvimento que alternam com trechos em que as diferenças são mínimas;
- iii) as condições topográficas e de ocupação do vale determinam que nas secções em que as maiores diferenças se verificam as consequências não difiram substancialmente;
- iv) a topografia utilizada, que é de reduzido pormenor.

Não obstante no caso em análise as diferenças da avaliação das consequências serem desprezáveis, considera-se que a técnica simplificada deverá ser utilizada substituindo a equação proposta para o cálculo do caudal efluente resultante da formação da brecha pela equação de Fread (1981, 1988).

Por último, salienta-se a simplicidade e rapidez de utilização desta técnica que poderá constituir um instrumento de cálculo de grande utilidade no âmbito da avaliação preliminar das consequências associadas a roturas de barragens de pequena a média dimensão e cuja ocupação a jusante seja também de pequena a média importância.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao INAG a autorização para apresentação da presente comunicação e a disponibilização dos elementos das fases de projecto e construção da ensecadeira de Odelouca consultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Froehlick, D.C., 1987, “Embankment-dam breach parameters”, Proceedings of the 1987 National Conference on Hydraulic Engineering”, ASCE, New York, August, pp. 570-575.

Fread, D.L., (1981), “Some limitations of dam-break flood routing models”, ASCE Fall Convention, St. Louis, Missouri, October, pp. 26-30.

Fread, D.L., (1988), “ BREACH: An erosion model for earthen dam failures”, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Maryland.

Hughes, Hewlett, Samuels, Morris, Sayers, Moffat, Harding e Tedd, 2000, “Risk Management for UK Reservoirs”, CIRIA

COBA, 2000, “Projecto da barragem de Odelouca a montante da ribeira de Monchique”, Volume I

COBA, 2004, “NT86_CO - Estudos de rotura da ensecadeira de Odelouca à cota 66,5”

Lurdes Pimenta, Laura Caldeira e Silva Gomes, 2005, “Análise de riscos da ensecadeira de Odelouca, Aplicação de uma metodologia simplificada com base em diagramas LCF”, Seminário “Barragens: Tecnologia, Segurança e Interação com a Sociedade”, LNEC