CLASSIFICAÇÃO DE PEQUENAS BARRAGENS [1]

Documento de apoio à classificação de pequenas barragens, em função da sua perigosidade e dos danos potenciais associados, nos termos do Artigo 2º, parágrafo 2, do **REGULAMENTO PEQUENAS BARRAGENS (RPB),** publicado pelo Decreto -Lei nº 21/2018, de 28.03.2018 (ANEXO II).

Elaborado por: **LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL**

1. Âmbito

O presente documento aplica-se às denominadas **pequenas barragens**, que são as barragens que têm **menos de 15 metros de altura**, medida desde a cota mais baixa da superfície geral das fundações até à cota do coroamento, exceptuando aquelas barragens cujas albufeiras tenham capacidade igual ou superior a **1 hm^3** e mais de 10 metros de altura.

2. Metodologia de Classificação

A metodologia de classificação é definida no ANEXO I do Decreto - Lei nº 21/2018 e aplica-se a todas as barragens, grandes (RSB) e pequenas (RPB).

Tal como está definida a metodologia, praticamente todas **as pequenas barragens a que o RPB se aplica caem dentro de duas classes: Classe II ou Classe III**.

Reproduz-se seguidamente a metodologia indicada:

> Classificação das barragens
>
> 1 - Classificam-se as barragens em função da sua perigosidade e dos danos potenciais associados à onda de inundação correspondente ao cenário de acidente mais desfavorável.
>
> 2 - A **perigosidade** da barragem deve ser caracterizada pelo fator $\mathbf{X} = \mathrm{H}^2\sqrt{\mathrm{V}}$, sendo H a altura da barragem, em metros, e V a capacidade da albufeira, em hm^3.

[1] Texto preliminar, a integrar no "**MANUAL DE APOIO AO RPB** (PROJETO, CONSTRUÇÃO, EXPLORAÇÃO E REABILITAÇÃO)", promovido pela Autoridade nos termos do Artigo 10º do RPB, e coordenado pelo **LNEC.** Texto elaborado por LNEC, com apoio e colaboração da APA.

3 - Os danos potenciais devem ser avaliados na região do vale a jusante da barragem, onde a onda de inundação pode afetar a população, os bens e o ambiente, devendo:

a) A população ser avaliada em função do **número de edificações fixas com carácter residencial permanente** (**Y**);

b) Os danos potenciais ser avaliados tendo em consideração a existência de infraestruturas, instalações e bens ambientais importantes.

4 - A região do vale a jusante referida no número anterior deve ser delimitada pela secção do rio em que o caudal decorrente da rotura da barragem atinge a ordem de grandeza do caudal de dimensionamento do descarregador de cheias, sendo tal secção definida da seguinte forma:

a) Com base em resultados obtidos por aplicação de modelos hidrodinâmicos ao estudo da onda de cheia, podendo também ser utilizados modelos simplificados ou fórmulas empíricas, se devidamente justificado;

b) Por uma secção do rio localizada 10 km a jusante da barragem, no caso de barragens com H (igual ou menor que) 15 m e X (menor que) 100.

5 - A classe da barragem resulta da aplicação do quadro seguinte:

Quadro 1 – Critérios para definição da classe de uma barragem

Classe	Dimensão da barragem e danos potenciais associados
I	$X \geq 1000 \, e \, Y \geq 10$
II	$X < 1000 \, e \, Y \geq 10$ *ou* *0<Y<10, independentemente do valor de X* *ou* *Existência de infraestruturas, instalações e bens ambientais importantes*
III	Y=0, independentemente do valor de X

A figura seguinte apresenta as curvas referentes ao fator **X** (**perigosidade**), o qual, tal como foi referido, é definido em função da altura da barragem e da capacidade da respetiva albufeira.

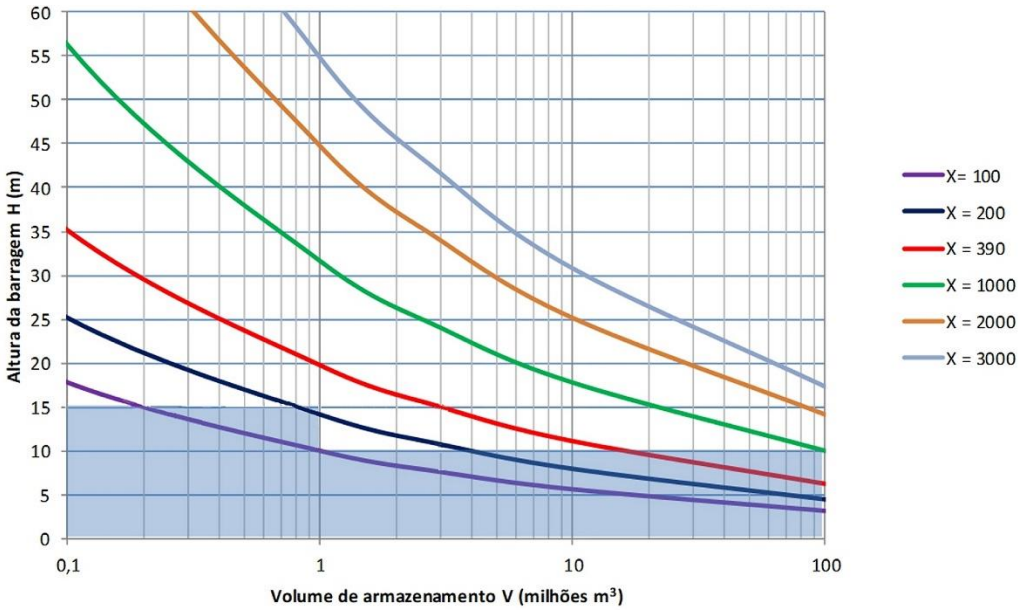

Figura 1 – Curvas referentes ao fator **X** (perigosidade)

Nesta figura, a zona sombreada a azul corresponde ao domínio das pequenas barragens. São ainda de salientar as seguintes três curvas:

- X= 1000, que é o valor acima do qual uma barragem é considerada de classe I, desde que afete mais de 10 edificações fixas com carácter residencial permanente, de acordo com o ANEXO I do Decreto-Lei nº 21/2018;
- X=200 que corresponde, por exemplo, aproximadamente a uma barragem com H=15 m e V=1 hm^3 (grande barragem de acordo com a definição do RSB, baseada em ICOLD);
- X=100 que corresponde, por exemplo, a barragens com H=15 e V=0,2 hm^3 ou H=10 e V=1 hm^3.

3. Abordagens propostas

Para a classificação das pequenas barragens são propostas três metodologias diferentes que podem ser usadas em função da perigosidade (dimensões) da barragem, em particular:

- Método simplificado explicitado em a) alternativo para as pequenas barragens com X<50, que corresponde, por exemplo, aproximadamente a uma barragem com H=12,5 m e V=0,1 hm^3:

- Método simplificado explicitado em b) para as pequenas barragens com 50 < X < 100;
- Aplicação de modelos de simulação explicitado em c) para as pequenas barragens com 100 < X< 200.

a) <u>Metodologia para classificação para as pequenas barragens X< 50</u>

Para as barragens muito pequenas propõe-se uma análise particularmente simples já que, dadas as dimensões deste tipo de barragens, não são de esperar danos significativos. Assim, nesta análise propõe-se que a altura da onda provocada pela cheia de rotura seja considerada igual a metade da altura da barragem ao longo da extensão de cálculo a jusante.

Propõe-se a identificação dos elementos expostos (edificações fixas) ao longo de 5 km por recurso a imagens satélite (*Google Earth*).

b) <u>Metodologia para classificação para as pequenas barragens 50 < X< 100</u>

Para barragens ainda relativamente pequenas propõe-se uma abordagem simplificada baseada nos quatro passos seguintes (Viseu, 2015):

- cálculo do caudal máximo na secção da barragem em rotura;
- cálculo da propagação da cheia induzida pela rotura, i.e., do caudal máximo ao longo do vale a jusante;
- cálculo do nível máximo atingido pela cheia induzida;
- identificação dos elementos expostos no vale a jusante.

Para a análise simplificada a empreender, propõe-se a identificação dos elementos expostos (edificações fixas) ao longo de 10 km.

Seguidamente é apresentado o desenvolvimento proposto para estes passos.

<u>b.1) caudal máximo na secção da barragem em rotura</u>

A abordagem simplificada para efetuar a simulação do processo de formação da cheia induzida pela rotura da barragem consiste no uso de equações empíricas de previsão, i.e., expressões que relacionam o caudal máximo efluente da brecha de rotura com as características da barragem ou da albufeira (geralmente altura

da barragem, capacidade da albufeira ou uma variável que compreenda estas duas características) tal como apresentado na tabela seguinte.

O quadro seguinte apresenta as expressões mais amplamente utilizadas no meio técnico-científico que são as de Froelich (1995), USBR (1989) e Hagen (1982) – vide Quadro 2.

Quadro 2 – Expressões para cálculo do caudal de ponta de cheia resultante da rotura de uma barragem

Método	Expressão	Observações
Hagen (1982)	$Q_{\max} = 1{,}205(H_{bar}V_{alb})^{0{,}48}$	(Eq.1)
USBR (1989)	$Q_{\max} = 6{,}14H_{barr}^{1{,}81}V_{alb}^{0{,}061}$	(Eq.2)
Froehlich (1995)	$Q_{\max} = 0{,}607H_{bar}^{1{,}24}V_{alb}^{0{,}295}$	(Eq.3)
Bornshein (2009)	$Q_{\max} = 0{,}928(H_{bar}V_{alb})^{0{,}4319}$	(Eq.4)

A expressão de Hagen (1982) a conduz a estimativas menores; a expressão de Froelich (1995) tende a fornecer valores mais elevados do caudal máximo efluente, sendo igualmente a que melhor se ajusta à amostra das grandes barragens portuguesas (Martins, comunicação oral, 2015). Mais recentemente, Bornshein (2009) propõe uma expressão muito semelhante à Hagen (1982), a qual tem vindo a ser utilizada na classificação de pequenas barragens no Sul de Portugal.

b.2) Cálculo da propagação da cheia no vale a jusante

O valor do caudal máximo efluente na secção da barragem, $Q_{\max}$, vai-se reduzindo ao longo do vale devido ao amortecimento. Assim, para estimar a altura de água nas sucessivas secções, há que calcular os respetivos valores de $Q_{\max}(x)$, sendo x a distância à barragem.

A abordagem simplificada para efetuar a simulação do processo de propagação da cheia induzida pela rotura da barragem consiste no uso de modelos baseados em equações empíricas de previsão que relacionam o caudal máximo numa

secção que dista x quilómetros da barragem, $Q_{\max}(x)$, com determinadas características do vale, nomeadamente o declive médio do talvegue, a largura das secções do rio e a rugosidade do leito e margens. Propõe-se o método do USBR (USBR, 1989), desenvolvido pelo Bureau of Reclamation dos EUA e traduzido pela Eq. 5;

$$Q_{\max}(x) = \frac{Q_{\max}}{10^{0,0124\,x}} \qquad \text{(Eq.5)}$$

Onde $Q_{\max}$ – caudal máximo efluente na secção da barragem em rotura (m^3/s); x – distância entre a secção de cálculo e a barragem (km); $Q_{\max}(x)$ – caudal máximo numa secção à distância *x* km da barragem (m^3/s).

b.3) Cálculo do nível máximo atingido pela cheia induzida

Os principais resultados da simulação da cheia provocada pela rotura são os valores dos caudais de ponta de cheia ($Q_{\max}$) e dos níveis máximos atingidos pelo escoamento ($N_{\max}$) nas diversas secções do rio a jusante da barragem. É com base nestes últimos que é possível identificar as zonas que vão ser inundadas, ou seja, estabelecer o mapa de inundação.

Assim, tendo calculado os valores de caudal máximo ao longo do troço de simulação, estes são transformados em alturas do escoamento por recurso a uma lei de resistência empírica para escoamentos uniformes. É usual utilizar a equação de Manning-Strickler.

Numa primeira fase, torna-se necessário empreender uma breve caracterização topográfica da linha de água em estudo, tendo por base perfis transversais. Por simplificação, devem adotar-se geometrias regulares. Assim, a partir dos perfis transversais levantados definem-se secções trapezoidais, retangulares ou triangulares equivalentes, procurando o melhor ajustamento possível.

O cálculo do valor da altura do escoamento, *h*, com base na equação de Manning-Strickler, obriga a recorrer a um esquema iterativo. Na hipótese de se optar pelo método iterativo direto, a altura de água numa dada secção de cálculo será dada pela expressão:

$$h_{n+1} = \left(\frac{Q}{K_s \sqrt{i}} \right)^{0,6} \frac{\left(B + 2h_n \sqrt{1+m^2} \right)^{0,4}}{B + m h_n} \qquad \text{(Eq.6)}$$

onde n – número de uma dada iteração; h – altura de água estimada para uma dada secção; i – declive do talvegue do rio a jusante da barragem (m/m); B – largura da secção do escoamento (m); m – declive dos taludes da secção (rácio 1 (vertical): m (horizontal)).

O método obriga, numa primeira fase, à realização de uma estimativa para o valor da incógnita h_n. Tendo por base o valor estimado de h_n, é possível calcular, sucessivamente, o valor de h_{n+1}. O cálculo iterativo termina quando a condição $|h_{n+1}-h_n| < E$ (sendo E o erro admissível) é verificada.

b.4) Abordagem simplificada para identificação dos elementos expostos

Para realizar uma estimativa do número de edificações fixas que se encontram expostas na área de inundação propõe-se a utilização de imagens satélite (e.g. *Google Earth*). O uso destas últimas, que são de uma forma geral recentes e particularmente ajustadas para caraterização de zonas de ocupação esparsa de população, permite ainda fazer um inventário das infraestruturas afetadas, em particular, no que concerne as vias rodoviárias e ferroviárias. Contudo, em função da ponderação efetuada por este método, poderá ser necessário realizar visita de campo.

c) Metodologia para classificação para pequenas barragens com 100 < X < 200

Para as pequenas barragens com 100 < X < 200 propõe-se uma abordagem mais completa, por recurso a um modelo de simulação da cheia de rotura, por exemplo o modelo Hec-Ras, até uma secção do rio onde a onda de inundação atinja a ordem de grandeza da cheia de dimensionamento do descarregador de cheias, ou ao longo de pelo menos 25 km.

Propõe-se ainda a identificação dos elementos expostos ao longo destas extensões por recurso a mapas de ocupação do território (1:25000), imagens satélite (*Google Earth*) e visitas de campo.

4. Consideração final

O presente documento serve de apoio ao novo REGULAMENTO PEQUENAS BARRAGENS (RPB), publicado pelo Decreto-Lei nº 21/2018, de 28.03.2018, propondo três metodologias diferentes para a classificação das pequenas barragens em função da sua dimensão.

5. Bibliografia

Bornschein, A., 2009. A simple method to estimate inundation due to dam break. In Proceeding of the 2nd *International Conference of Long Time Behaviour of Dams*. Graz, Austria, pp 727-732.

Froehlich, D.C., 1995. Peak outflow from breached embankment dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol 121, nº1, pp. 90-97.

HAGEN, V.K., 1982. *Re-evaluation of Design Floods and Dam Safety*. 14º Congresso das Grandes Barragens, Q.52, Rio de Janeiro.

USBR, 1989. *Policy and Procedures for Dam Safety Modification Decision-Making*. Department of the Interior, Denver, USA.

Viseu, T., 2015. Metodologias Simplificadas de Avaliação do Risco a Jusante de Barragens" Capítulo do livro "Projeto, Construção e Observação de Pequenas Barragens de Aterro" publicado pela IST Press ("editores": Emanuel Maranha das Neves, Laura Caldeira e António Pinheiro), colecção Ensino da Ciência e Tecnologia; ISBN: 978-989-8481-37-5.