

PROCESSOS DE EROSÃO INTERNA EM BARRAGENS DE ATERRO E SUAS FUNDAÇÕES

PROCESSES OF INTERNAL EROSION IN EMBANKMENT DAMS AND THEIR FOUNDATIONS

Santos, Ricardo, *LNEC, Lisboa, Portugal, ricardos@lnec.pt*
Caldeira, Laura, *LNEC, Lisboa, Portugal, laurac@lnec.pt*

RESUMO

A erosão interna é uma das principais causas de acidentes e de roturas em barragens de aterro. Os modos de rotura deste tipo estão associados ao arrastamento de partículas de solo através da percolação no aterro da barragem ou na sua fundação. A erosão interna é uma expressão abrangente que engloba diferentes tipologias, conforme a sua iniciação fenomenológica, nomeadamente: erosão através de fuga concentrada, erosão regressiva, sufusão e erosão no contacto entre solos. Um processo de erosão interna que conduza à rotura de uma barragem de aterro desenvolve-se em quatro fases sequenciais fundamentais, designadas por: (i) iniciação da erosão, (ii) continuação da erosão ou filtração, (iii) progressão da erosão e (iv) formação de brecha. Neste documento identificam-se os principais factores que influenciam a probabilidade de ocorrência de cada fase de um processo de erosão interna.

ABSTRACT

Internal erosion is one of the main causes of accidents and failures of embankment dams. This type of failure modes occurs when particles of an embankment or a foundation are entrained downstream by flow from the reservoir or groundwater. Internal erosion is an expression embracing different typologies according with its phenomenological initiation: erosion through concentrated leaks, backward erosion, suffusion, and contact erosion. An internal erosion process, ending in the failure of an embankment dam, develops in four fundamental sequential phases: (i) initiation of erosion, (ii) continuation of erosion or filtration, (iii) progression of erosion, and (vi) breach formation. The most important factors influencing the probability of occurrence of each one of internal erosion process phases are here identified.

1. INTRODUÇÃO

A *International Commission on Large Dams* (ICOLD 1995) recolheu dados relativos a grandes barragens de todo o mundo. Dessa base de dados resultou um conjunto de estatísticas de incidentes, contemplando factores como o tipo de barragem (de betão/alvenaria ou de aterro), a sua altura e o seu ano de construção. Essas estatísticas revelaram que as barragens de aterro correspondiam a cerca de 3/4 da totalidade das barragens existentes, sendo que destas cerca de 90% correspondiam a barragens de terra e 10% a barragens de enrocamento. A probabilidade anual de rotura de uma barragem de aterro foi estimada em 9×10^{-5} .

Foster *et al.* (2000a) realizaram uma análise estatística extensa de incidentes em barragens de aterro, envolvendo, em especial, modos rotura estruturais relacionados com a erosão interna, o galgamento, a instabilidade dos maciços ou induzidos por acção de sismos. Neste estudo são apresentados detalhes, como o zonamento da barragem, a presença ou a ausência de filtros, a

geologia da fundação e as características dos materiais utilizados nos aterros, tais como a origem geológica do material do núcleo, a sua classificação geotécnica e sua compactação.

Essa análise estatística revela que, historicamente, cerca de 0,5% (1 em 200) das barragens de aterro ruíram devido a erosão interna e 1,5% (1 em 60) tiveram incidentes dessa natureza. Dessas roturas e acidentes, a incidência de erosão interna através do aterro é cerca de duas vezes maior do que através da fundação e muito superior à erosão interna do aterro para a fundação. A grande maioria das roturas por erosão interna, independentemente da sua tipologia, ocorreu durante a fase de primeiro enchimento e, pelo menos, dois terços das roturas ocorreram até aos primeiros cinco anos de exploração da barragem. Foi observada uma forte influência da existência de condutas na probabilidade de ocorrência de erosão interna através do aterro. No universo de todas as ocorrências de erosão interna através do aterro, quase metade das roturas e cerca de um quarto dos acidentes estão associados à presença de condutas.

Foi igualmente concluído que a probabilidade de rotura por erosão interna é fortemente depende do tipo de concepção e da idade da estrutura. As frequências médias mais elevadas de rotura por erosão interna através do aterro e através da fundação tendem a estar associadas às barragens com tipos de zonamento com menos controle inerente da percolação no aterro e na fundação. As barragens com estas características são, principalmente, as barragens de terra homogêneas, com dreno de pé de jusante, com cortina a montante e com núcleo de argila e areia. Aproximadamente 30% dos acidentes que envolveram erosão interna através do aterro ocorreram em barragens sem quaisquer filtros e, nos acidentes em que estes estavam presentes, o seu início deveu-se a uma inadequação dos materiais empregues ou à sua incorrecta colocação. As barragens que reúnam uma conjunção de factores, como a ausência de um controlo da compactação e um limitado controlo da percolação (mediante a ausência de filtros) têm maior probabilidade de sofrer incidentes por erosão interna através do aterro.

Em particular, as barragens de aterro com zonas de enrocamento a jusante têm uma reduzida incidência de rotura. Nas barragens zonadas de enrocamento com núcleo central de terra foi observado um grande número de acidentes (sem rotura) envolvendo erosão interna, indicando que nestas barragens, uma vez iniciado o fenómeno, a probabilidade de progressão para formação de brecha é bastante reduzida (Foster *et al.* 2000a).

2. PROCESSO DE EROSÃO INTERNA NUM CONTEXTO DE ANÁLISE DE RISCOS

Recentemente, o grupo europeu de trabalho (EWG – *European Working Group*), criado pela ICOLD para o estudo da temática da erosão interna em barragens de aterro e suas fundações, estabeleceu uma linha de orientação para a realização de análises de riscos relativas a processos de erosão interna que conduzam à rotura de barragens de aterro. Na Figura 1 identificam-se as oito etapas fundamentais (DTK 2007).

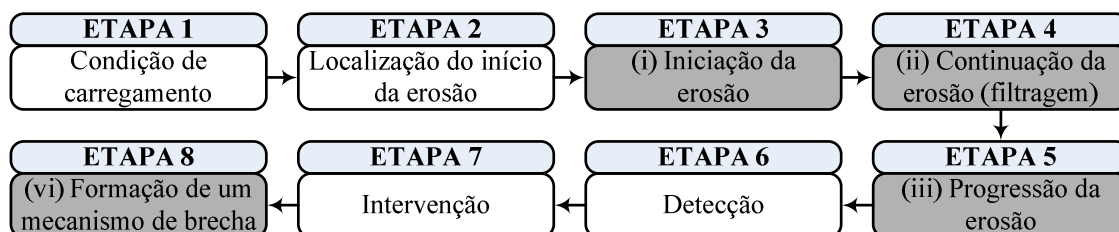


Figura 1 – Etapas para a realização de análise de riscos de erosão interna em barragens de aterro

Foster *et al.* (2000b) identificam as etapas 3, 4, 5 e 8 desta Figura como as quatro fases fundamentais do processo de erosão interna em barragens de aterro e suas fundações: (i)

iniciação da erosão, (ii) continuação da erosão ou filtragem, (iii) progressão da erosão e (iv) formação de brecha.

Nos capítulos seguintes são identificados os principais factores que influenciam a ocorrência de cada uma dessas quatro fases.

3. INICIAÇÃO DE EROSÃO INTERNA

A fase de iniciação de erosão interna corresponde à primeira fase do processo de erosão interna, em que ocorre um fenómeno de separação das partículas. São definidos quatro fenómenos de iniciação: *erosão em fugas concentradas*, *erosão regressiva*, *sofusão* e *erosão de contacto entre solos*. Na sequência apresentam-se os principais factores que influenciam a susceptibilidade de ocorrência de cada um desses fenómenos de iniciação.

Erosão em fugas concentradas: *Pode ocorrer numa fissura existente no núcleo argiloso do aterro da barragem ou na sua fundação. Os factores que mais contribuem para o aparecimento de fissuras são os assentamentos diferenciais, os ciclos de secagem e molhagem, os ciclos de gelo e degelo, a fracturação hidráulica ou a elevada permeabilidade no aterro ou na fundação.*

Um caminho preferencial de percolação poderá ainda dever-se a vazios existentes no aterro, ao longo do contacto com uma parede de betão ou com uma conduta ou à formação de vazios interligados que atravessam todo o aterro, resultado, por exemplo, de compactação insuficiente ou desadequada. Sêco e Pinto (1983) destacou 17 diferentes factores que contribuem para formação de fissuração no núcleo, embora existam inter-ligações entre os mesmos.

Erosão regressiva: *Com início numa zona de escoamento livre e sem filtros à saída do escoamento, no aterro ou na fundação, envolve a separação e o arrastamento para jusante de partículas de solo, de modo progressivo e regressivo (no sentido de jusante para montante).*

Os gradientes hidráulicos, assim como as velocidades de percolação, devem ser suficientemente elevados para separar as partículas na fronteira de saída do escoamento. Se o aterro for homogéneo, o processo evolutivo continua até se formar um tubo que atinge a albufeira, ocorrendo o fenómeno de erosão tubular (“*piping*”). Se o aterro for heterogéneo, a erosão regressiva pode cessar numa zona de gradientes hidráulicos menores. A erosão tubular por erosão regressiva pode desenvolver-se após o início de sofusão.

Sofusão: *A sofusão consiste numa erosão selectiva de partículas finas, contidas no interior de uma matriz de partículas mais grosseiras (partículas estruturais). As partículas mais finas atravessam os vazios existentes entre as partículas maiores, deixando intacto um esqueleto de solo formado pelas partículas mais grosseiras. Os solos susceptíveis a sofusão são usualmente referidos como solos internamente instáveis.*

Uma barragem de aterro pode apresentar sinais de sofusão durante décadas sem demonstrar um agravamento significativo das suas condições de estabilidade. Os materiais finos, que migram para jusante, podem acumular-se em zonas adjacentes a elementos drenantes. A distribuição granulométrica do material estruturante, que tenha sofrido arrastamento de partículas finas, pode actuar como filtro do solo a montante, diminuindo a rapidez de progressão fenómeno. A permeabilidade aumenta ao longo do tempo, mas a estrutura e a resistência do material podem manter-se praticamente inalteradas durante muito tempo. Os solos mais susceptíveis a sofrerem sofusão apresentam granulometria extensa, grosseira, com cauda relativa aos materiais finos praticamente horizontal e granulometria descontínua (p.ex. com ausência da fracção granulométrica com dimensão de areia). O resultado de um processo prolongado de sofusão traduz-se num abatimento (ou depressão) observável à superfície (“*sinkhole*”).

Iniciação por erosão no contacto entre solos: *Consiste numa erosão selectiva de partículas finas em contacto com um estrato ou uma camada de material mais grosseiro. Este tipo de erosão desenvolve-se numa interface entre materiais de granulometria contrastante sujeita ao efeito do escoamento. A erosão na interface entre diferentes solos ocorre com escoamento na direcção paralela à interface entre solos.*

Em barragens de aterro, a erosão no contacto entre solos pode ocorrer por arrastamento de material do aterro para um estrato da fundação de material mais grosseiro ou por erosão de um solo fino na fundação para um substrato mais grosseiro.

4. CONTINUAÇÃO DA EROSÃO (FILTRAGEM)

O desenvolvimento de processos de erosão interna, que culminam na rotura da barragem, é muitas vezes imputado à ausência de qualquer tipo de filtros, nomeadamente, filtros chaminé, no interior do aterro, e filtros na interface entre o aterro e a fundação. A continuação da erosão interna, em solos susceptíveis a um qualquer fenómeno de iniciação, pode ser evitada através da consideração de filtros granulares adequados em zonas de transição, onde se podem desenvolver gradientes hidráulicos importantes.

A presença de filtros, dimensionados de acordo com critérios actuais, podem parar eficazmente o processo de erosão interna, sem que este se desenvolva muito, através da retenção das partículas finas arrastadas e da cicatrização de fugas concentradas de água (Sherard e Dunnigan 1989). Porém, filtros que não satisfaçam adequados critérios de dimensionamento ou que tenham sofrido segregação durante a construção podem conduzir à continuação do processo de erosão interna.

Os filtros granulares para retenção de materiais finos são dimensionados, principalmente, através da aplicação de critérios empíricos que têm sido propostos por diferentes investigadores. Estes critérios foram obtidos através da correlação entre parâmetros de diferentes materiais de filtro e materiais de base (solos que se pretendem proteger), que produzam comportamentos satisfatórios quando ensaiados, em laboratório, sob condições extremas. Na sequência apresentam-se os cinco critérios básicos de dimensionamento de filtros em barragens de aterro (com base em ICOLD 1994, Mínguez *et al.* 2006).

Critério de Retenção: *Os filtros devem ser suficientemente finos para que os interstícios entre as partículas do filtro possam reter parte das partículas de maior dimensão do solo de base.*

O critério de retenção de solos não granulares, mais geralmente aceite, foi proposto por Sherard e Dunnigan (1989) e pelo USBR (2004), que classifica os solos de base em quatro grupos, de acordo com a percentagem da sua fracção fina. Estes critérios foram baseados em ensaios realizados em amostras nas quais foi previamente executado um pequeno orifício central, por onde se fez passar um fluxo concentrado de água a alta pressão (“*no erosion test*”). Sherard e Dunnigan (1989) designaram estes materiais de protecção contra a erosão de “filtros críticos”.

Maranha das Neves (1991) desenvolveu, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), um ensaio laboratorial inovador, que designou por “ensaio de erosão de fissuras”, que simula o escoamento através de uma fissura no núcleo de uma barragem de aterro, permitindo a observação directa da erosão da parede da fissura durante a ocorrência do fenómeno. Neste ensaio é feito passar um fluxo de água entre a superfície rectangular de uma amostra de solo semi-cilíndrica e uma placa de *perspex*. A jusante da amostra de solo encontra-se um filtro granular. Este ensaio permite avaliar a erosão da fissura e o correspondente comportamento do filtro. Os ensaios, realizados no LNEC com este equipamento, permitiram confirmar os resultados obtidos por Sherard (*op. cit.*). Refira-se, ainda, que esses ensaios foram conduzidos

em condições menos conservativas, comparativamente com aquelas estudadas por Sherard (*op. cit.*), isto é, com muito menores velocidades de percolação e com duração do ensaio muito mais longa, dificultando, assim, a promoção da auto-filtragem (cicatrização da fissura).

Foster e Fell (2001) recomendam modificações aos critérios de Sherard e Dunnigan (1989) para solos de base dispersivos, indicando filtros mais finos para este tipo de solos.

Vaughan e Soares (1982) apresentaram uma abordagem de dimensionamento de filtros não convencional, que se baseia no princípio que o filtro deverá reter o material de menor dimensão que possa ser erodido das paredes de uma potencial fissura no núcleo. Esta abordagem sugere que as características de retenção de um filtro podem ser descritas, com maior generalidade, através da sua permeabilidade do que pela sua granulometria, e relaciona a permeabilidade do filtro com a mínima dimensão do floco de argila do solo de base que pode ser arrastado. Estes filtros são designados por “filtros perfeitos”. Em geral, em comparação com os “filtros críticos”, os “filtros perfeitos” resultam em materiais de granulometria mais fina e com mais camadas de transição (filtros de camadas múltiplas).

Critério de permeabilidade: *Os filtros devem ser suficientemente grosseiros para permitir a água de percolação passe através do filtro, evitando a instalação de elevadas pressões intersticiais e de elevados gradientes hidráulicos.*

As permeabilidades do filtro e do solo de base a reter são usualmente consideradas empiricamente através de correlações considerando as suas distribuições granulométricas. Como exemplo, Veiga Pinto (1984) apresenta um estudo, realizado no LNEC, no qual através de ensaios laboratoriais e de ensaios de campo, analisa a variação do coeficiente de permeabilidade do filtro da barragem de Beliche com a percentagem da sua fracção fina.

Critério de uniformidade: *A granulometria dos filtros deverá ser suficientemente uniforme para assegurar que, com uma qualidade de construção apropriada, o material in situ não sofra segregação durante o manuseamento, a colocação, o espalhamento e a compactação.*

O USACE (1955) recomenda que os filtros não devem ter coeficientes de uniformidade, C_u , superiores a 20. Porém, outros autores afirmam que o critério baseado unicamente no C_u não é fiável, dado que não considera as partículas com dimensão superior a D_{60} , que são, justamente, aquelas que podem sofrer mais problemas de segregação. Ripley (1986) propõe regras para a curva de distribuição granulométrica dos filtros para minimizar a sua segregação.

Critério de auto-estabilidade: *A fracção mais grosseira dos filtros deve respeitar o critério de retenção relativamente à sua fracção mais fina. O filtro não deve ser susceptível a sofusão (i.e., internamente instável). Kenney e Lau (1985), com base num estudo experimental, consideraram que os três principais factores que afectam a estabilidade interna são: a granulometria das partículas, a compactidade relativa e as condições de transporte. Estes autores propuseram uma fronteira entre solos instáveis e solos estáveis, para materiais granulares, examinando as curvas de forma das amostras (Kenney e Lau 1985, 1986).*

Critério de material granular: *Os filtros devem ser materiais granulares para não se formarem fissuras, mesmo em zonas adjacentes ao núcleo onde este possa ter sofrido fissuração. Um filtro ideal não deve ter a capacidade de cimentar devido a fenómenos químicos, biológicos ou físicos. A maioria dos critérios considera que um filtro não deve conter mais de 5% de material fino (passado no peneiro nº. 200) e que esse material fino não deve ser plástico. No entanto, investigações recentes consideram esse critério demasiado conservativo (Park *et al.* 2006). Fell e Fry (2007) consideram que filtros com mais de 12% de finos, não plásticos, têm elevada probabilidade de sustentar uma fissura, pelo menos em condições não saturadas. Vaughan (*op. cit.*) sugere a condução de “ensaios de castelo de areia” para avaliar a coesão dum filtro.*

5. PROGRESSÃO DA EROÇÃO

A progressão da erosão está associada ao aumento de uma área afectada por erosão interna e ao aumento das pressões intersticiais e dos caudais percolados. Normalmente esta fase está associada ao desenvolvimento de uma erosão tubular através do aterro ou da sua fundação.

A progressão da erosão no aterro depende de dois factores fundamentais: da capacidade do tubo permanecer aberto, sem colapsar, durante tempo suficiente para o seu alargamento, e da susceptibilidade do tubo sofrer erosão (taxa de erosão). No Quadro 1 apresentam-se os aspectos que influenciam a probabilidade de progressão da erosão no aterro.

No caso da progressão da erosão na fundação, há ainda a acrescentar, como factores que influenciam a capacidade do tubo não colapsar, a estratigrafia da fundação, bem como o tipo material de fundação. Um estrato coesivo ou uma estrutura rígida, como um descarregador de cheias ou uma conduta, sobrejacente ao material que sofre erosão, poderá facilitar a progressão da erosão na fundação. Materiais bem graduados sobrejacentes aos materiais erodidos podem preencher o tubo induzido pela erosão e contribuir para a colmatação da erosão.

Quadro 1 – Identificação dos aspectos que influenciam a progressão da erosão no aterro

Aptidão para o tubo não colapsar	Taxa de erosão
<ul style="list-style-type: none">- Percentagem da fracção fina- Características de compactação do núcleo (solos compactos <i>versus</i> solos não compactos)- Teor em água na zona de formação do tubo- Condições de tensão (cota a que se desenvolve a erosão tubular)- Distribuição granulométrica (solos bem graduados <i>versus</i> solos de granulometria uniforme)- Tipo de exploração da albufeira (sazonal ou plurianual)	<ul style="list-style-type: none">- Restrição ao escoamento (tipo de zonamento e presença de filtros a montante – <i>crack stoppers</i>)- Erodibilidade dos materiais, dependente da tensão de corte crítica (mínima tensão de corte para se iniciar a erosão no interior do tubo)- Gradientes hidráulicos críticos

6. MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE BRECHA

Esta constitui a última fase dum processo de erosão interna. Em geral, considera-se que se pode formar um de quatro mecanismos de brecha (Figura 2): (a) alargamento excessivo de um tubo de erosão, (b) instabilidade do talude de jusante (devido ao aumento das pressões intersticiais), (c) galgamento por perda de folga (devido a assentamento do aterro) e (d) destacamento de material do talude de jusante.

O *alargamento excessivo de um tubo de erosão* é influenciado, principalmente, pelo tipo de zonamento da barragem e pelas características da zona a jusante do núcleo. Em geral, as barragens homogéneas têm maior capacidade de suportar um tubo de grandes dimensões sem colapsar, dada a natureza dos materiais aplicados nesse tipo de barragem. Reciprocamente, as barragens de aterro zonado, em particular com maciços estabilizadores em enrocamento, são menos susceptíveis à formação de brecha devido à incapacidade do enrocamento sustentar um tubo e à sua elevada capacidade de descarga. O volume armazenado na albufeira é um factor igualmente importante. Para valores relativamente reduzidos, a albufeira pode ser esvaziada através do tubo antes da formação da brecha.

As barragens mais susceptíveis a *instabilidade do paramento de jusante*, devido a fenómenos de erosão interna, apresentam como características principais: um sistema de drenagem interno com uma reduzida capacidade de descarga ou uma zona a jusante muito pouco permeável, e uma segurança marginal ao escorregamento do talude de jusante. Os materiais de alta plasticidade são considerados os mais adversos, pois têm, relativamente aos solos de baixa plasticidade, uma menor resistência ao corte e, principalmente, uma grande sensibilidade. Os principais factores que influenciam nestas condições a formação de brecha são: a cota da

albufeira, a perda de folga causada pelo escorregamento, a largura do coroamento e a presença de materiais com grande diminuição de resistência ao corte quando mobilizadas grandes deformações. As barragens de terra homogêneas e barragens sem zonas significativas em enrocamento a jusante são mais susceptíveis a desenvolverem instabilidade do maciço de jusante com formação de brecha.

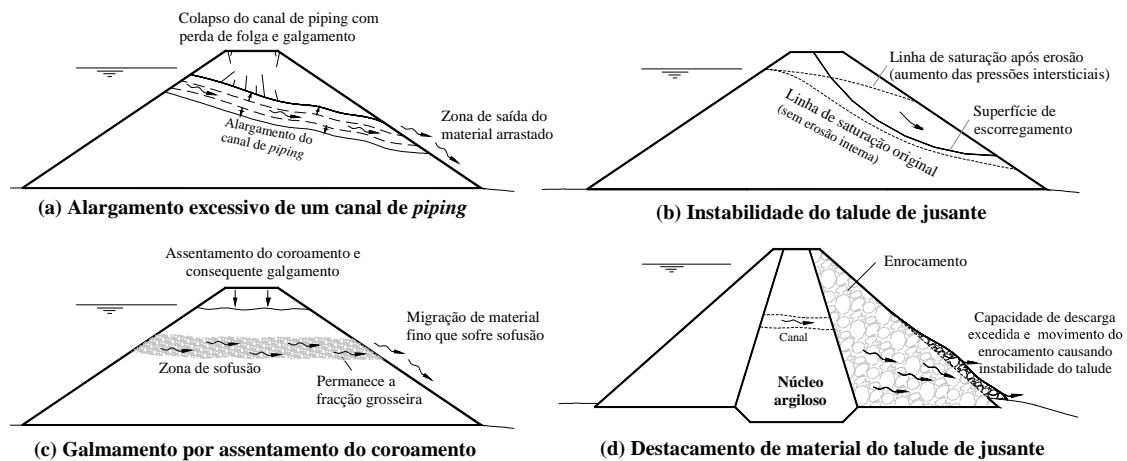


Figura 2 – Mecanismos de formação de brecha (adaptado de Fell e Fry 2007)

As barragens mais susceptíveis a *galgamento por perda de folga* são aquelas com coroamento relativamente estreito e com reduzidas folgas. Em geral, a formação de abatimentos à superfície, em resultado de fenómenos de sofusão, não resulta em brecha, caso sejam tomadas medidas correctivas adequadas e atempadas. Caso contrário, a acção erosiva da água na base do abatimento pode provocar o progressivo colapso das suas paredes, em direcção a jusante, formando uma brecha. As medidas de reabilitação podem passar pela colocação de material no talude de jusante e/ou pelo preenchimento do abatimento com material de aterro adequado.

O mecanismo de formação de brecha por *destacamento de material do talude de jusante* envolve uma erosão progressiva da superfície do talude de jusante na zona de saída do escoamento. É mais relevante em barragens com zonas permeáveis a jusante do núcleo, incapazes de suportar o tubo de erosão aberto, ou seja, com maciço de jusante em areia, em cascalho ou em enrocamento. A probabilidade de ocorrência deste mecanismo é baixa, especialmente, em barragens com zonas a jusante em enrocamento, devido à grande capacidade de descarga destes materiais.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existe um potencial de rotura de barragens de aterro por formação de brecha devido a erosão interna, em especial, mas não exclusivamente, em barragens antigas e de dimensionamento incerto. A rotura poderá ocorrer num curto período de tempo e sem sinais visuais significativos, antes da detecção de erosão tubular. Uma monitorização corrente poderá não ser suficiente para detectar atempadamente todos os possíveis fenómenos de erosão interna no aterro e na fundação. Em barragens importantes recomenda-se que a sua monitorização tenha em conta adicionalmente o risco de erosão interna. Em caso de suspeita de problemas poderão ser conduzidas investigações não destrutivas a nível global (métodos geofísicos) para detectar eventuais zonas deficientes e avaliar qual a sua extensão. A medição distributiva de temperatura por fibras ópticas é um método adequado para detectar este tipo de problemas, permitindo medições, em tempo real, numa vasta área. Alguns países Europeus utilizam em barragens de aterro recentes a monitorização de temperatura por fibras ópticas por controlo remoto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Professor Emanuel Maranha das Neves pela leitura rigorosa e crítica do artigo e pelas suas valiosas sugestões.

REFERÊNCIAS

- DTK (2007). *Assessment of the risk of internal erosion of water retaining structures: dams, dykes and levees. Symposium on 17-19 September 2007 in Freising, Germany*, German National Committee on Large Dams (Deutsches TalsperrenKomitee).
- Fell, R., e Fry, J.-J. (2007). *The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations*, In *Internal erosion of dams and their foundations*, Taylor and Francis, Aussois (France).
- Foster, M., e Fell, R. (2001). *Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(5): 398-407.
- Foster, M., Fell, R., e Spannagle, M. (2000a). *The statistics of embankment dam failures and accidents*, *Canadian Geotechnical Journal*, **37**: 1000-1024.
- Foster, M., Fell, R., e Spannagle, M. (2000b). *A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping*, *Canadian Geotechnical Journal*, **37**: 1025-1061.
- ICOLD (1994). *Embankment dams - Granular filters and drains. Bulletin 095-1994*, In ICOLD. International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris.
- ICOLD (1995). *Dam failures statistical analysis. Bulletin 099-1995*, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris.
- Kenney, T.C., e Lau, D. (1985). *Internal stability of granular filters*, *Canadian Geotechnical Journal*, **22**: 215-225.
- Kenney, T.C., e Lau, D. (1986). *Internal stability of granular filters: Reply*, *Canadian Geotechnical Journal*, **23**: 420-423.
- Maranha das Neves, E. (1991). *Comportamento de barragens de terra-enrocamento*, PhD, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia (UNL - FCT), Lisboa, 371.
- Mínguez, R., Delgado, F., Escuder, I., e Membrillera, M.G.d. (2006). *Reliability assessment of granular filters in embankment dams*, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **30**(10): 1019-1037.
- Park, Y., Brandon, T.L., e Duncan, J.M. (2006). "Filter performance test for embankment dams containing cracks", *Proc.*, 22nd ICOLD Congress on Large Dams, Barcelona, Spain, 18-23 June, International Commission on Large Dams, Vol.3, pp. 307-317.
- Ripley, C.F. (1986). *Discussion: Internal stability of granular filters by T. C. Kenney and D. Lau*, *Canadian Geotechnical Journal*, **23**(2): 255-258.
- Sêco e Pinto, P.S. (1983). *Fracturação hidráulica em barragens de aterro zonadas*, Tese para especialista, LNEC, Lisboa.
- Sherard, J.L., e Dunnigan, L.P. (1989). *Critical filters for impervious soils*, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **115**(7): 927-947.
- U.S. Army Corps of Engineers (1955). *Drainage and erosion control - sub-surface drainage facilities for airfields*, In Part XIII, Chapter 2, Engineering Manual, Military Construction, Washington, D.C.
- USBR (2004). *Design Standard No 13, Protective filters*, US Bureau of Reclamation, Denver.
- Vaughan, P.R., e Soares, H.F. (1982). *Design of filters for clay cores of dams*, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **108**(GT1): 17-31.
- Veiga Pinto, A. (1984). *Barragem de Beliche. Aterros experimentais e estudo dos filtros*. LNEC, Relatório 240/84 - NF.