

## PONTO DA SITUAÇÃO SOBRE BARRAGENS DE ATERRO



**E. MARANHA das NEVES**  
Professor Catedrático Jub.  
Instituto Superior Técnico  
Lisboa - Portugal



**LAURA CALDEIRA**  
Investigadora Coordenadora  
Lab. Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa - Portugal

### SUMÁRIO

O tema proposto para tratar nesta conferência e o facto de ela pretender debruçar-se sobre os “Aproveitamentos hidroeléctricos em Portugal. Um novo ciclo”, transporta-nos para uma realidade que não se pode ignorar: em Portugal não se constroem barragens de aterro para produção de energia eléctrica. Trata-se, como se mostrará de seguida, de uma singularidade a nível internacional. O presente trabalho debruça-se sobre as prováveis explicações para este facto.

### 1. INTRODUÇÃO

O trabalho tece diversas considerações sobre o facto de em Portugal não se construírem barragens de aterro para produção de energia eléctrica. Trata-se, como se mostrará de seguida, de uma situação que não tem paralelo a nível mundial. Por tal motivo são procuradas possíveis explicações. Após uma breve incursão histórica, apresenta-se um panorama nacional e internacional no que respeita às actuais capacidades de análise da segurança estrutural de barragens de aterro. Finalmente deixa-se uma interrogação: no anunciado do novo ciclo de construção de barragens dedicado à energia será seguido à risca o figurino anterior no que respeita às soluções estruturais a adoptar?

*“Com a realização deste seminário pretendeu o LNEC uma divulgação e discussão dos conceitos modernos dos enrocamentos, bem como a sua utilização em obras de engenharia, designadamente as barragens de aterro. Porque, ao contrário do que sucede em tantos países, não se construiu ou projectou em Portugal, nos últimos 20 anos, qualquer obra significativa em que os referidos enrocamentos fossem incorporados através do recurso a tecnologias construtivas evoluídas, julgou-se ser esta uma das vias para analisar e eventualmente, contribuir para uma mudança da situação. Lisboa, Outubro de 1978”.*

Da nota inicial do Seminário sobre enrocamentos organizado pelo LNEC em Lisboa e no Porto, na Ordem dos Engenheiros.

## **2. A REALIZAÇÃO EM PORTUGAL DE BARRAGENS DE ATERRO PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA**

O ponto da situação é muito breve. Até hoje, em Portugal, construíram-se apenas três barragens de aterro para produção de energia eléctrica: Paradela (1956), pela Hidro-Elétrica do Cávado, Vilar (1965), pela Hidro-Elétrica do Douro, e Lagoacho (1993), pela EDP.

A barragem de Paradela, no rio Homem, era e ainda é, a de maior altura do seu tipo no mundo (110 m). Trata-se de uma solução em enrocamento lançado, com cortina a montante de betão armado com juntas verticais e horizontais. O maciço de enrocamento foi construído por lançamento de blocos de granito (aproveitando a energia de queda para efeito de compactação) em camadas que atingiam cerca de 20 m de altura. O material foi sujeito à acção de jactos de água durante o lançamento. O dimensionamento das lajes de betão armado baseou-se em métodos empíricos e sobretudo na experiência com obras semelhantes, como é o caso das barragens americanas de Salt Springs (100 m) e Bear River (73 m). Como é sabido, esta obra sofreu assentamentos devido a fluência que afectaram a estanquidade da cortina de betão, pelo que foi necessário efectuar reparações no sentido de melhorar a sua funcionalidade relativamente a esse comportamento. Com o aparecimento dos cilindros vibradores em meados dos anos 50, estas soluções em enrocamento lançado caíram obviamente em desuso.

A barragem de Vilar, no rio Távora, é também de enrocamento lançado e com cortina de betão armado a montante. É a segunda barragem e última do seu tipo realizada no nosso país. Tem-se comportado bem e sem os problemas referidos a propósito de Paradela, o que não admira sabendo-se que a fluência depende, entre outros factores, do estado de tensão. Ora Vilar tem apenas 58 m de altura.

A barragem de Lagoacho, no Covão do Urso, é uma barragem de altura relativamente reduzida (38 m) e constitui já uma solução moderna de enrocamento compactado com cortina de betão armado a montante, apenas com juntas verticais (Figura 1). A sua análise estrutural baseou-se

já em equações constitutivas capazes de modelar adequadamente o comportamento da barragem. O seu desempenho tem sido normal.

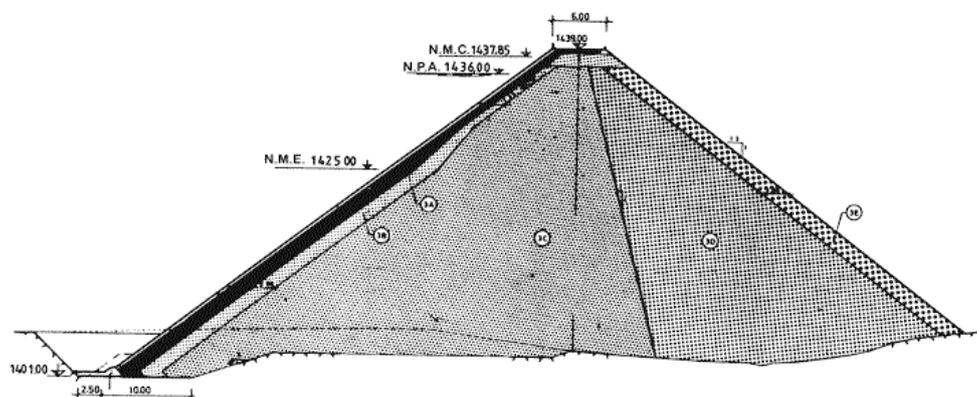


Figura 1: Barragem do Lagoacho. Perfil transversal da barragem de enrocamento compactado com cortina de betão a montante.

### 3. COMPARAÇÃO COM A SITUAÇÃO NO DOMÍNIO DAS BARRAGENS PARA REGA E ABASTECIMENTO DE ÁGUA

As entidades promotoras de barragens para estes fins e que podem fazer o contraponto com as concessionárias dos aproveitamentos hidroeléctricos foram sucessivamente a Junta Autónoma das Obras de Hidráulica Agrícola (JAOHA), a Direcção Geral dos Serviços Hidráulicos (DGSH), a Direcção Geral dos Recursos Naturais (DGRN) e, actualmente, o Instituto Nacional da Água (INAG).

Estas entidades tanto optaram por soluções em aterro como por soluções em betão, ou até, nalguns casos, por soluções mistas. Começaram por executar internamente os projectos e mais tarde, com o desenvolvimento de apreciáveis capacidades nos gabinetes privados de projecto, foram estes que passaram a projectar as barragens. Tal significa que, no domínio das barragens de aterro, as capacidades de projecto nunca deixaram de estar presentes no nosso país.

De salientar a permanente colaboração com os Departamentos de Geotecnia, de Hidráulica e de Barragens de Betão (Fundações) do LNEC quando se tratava de barragens de aterro. No que respeita à EDP, excepto num caso que se descreve a seguir (barragem do Lagoacho), nunca se estabeleceu qualquer colaboração com o Departamento de Geotecnia do LNEC, o mesmo tendo sucedido com as anteriores concessionárias.

A única excepção, do nosso conhecimento, foi a atrás referida barragem de Lagoacho, em que a Direcção de Produção do Centro da EDP, solicitou aos Departamentos de Geotecnia e de Hidráulica do LNEC, em 1984, elementos sobre uma solução de enrocamento com cortina de betão a montante (envolvendo aspectos de identificação de materiais, de fundação, de órgãos

hidráulicos e de natureza construtiva) para os estudos prévios para tomada de decisão sobre o tipo de solução estrutural a adoptar [1]. A solução adoptada veio a ser em enrocamento com cortina de betão a montante, tendo a obra sido completada em 1993, com projecto de execução, assistência técnica e elaboração do plano de observação da Hidrotécnica Portuguesa.

#### **4. A SITUAÇÃO EM PORTUGAL**

De acordo com a informação disponível no sítio do INAG, existem em Portugal, em Dezembro de 2009, 167 grandes barragens (grande barragem de acordo com a definição do Regulamento de Segurança de Barragens). Nos últimos 40 anos construíram-se 32 barragens de altura igual ou superior a 40 m, com a seguinte distribuição:

- a) Número de barragens para produção de energia: 17 de betão.
- b) Número de barragens para outros fins: 2 de betão e 13 de aterro.

Adoptou-se a altura de 40 m porque se admite que, em termos estruturais, as barragens de altura inferior não levantam normalmente grandes problemas. Além disso não há barragens de aterro de altura inferior a 40 m para produção de energia. O período de 40 anos, portanto com início em 1970, corresponde a uma fase de grande crescimento dos conhecimentos no que respeita ao dimensionamento de barragens. Mas adoptando 50 anos, isto é, barragens construídas a partir de 1960, o panorama era idêntico (naturalmente com mais barragens).

Confirma-se assim o caso específico português: não se constroem barragens de aterro para produção de energia.

#### **5. QUE RAZÕES PODEM LEVAR A UMA REJEIÇÃO SISTEMÁTICA DA SOLUÇÃO EM ATERRO DURANTE OS ÚLTIMOS 40 ANOS?**

Podem descortinar-se duas razões principais para uma escolha praticamente exclusiva de soluções em betão para barragens para a produção de energia, as quais se indicam e desenvolvem de seguida.

##### **5.1 Os projectistas e os donos de obra tendem a optar pelas soluções que melhor dominam**

Na realidade esta pode ser uma razão muito importante. Segundo Boffil [2], a escolha do tipo de barragem não é uma ciência exacta. Há muitos factores a considerar e a avaliar e ocorrerão sempre algumas áreas de incerteza. A decisão final recai, geralmente, no engenheiro que executa o projecto ou que aceita um dado projecto, e baseia-se nos seus próprios critérios e experiência. Em muitos casos, o procedimento para determinar o projecto mais económico que satisfaça os requisitos técnicos é iterativo ou, no mínimo, implica a definição de algumas soluções típicas e do respectivo custo aproximado. Esta parece ser uma explicação que se adapta ao caso português.

## 5.2 As barragens de betão seriam “mais seguras” que as de aterro

É hoje possível avaliar a segurança relativamente a estados limites últimos e verificar os estados limites de utilização em qualquer tipo de barragem: de aterro, de alvenaria, de betão e de betão compactado. Mas a história para se atingir este objectivo foi muito diferente, principalmente entre as barragens de aterro (as mais antigas) e as barragens de betão, de alvenaria e de betão compactado (este último tipo, o mais recente). No que se segue, por razões óbvias, concentra-se a nossa atenção unicamente nas barragens de aterro e de betão.

As equações constitutivas usadas no cálculo das primeiras barragens de betão correspondiam às de um comportamento elástico linear. A análise da estabilidade, onde a resistência desempenha um importante papel, baseava-se no conceito das tensões admissíveis, não sendo portanto possíveis cálculos à rotura. Mas o mesmo modelo permitia o cálculo das deformações se fosse garantido o regime elástico da estrutura. Todos os conceitos mecânicos básicos para estes procedimentos tinham sido estabelecidos muito antes do surgimento das barragens de betão, desde Hooke (séc. XVII), passando por St. Venant, Poisson, Navier e Mohr (sécs. XVIII e XIX), entre outros.

No que respeita às barragens de aterro, construídas desde a Antiguidade, estas só puderam ser avaliadas quanto à sua segurança por análises à rotura, baseadas em conceitos estabelecidos no século XVIII (Coulomb). O modelo constitutivo era rígido perfeitamente plástico, logo sem possibilidade de cálculo de deformações. E mesmo no que respeita aos cálculos à rotura, com um grande inconveniente: só era aplicável a comportamentos drenados, facto que não foi então reconhecido e de que resultaram inúmeros acidentes, inexplicáveis na altura. Esta questão, que radica na natureza bifásica dos solos (partículas sólidas e água, no caso de saturação), só veio a ser esclarecida com a formulação do princípio das tensões efectivas por Terzaghi, em 1925. Assim, só na primeira metade do séc. XX foi possível avaliar a segurança à rotura por deslizamento no corpo da barragem com base em conceitos de comportamento mecânico dos solos bem fundamentados.

Pretende-se, assim, pôr em evidência a ilegitimidade de transpor para a actualidade ou para tempos muito recentes, comparações entre a segurança de barragens de aterro e de betão baseadas numa comparação das respectivas probabilidades de rotura fundamentadas numa análise histórica desses acontecimentos. Os universos em termos dos conhecimentos científicos que alicerçavam as práticas de engenharia de barragens de terra e de betão eram muito diferentes.

A situação modificou-se nos tempos mais recentes, pelo que é interessante descrever a situação com base no que foi a evolução nas capacidades de análise estrutural de barragens de aterro, com particular ênfase em Portugal.

### *Antes da difusão da Mecânica dos Solos em Portugal*

Como é sabido, o LNEC teve e tem um papel muito importante no que diz respeito às actividades relacionadas com o projecto, a construção e a observação de barragens. Pode mesmo dizer-se que a criação desta Instituição muito ficou a dever-se à necessidade de um

desenvolvimento científico e técnico neste domínio da engenharia face à premência de construir barragens por parte das Concessionárias Hidroeléctricas e da JAOHA. Nestas últimas entidades estava consubstanciada a capacidade que genericamente se pode designar por planejar, construir e explorar barragens.

Os principais objectivos a atingir com a construção dessas obras foram prioritariamente a produção de energia e a rega. Mais tarde, devido aos progressos económico e social resultantes da industrialização e das melhorias na agricultura impulsionados por essas obras, seguiu-se a construção de barragens para abastecimento de água às populações.

Ao historiar os progressos no domínio das barragens não se considera necessário, tendo em vista os objectivos deste trabalho, referir os aspectos relacionados com as barragens de betão em Portugal. É do conhecimento no meio técnico nacional e internacional o alto nível atingido em todos os domínios relacionados com as barragens de betão pela engenharia portuguesa.

Também no que diz respeito às estruturas hidráulicas associadas aos órgãos de segurança e exploração das barragens, a engenharia portuguesa teve sempre uma posição cimeira reconhecida internacionalmente. Trata-se de uma actividade comum a barragens de aterro e de betão, pelo que, mais uma vez devido aos objectivos deste trabalho, este tema é apenas referido.

As primeiras duas barragens de aterro dignas de nota, já que constituíram realizações muito importantes nessa altura, foram concluídas em 1949 no aproveitamento da bacia do Sado. Trata-se da barragem Pego do Altar (com 63 m de altura), constituída por um aterro de enrocamento lançado com uma cortina de chapas de aço inoxidável e juntas elásticas a montante, técnica que, tal como a protecção adoptada contra a corrosão, era muito engenhosa para a época. Esta barragem era à data a mais alta do mundo no seu tipo. Após 60 anos de funcionamento mantém um excelente comportamento.

A segunda barragem, de terra-enrocamento lançado, é a de Vale do Gaio (com 51 m de altura). O facto mais relevante é tratar-se da primeira barragem do mundo a usar uma cortina interior de betão betuminoso (situada entre os maciços terroso e de enrocamento). Também o comportamento desta barragem se mantém plenamente satisfatório. Referem-se estas duas obras pela época em que foram concebidas e executadas e pela grande capacidade de inovação revelada pela engenharia portuguesa de barragens de aterro (engenheiros da JAOHA). Pela sua dimensão é ainda de citar a barragem de Paradela, já referida em 2.

*A concepção já influenciada pela mecânica dos solos (ensinada na FEUP e no IST e investigada no LNEC)*

O período marcante seguinte tem a ver com o arranque do plano de rega do Alentejo (início da década de 60). As novas barragens de aterro então construídas, entre as quais se destaca a barragem de Santa Clara, com 86 m de altura, incorporaram aspectos relevantes no que respeita à caracterização dos materiais (realização de ensaios triaxiais de grande dimensão face à incorporação de xistos e grauvaques alterados nos aterros estabilizadores), ao projecto (concepção baseada na escola do USBR - “United States Bureau of Reclamation”), às técnicas

construtivas (uso, pela primeira vez na barragem de Santa Clara, de cilindros vibradores), ao controlo da compactação e da permeabilidade (introdução do método de Hilf e das determinações *in situ* da permeabilidade) e à observação do comportamento (medição das deformações verticais internas pelo sistema USBR e medição das pressões intersticiais na água nos aterros com células de corda vibrante).

No entanto, a avaliação da segurança limitava-se ao estado limite último correspondente a deslizamentos interessando o corpo da barragem (e eventualmente, a respectiva fundação), através de métodos de equilíbrio limite, aplicados sem recurso a cálculo automático, para as situações de construção, de pleno armazenamento (para o que se tornava necessário analisar, recorrendo a soluções gráficas, o correspondente escoamento da água, em regime permanente, através do corpo da barragem) e de esvaziamento brusco. Não era dado grande relevo aos filtros no que diz respeito à sua contribuição para a segurança. Estava fora de causa qualquer cálculo de deformações, especulando-se apenas, recorrendo a métodos empíricos, sobre os assentamentos a longo prazo.

#### *Os grandes progressos no domínio das relações constitutivas, dos métodos numéricos e das capacidades de cálculo*

Entretanto, iniciava-se um período de enormes avanços na caracterização dos geomateriais (através de ensaios *in situ* e em laboratório cada vez mais sofisticados), com vista à utilização de equações constitutivas só possíveis de ser úteis devido ao desenvolvimento de programas de cálculo e às capacidades informáticas que progrediam exponencialmente. Começavam a abrir-se as portas à verificação de estado limite de utilização nas barragens de aterro por determinação das deformações (em vez de recorrer a um coeficiente de segurança global, que implicava um nível de tensões suficientemente baixo para que as deformações, desconhecidas, não ultrapassassem os valores limites estabelecidos para a estrutura em causa).

#### *Os sistemas de filtragem e drenagem*

Igualmente no que diz respeito aos sistemas de filtragem e drenagem, os anos 80 viram estes órgãos assumir um papel na segurança das barragens de aterro que até aí nunca lhes tinha sido conferido. Passaram a ser considerados sistemas constituintes da primeira linha de defesa da estrutura tendo em vista a sua segurança. Esta atitude era o resultado de importantes estudos de aprofundamento do conhecimento dos materiais constituintes daqueles órgãos, principalmente os destinados a filtrar materiais de natureza argilosa [3 e 4]. Como resultado, há hoje um corpo de conhecimentos que permitiu elaborar princípios de dimensionamento amplamente consagrados em regras para esse fim. A própria estabilidade interna dos filtros (sem a qual se pode originar um processo particular de erosão interna denominado de sufusão) é matéria relevante, mas cujos princípios se encontram dominados.

#### *O dimensionamento sob acções sísmicas*

Não pode deixar-se de referir todo o progresso no que diz respeito à análise do comportamento estrutural de barragens de aterro resultante de acções sísmicas (não se particulariza todos os

mais recentes desenvolvimentos no que diz respeito à caracterização das acções sísmicas, por se tratar de matéria comum às barragens de betão e de betão compactado).

Inicialmente, seguindo os procedimentos correntes aplicados no dimensionamento de estruturas de edifícios e pontes, a avaliação da segurança de barragens de aterro em condições sísmicas era realizada através dos métodos habituais de análise estática, mediante a aplicação de cargas estáticas equivalentes à acção sísmica. Estas cargas eram calculadas multiplicando o peso próprio pelo coeficiente sísmico, em geral, definido como a razão entre a aceleração horizontal de pico no local de implantação da barragem e a aceleração da gravidade. Era, assim, desprezada a componente vertical da aceleração sísmica, bem como a alteração das propriedades dos geomateriais sob acções dinâmicas.

Os grandes avanços na caracterização do comportamento dinâmico, *in situ* e em laboratório, dos geomateriais envolvidos na construção de barragens de aterro (naturais ou fabricados) permitiram estudar, devidamente, a degradação das características de rigidez e de resistência, a forte geração de pressões intersticiais e a influência do amortecimento destes materiais sob acções sísmicas intensas [5], bem como a amplificação das acções sísmicas produzidas em barragens de aterro.

Numa primeira fase, a história das acelerações sísmicas, devidamente amplificadas, foi introduzida nos métodos de equilíbrio limite para a avaliação dos deslocamentos sísmicos permanentes, com a consideração de modelos constitutivos rígido-perfeitamente plásticos e do método do bloco deslizante de Newmark [6]. Não eram contudo, determinadas as deformações e as pressões intersticiais geradas durante a ocorrência dos sismos, sendo as análises realizadas em termos de tensões totais [7 e 8]. A Figura 2 apresenta as deformações permanentes devidas à acção sísmica, avaliadas na barragem do Alvito, com base em ensaios laboratoriais, recorrendo ao modelo linear equivalente [5].

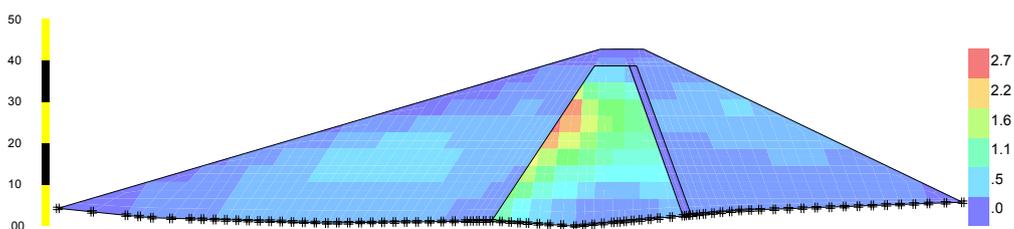


Figura 2: Deformações permanentes da barragem de aterro zonada do Alvito devido à acção sísmica, para o NPA [5].

A evolução natural passou pela adopção de análises dinâmicas acopladas de tensão-deformação, com modelos constitutivos elastoviscoplasticos adequados [5 e 9], as quais permitem a avaliação de todos os fenómenos presentes durante e após a ocorrência dos sismos, como a evolução espacial e temporal das deformações reversíveis e permanentes, das tensões efectivas e das pressões intersticiais geradas, bem como a eventual ocorrência de liquefacção local ou generalizada no corpo da barragem ou na sua fundação. Assim, é hoje possível quantificar parâmetros de equações constitutivas susceptíveis de permitir a previsão do

comportamento para todas as fases representativas da vida útil de qualquer barragem de aterro. Tal como para as acções estáticas, também neste caso ficaram para trás as práticas de dimensionamento apenas fundamentadas no recurso aos métodos de equilíbrio limite.

Será, contudo, de referir, que o desempenho sísmico de barragens de aterro actuais tem sido excelente, assinalando-se que, no passado, apenas foram detectadas deformações capazes de comprometer a sua segurança, quando constituídas por aterros hidráulicos (que desde há muito tempo não se utilizam), ou resistências mecânicas sísmicas muito diminutas, em fundações aluvionares com elevados índices de vazios.

#### *O uso dos enrocamentos compactados*

Atendendo ao importante uso dos enrocamentos compactados nas barragens de aterro, parece indispensável tecer algumas considerações sobre este material. Desde a sua introdução nas obras (na Europa, em primeiro lugar, por volta de 1955), os cilindros vibradores vieram permitir, entre aplicações a outros materiais, a compactação de aterros de enrocamento. Este facto introduziu uma alteração radical, pois passava-se dos aterros de enrocamento lançado, caso das barragens de Paradela e de Vilar, para o enrocamento compactado, caso da barragem de Lagoacho (para falar apenas de aproveitamentos hidroeléctricos). A principal e importantíssima consequência deste avanço tecnológico foi a possibilidade de obter aterros mais rígidos (a resistência não constituía um problema no caso dos aterros de enrocamento lançado), e sobretudo, com muito menor fluência.

Dada a importância da utilização deste novo material em barragens (e, com não menor relevância, em auto-estradas e aeroportos, por exemplo) iniciaram-se em Portugal, por iniciativa do LNEC, no final da década de 70, estudos fundamentais relativos à sua caracterização mecânica laboratorial (o que naturalmente implicou a concepção de equipamentos inovadores de grande dimensão) e *in situ*, com o objectivo de propor equações constitutivas que permitissem uma análise tensão-deformação daquelas estruturas geotécnicas. Tais equações abrangeram comportamentos progressivamente mais complexos, os quais se estenderam do elástico-perfeitamente plástico ao elastoplástico com endurecimento, passando por várias versões hipoelásticas [10, 11, 12, 13, 14 e 15]. A Figura 3 apresenta os resultados dos deslocamentos verticais e horizontais na barragem de terra-enrocamento do Beliche no final do primeiro enchimento (modelo elastoplástico com endurecimento e simulação do efeito do colapso por saturação) [13].

O LNEC constituía, assim, um dos centros de investigação mais avançados neste domínio. E preocupou-se desde o início com a disseminação dos conhecimentos. Para além do Seminário realizado em 1978 em Lisboa e Porto, promoveu, em 1990, um Curso patrocinado pela NATO [16] com grande repercussão internacional e nacional e de que resultou a documentação mais actualizada no domínio das estruturas de enrocamento.

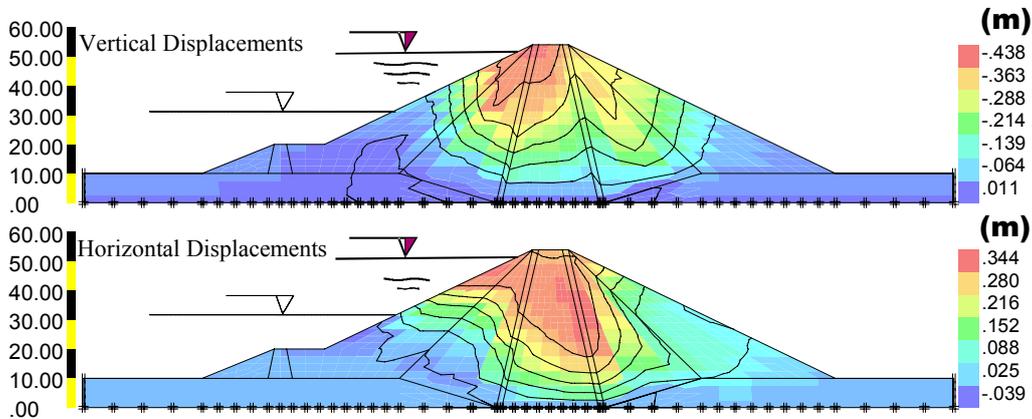


Figura 3: Deslocamentos verticais e horizontais na barragem de terra-enrocamento do Beliche no final do primeiro enchimento [13].

Entretanto, no início da primeira década deste século, novos progressos se verificaram no que respeita ao comportamento mecânico dos enrocamentos, sobretudo a partir do trabalho seminal de Oldcop e Alonso [17]. Assim, mostrou-se que o comportamento do enrocamento é fortemente dependente da humidade relativa (HR) nos seus vazios, a qual condiciona a resposta mecânica do material rocha. Recorrendo aos princípios da mecânica dos geomateriais não saturados, à mecânica da fractura e ao conceito de velocidade de propagação sub-crítica das fissuras, a qual depende da tensão e da sucção total (esta função da HR) são desenvolvidas equações constitutivas susceptíveis de descrever o comportamento tensão-deformação em qualquer fase da obra: construção, primeiro enchimento e esvaziamento. O mesmo se pode dizer do comportamento a longo prazo [18]. O enrocamento surge assim como um novo material com uma mecânica própria [18].

#### *Os avanços mais recentes na análise estrutural*

Em estudos recentes tem sido analisado o desempenho de estruturas de aterro instrumentadas recorrendo aos conceitos da mecânica dos solos e ferramentas numéricas. Alonso & Pinyol [19] examinaram aspectos do projecto e do comportamento de barragens de terra, mostrando a relevância dos efeitos hidromecânicos acoplados através de alguns exemplos, que incluíram o desempenho nas condições especificadas pelo projecto para o esvaziamento. A análise da barragem de Beliche [20] ilustra a simulação de deformações a longo prazo de uma barragem de terra-enrocamento. A título de exemplo, pode referir-se as elevadas deformações que ciclos de sucção podem gerar em solos compactados e a degradação que podem provocar em materiais naturais. Os estudos actuais em solos compactados não consideram, geralmente, o efeito da perda de estrutura de materiais que se degradam devido à interacção entre o aterro e a atmosfera durante a vida útil da obra [21]. Este assunto é muito importante e o seu estudo pode encorajar a construção de aterros com materiais que hoje em dia são recusados devido à sua alterabilidade.

Os conceitos desenvolvidos nas áreas da mecânica dos solos não saturados, da física dos solos e da ciência dos materiais constituem uma sólida base, embora pouco explorada, para atingir os objectivos atrás mencionados. A aplicação destes conceitos com vista ao entendimento, à análise e à previsão da resposta estrutural de barragens de aterro constitui uma importante área de investigação no futuro imediato. Essa resposta é controlada por uma série de processos acoplados, predominantemente a consolidação não saturada, o fluxo de água e a transferência de vapor de água. Modelar estes processos com apoio numa base teórica sólida e na obtenção de parâmetros por intermédio de técnicas de medição refinadas constitui a forma racional de conseguir, num enquadramento abrangente, a resposta estrutural das barragens de aterro construídas com esses materiais.

### *Conclusão*

O domínio da análise estrutural das barragens de aterro, em todas as suas componentes, mas com saliência para as que têm maior peso na avaliação da segurança e da funcionalidade da obra, atingiu um nível que não permite distingui-las quanto à fiabilidade, das outras soluções estruturais. O que acaba de ser exposto mostra que a possibilidade de construir barragens de aterro que, com a mesma segurança, podem usar materiais com vantagens ambientais e económicas, deveria acentuar a expansão deste tipo de estrutura. Evidencia ainda que os conhecimentos em Portugal relativamente às barragens de aterro estão, quando comparados com qualquer outro país, no nível mais elevado neste campo.

Não faz pois nenhum sentido nos dias de hoje cogitar que as barragens de betão são mais seguras que as de aterro.

## **6. UM BREVE OLHAR SOBRE A EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL**

Pareceu desnecessário efectuar uma comparação exaustiva com o que se passa internacionalmente relativamente à frequência com que são adoptadas estruturas em aterro em barragens ligadas à produção de energia eléctrica. Na realidade basta consultar registos disponíveis para verificar que, sendo a solução largamente dominante para as grandes barragens em geral, não se pode detectar qualquer razão que as exclua de uso para produção de energia. Portugal surge de facto como uma singularidade notável.

Excluindo, por desnecessário, a comparação exaustiva, já pareceu apropriado analisar a situação apenas em dois países com vista a melhor detalhar a situação. Optou-se pela Espanha (por razões óbvias) e pela Noruega (pelo seu longo e proveitoso historial no aproveitamento dos recursos hídricos). Mas o panorama seria semelhante caso se analisasse a situação em qualquer país construtor de barragens para produção de energia.

### **6.1 Noruega**

O desenvolvimento da produção de energia eléctrica, a partir de 1880, constituiu o principal impulso com vista à industrialização da Noruega. Não é assim de estranhar que 65% das barragens em serviço tenham a ver com a produção de electricidade [22]. O período de maior

desenvolvimento da hidroelectricidade na Noruega decorreu entre 1955 e 1985, e no período 1959-1979 construíram-se dez grandes barragens por ano. Hoje, as barragens de enrocamento, de vários tipos, são a solução dominante de grande barragem. No entanto, em épocas anteriores, foram mais frequentes as barragens de alvenaria e de betão.

De todas as grandes barragens executadas depois de 1970, 85% são de aterro. Da totalidade de grandes barragens construídas para produção de electricidade, a partir daquela data, 55% são de aterro.

## **6.2 Espanha**

Segundo Boffil [2], as barragens em construção ou muito recentemente construídas em Espanha são em número de 40. São 20 barragens de aterro e 20 de betão. Nas barragens de betão incluem-se 4 de betão compactado, 8 de gravidade (betão vibrado) e 8 de arco gravidade. Portanto, nenhuma delas é de arco ou de dupla curvatura.

De acordo com o mesmo autor, as barragens de contrafortes eram muito comuns há uns anos atrás. Foram construídas 20 entre 1950-75, sendo a mais importante a de Alcântara, com 130 m de altura. Hoje já não se constroem barragens de contrafortes e de abóbadas múltiplas.

Seguindo um critério semelhante ao usado para Portugal (barragens de altura superior a 40 m construídas nos últimos 40 anos), verifica-se que em Espanha se construíram 19 barragens de aterro para produção de energia (relembre-se que esse número era zero para Portugal).

## **7. CONSIDERAÇÕES SOBRE O RISCO**

A aplicação de análises de riscos em barragens, embora ainda fonte de alguma controvérsia e contestação, é hoje aceite, em termos gerais, por uma parte importante da respectiva comunidade técnico científica, tendo as barragens de aterro merecido destaque particular na bibliografia da especialidade.

Salienta-se, a este propósito, a elaboração pelo Comité de Segurança da CIGB do Boletim 130 recentemente publicado [23], a realização de Congressos e Seminários dedicados especificamente a este tema, a elaboração, por algumas Comissões Nacionais de Barragens e donos de obra, de normas para realização de análises de riscos e a criação, por diversas entidades, de grupos de trabalho para apropriação e desenvolvimento dos conhecimentos nesta área.

O conjunto de factores que concorre para a implementação de análises de riscos em barragens ultrapassa o seu tradicional domínio específico, articulando-se com outras áreas, designadamente económico-financeiras, sociais e ambientais, que condicionam actualmente a tomada de decisões na Engenharia de barragens.

Existem, pois, ao dispor da engenharia de barragens, metodologias e métodos de apoio à gestão e à análise de riscos, relativamente aos quais há grande experiência de utilização noutras áreas. O carácter singular das barragens, as especificidades das suas várias componentes e a complexidade das interacções entre estas acarretam dificuldades particulares e implicam, no entanto, o desenvolvimento de um trabalho de base importante, com vista à adaptação e utilização sustentada das metodologias e dos métodos existentes e ao desenvolvimento de novos métodos.

Em Portugal, nos últimos anos, têm sido preparados diversos estudos relativos à aplicação de metodologias qualitativas e quantitativas de gestão de risco a barragens de aterro [24, 25 e 26], capazes de perspectivar a sua implementação de um modo consistente e coerente, permitindo a sua constituição como ferramenta indispensável de apoio à decisão. A Figura 3 apresenta o diagrama de influências elaborado para a análise de riscos da ensecadeira de Odelouca, para a aplicação de diversas metodologias [26].

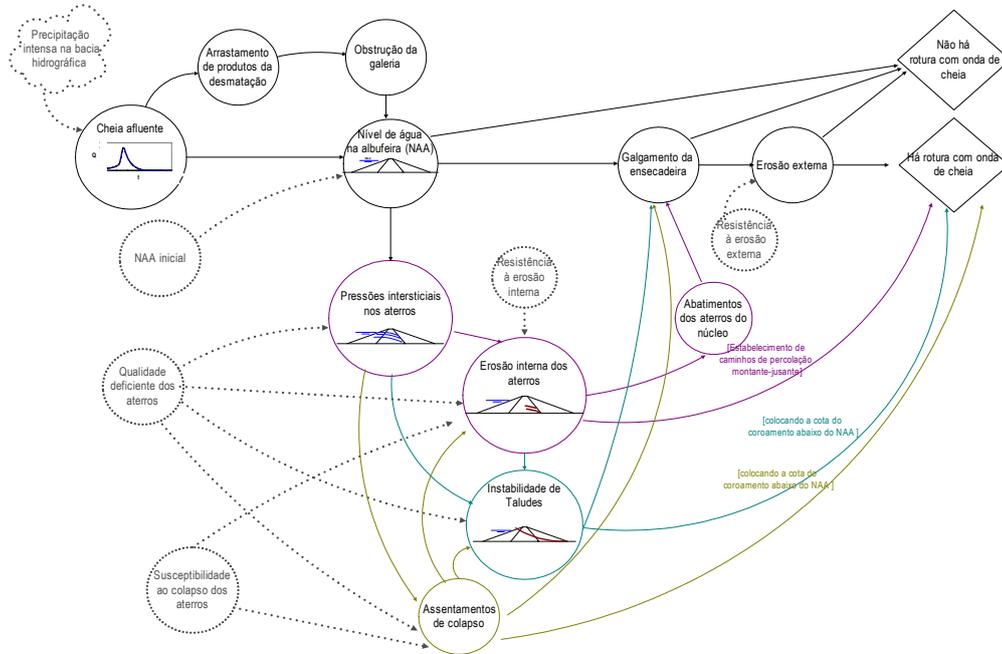


Figura 4: Diagrama de influências da ensecadeira de Odelouca para análise de riscos [26].

Há, no entanto, que continuar a investir na aplicação crítica, na normalização de procedimentos e na regulamentação destas análises de riscos, de forma a assegurar-se a aplicação criteriosa destas novas abordagens e a conferir-lhes uma adequada sustentabilidade técnico-científica.

## **8. A TOMADA DE DECISÃO**

Neste ponto faz-se apenas uma pergunta e uma proposta. A pergunta é a seguinte: na escolha da solução para as barragens de betão para produção de energia até hoje efectuadas, a tomada de decisão quanto ao tipo de barragem baseou-se numa comparação envolvendo vários tipos de solução, nomeadamente as de aterro? A proposta é a seguinte: sugere-se, por razões evidentes, que, para o novo ciclo de construção de barragens, seja necessário um estudo prévio em que obrigatoriamente sejam comparadas as vantagens e inconvenientes de soluções em betão, em aterro e em BCC. Naturalmente que poderá haver casos em que a solução se impõe de tal forma que se pode dispensar o estudo comparativo e que esta situação pode ocorrer para qualquer tipo de solução estrutural (aterro, betão ou BCC).

## **9. CONCLUSÕES**

Tudo o que acabou de ser exposto pretende chamar a atenção para um facto irrefutável e que consiste, ao contrário do que ocorre nos outros países, em não se construírem em Portugal barragens de aterro para produção de energia eléctrica. Esta situação leva-nos a admitir que nem sempre as soluções estruturais adoptadas foram as mais económicas. As únicas razões plausíveis para explicar esta realidade têm a ver com a falta de contacto com os problemas de segurança, de análise estrutural e de técnicas construtivas relativas à enorme variedade de soluções em aterro para barragens por parte daqueles a quem é confiada a decisão final sobre o tipo de barragem a construir. Por outro lado mostra-se que há no nosso país conhecimento em todos os domínios das barragens de aterro que permitem uma análise de qualquer projecto em fase de estudo prévio (na fase de optar por uma dada solução), o seu dimensionamento para todos os tipos de acção relevantes e para a respectiva construção com respeito por todos os requisitos de qualidade.

## **AGRADECIMENTO**

Os autores agradecem ao Investigador Coordenador Eng<sup>o</sup>. Carlos Pina, Vice-Presidente do LNEC e Director do Departamento das Barragens de Betão daquela instituição, a revisão crítica deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (1984) - "Barragem de Lagoacho. Considerações preliminares sobre uma solução em enrocamento", Relatório 287, Lisboa, 17 p.
- [2] Boffil, J. H. (2006) - "Technical, economic and environmental factors for selecting dam typology", em "Dams in Spain", Cap. 7, Colégio de Ingenieros de Camiños, Canales y Puertos, Madrid, pp. 123-149.
- [3] Sherard, J. L. & Dunnigan, L. P. (1989) - "Critical filters for impervious soils", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, nº 7, July, pp. 927-947.

- [4] Maranha das Neves, E. (1989) – “Analysis of crack erosion in dam cores. The crack erosion test”, De Mello Volume, Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, pp. 284-298.
- [5] Caldeira, L. (1994) – “Comportamento dinâmico de barragens de aterro. Métodos de Avaliação”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [6] Mineiro, A. (1978) – “Comportamento sísmico de barragens de terra – previsão do deslocamento permanente”, *Geotecnia*, Nº. 24, pp. 89-130.
- [7] Caldeira, L., Sêco e Pinto, P. and Bilé Serra, J. (1995) – “Seismic response of embankment dams”, Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics”, University of Missouri-Rolla, USA, pp. 321-351.
- [8] Caldeira, L. and Bilé Serra, J. (1997) – “Seismic re-analysis of Alvito Dam”, Proceedings of the 19th Large Dams Congress, Florence, Italy, pp. 431-454.
- [9] Prevost, J. H. (1987) – “Dynamics of porous media”, Nonlinear Soil Mechanics and Dynamic Soil-Structure Interaction Course, Lausanne.
- [10] Veiga Pinto, A. (1983) – “Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento”, Tese para Especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [11] Maranha das Neves, E. & Veiga Pinto, A. (1988) – “Modelling collapse in rockfill dams”, *Computers and Geotechnics*, vol. 6, nº 2, pp. 131-153.
- [12] Santos Pereira, C. (1991) – “Elastoplasticidade de meios particulados. Aplicação do modelo de Lade”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [13] Marcelino, J. (1996) – “Modelação do colapso e da fluência em aterros”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [14] Naylor, D. J., Maranha, J., Maranha das Neves, E. & Veiga Pinto, A. (1997) – “A back-analysis of Beliche Dam”, *Géotechnique* 47, nº 2, pp. 221-233.
- [15] Maranha, J. (1997) – “Analysis of embankment dams. Computational aspects”, PhD Thesis, University of Wales, Swansea.
- [16] NATO ASI Series, Applied Sciences, Vol. 200 (1990) – “Advances in Rockfill Structures”, ed. E. Maranha das Neves, Kluwer Academic Publishers, pp. 1-663.
- [17] Oldcop, L. & Alonso, E. (2001) – “A model for rockfill compressibility”, *Géotechnique*, 51, nº 2, pp. 127-139.
- [18] Maranha das Neves, E. (2002) – “Algumas considerações sobre a mecânica dos enrocamentos”, Conferência Pacheco Silva, Solos e Rochas, vol. 25, nº 3, pp. 161-203.
- [18] Oldcop, L. & Alonso, E. (2007) – “Theoretical investigation of the time dependent behaviour of rockfill”, *Géotechnique*, 57, nº 3, pp. 289-301.
- [19] Alonso, E. & Pinyol, N. (2008) – “Unsaturated soil mechanics in earth and rockfill dam engineering”, Proceedings Unsaturated Soils. Advances in Geo-Engineering, Eds. Toll, D. G., C. E. Augarde, D. Gallipoli & S. J. Wheeler, pp. 3-32.
- [20] Alonso, E., Olivella, S. & Pinyol, N. (2005) – “A review of Beliche Dam”, *Géotechnique*, vol. 55, Nº 4, pp. 267-285.
- [21] Cardoso, R & Alonso, E. (2009) – “Degradation of compacted marls: a microstructural investigation”, *Soils and Foundations*, vol. 49, nº 3, pp. 315-327.
- [22] Nyñas, H. (2009), “Are dams cultural assets?”, *Water Power & Dams Construction*, Vol. 61, nº 4.
- [23] ICOLD (2005) – “Risk Assessment in Dam Safety Management. A Reconnaissance of Benefits. Methods and Current Applications”, Bulletin 130, Paris, p. 113.

- [24] Caldeira, L. (2006) – “Análise de riscos em geotecnia. aplicação a barragens de aterro”, Programas de Investigação e de Pós-Graduação na Área Científica de Mecânica de Solos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp. 1-248.
- [25] Caldeira, L. & Silva Gomes, A. (2006) – “Portfolio safety assessment of Portuguese fill dams”, Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Large Dams Congress, Barcelona, pp.271-290.
- [26] Pimenta, L., Caldeira, L. & Maranha das Neves, E. (2009) – “Risk analysis of Odelouca cofferdam. Results of an event tree analysis”, Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Large Dams Congress, Brasília, Brasil, pp. 21-22, R11.