

# OS ATERROS DE ENROCAMENTO – TENDÊNCIAS ACTUAIS E SEU REFLEXO EM PORTUGAL\*

## Rockfills – Actual Trends and Their Influence in Portugal

por

E. MARANHA DAS NEVES\*\*

RESUMO – Com este artigo\*\*\* pretende-se discutir e divulgar modernos conceitos de enrocamento bem como a sua utilização em obras de engenharia, designadamente barragens de aterro. Porque, ao contrário da generalidade dos países, não se construiu ou projectou em Portugal, nos últimos 20 anos, qualquer obra significativa em que os referidos enrocamentos fossem incorporados, julgou-se ser esta uma das vias para analisar e, eventualmente, contribuir para mudar a situação.

SYNOPSIS – In this paper it is intended to discuss and make known the modern trends in rockfills as well as their use in engineering works, specially in fill dams. Since in the last twenty years no significant work has been done in Portugal with any appreciable use of rockfill, it was thought that this was one way that might help to analyse and possibly change the present situation.

### 1 – CONCEITO ACTUAL DE ENROCAMENTO

No domínio geotécnico e nas últimas décadas surgiram processos construtivos cuja concepção e técnica de construção se caracterizam por um elevado grau de inovação. É o caso das paredes moldadas e da terra armada que se referem como exemplo dada a extraordinária expansão a nível mundial.

Não se pode dizer que os enrocamentos se enquadrem bem naquela perspectiva. De facto, se como solução construtiva são utilizados desde os tempos

---

\*Manuscrito recebido em Março 1979. A discussão do trabalho está aberta durante um período de três meses.

\*\*Especialista em Geotecnia (LNEC)

\*\*\*Este artigo é o primeiro de uma série de três que têm por base exposições efectuadas a propósito do Seminário sobre Enrocamentos efectuado pelo LNEC em 1978. Assim, nos n.ºs 27 e 28 serão publicados "Características de resistência e deformabilidade dos materiais de enrocamento" por A. Veiga Pinto e "Dimensionamento de barragens de aterro de enrocamento" por E. Maranha das Neves.

mais remotos, o mesmo não se pode dizer dos métodos empregues na execução dos maciços de enrocamento, os quais têm vindo a sofrer nos últimos quinze anos uma notável evolução.

Esta evolução, que incidiu sobretudo na tecnologia de equipamentos e processos de desmonte, transporte e compactação de materiais rochosos, à qual se devem acrescentar os progressos recém-efectuados no domínio do conhecimento do comportamento dos maciços de enrocamento quando do desempenho das funções para que foram projectados, são responsáveis por essa expansão relativamente recente das soluções em enrocamento. Esta designação revela-se hoje um pouco vaga quer quando aplicada ao material de construção quer à estrutura. Na realidade o enrocamento, como material de construção, é tradicionalmente considerado como um conjunto de elementos rochosos em que os de maior dimensão podem atingir diâmetros da ordem dos dois metros, podendo ser da ordem de alguns centímetros o diâmetro dos menores. O enrocamento como estrutura é também, num conceito tradicional, um maciço de elementos rochosos (o material de construção atrás referido) construído através do simples lançamento ou deposição dos elementos (ou elemento, consoante a dimensão) uns sobre os outros.

A caracterização destes maciços baseia-se no peso volúmico aparente (grandeza que, dada a granulometria muito pouco extensa dos materiais, não exhibe variações sensíveis quando os pesos volúmcicos dos sólidos estão dentro da faixa mais comum) e no ângulo de atrito interno (que pelas razões granulométricas já apontadas e para elementos sólidos, normalmente angulosos, varia geralmente entre os 40 e os 50°). Pode-se assim conhecer as forças mássicas e a resistência mecânica, o que permite por sua vez o dimensionamento da estrutura maciço de enrocamento pelos métodos genericamente designados de equilíbrio limite.

Mas a recente evolução tecnológica dos meios e processos construtivos veio permitir a compactação dos aterros de enrocamento por métodos muito análogos aos usados nos aterros de solos, exibindo os materiais de construção granulometrias muito mais extensas. Por sua vez, à melhoria de características mecânicas (resistência e deformabilidade) conseguida através da aplicação muito eficiente duma energia de compactação, correspondeu uma tendência para emprego de rochas “menos boas”, isto é, não obedecendo à tradicional exigência dos cadernos de encargos de “pedra sã e de boa qualidade”. Por razões bem compreensíveis (processos de compactação) este quadro evolutivo não se aplica duma maneira completa aos enrocamentos marítimos.

Tem-se assim que o que actualmente define um enrocamento é mais a satisfação de determinados valores para os diâmetros máximos. Quanto aos diâmetros mínimos não há limitações apenas se especificando quanto à quantidade, normalmente em termos de percentagem ponderal. Em termos genéricos pode dizer-se que o conceito de material enrocamento é mais amplo, não podendo ser totalmente desligado da estrutura em que se pretende utilizá-lo.

Logicamente, também o conceito de enrocamento-aterro se modificou, não só como reflexo do material nele utilizado, como da possibilidade de através dos processos construtivos influir muito mais decisivamente nas propriedades que determinam o respectivo comportamento como obra de engenharia. Satisfeitas determinadas condições quanto aos diâmetros máximos (o que é óbvio para que se trate de um enrocamento e não de um cascalho ou de uma areia) todos os diâmetros mais reduzidos são possíveis. As quantidades dos materiais finos terão limites fixados pelo comportamento da estrutura. Exemplificando com um maciço estabilizador numa barragem de aterro zonada, tem-se que aquele será um aterro de enrocamento e como tal analisado, se, construído com material enrocamento, exibir um coeficiente de permeabilidade maior ou igual a  $10^{-3}$  cm/s. Assim o enrocamento poderá ter uma certa quantidade de finos desde que compatível com aquele limite. Se este for ultrapassado, e independentemente dos elementos grossos existentes, os estudos de percolação do maciço em questão deverão ser abordados de acordo com as formulações e métodos próprios da mecânica dos solos (seria um aterro de solo e não de enrocamento). Trata-se de um exemplo envolvendo um aspecto particular das funções de estrutura mas, como é evidente, a prática acaba por estabelecer regras granulométricas que, numa primeira aproximação, acabam por permitir que os maciços exibam os comportamentos pretendidos. É esta a razão por que, quando se abordou o conceito moderno de material enrocamento, se afirmou não poder ser totalmente desligado da estrutura em que se pretende utilizá-lo.

## 2 – CAMPO DE APLICAÇÃO DOS ENROCAMENTOS EM ENGENHARIA CIVIL

Os principais campos de aplicação dos enrocamentos são as barragens, as obras portuárias, as vias de comunicação e os aeroportos.

As barragens têm sido o mais importante campo de utilização do material enrocamento. As primeiras barragens de aterro de enrocamento datam de meados do século passado e as evoluções tecnológicas dos métodos construtivos, referidos em 1, estão muito ligadas à execução deste tipo de obras.

O número de barragens de aterro de enrocamento sofreu nos anos mais recentes um apreciável aumento, fenómeno que será focado mais à frente. Não se deixará no entanto de assinalar desde já as alturas elevadas que as barragens de aterro de enrocamento, de um modo geral, atingiram. Como exemplo referem-se as barragens de Rogun e Nurek, actualmente em construção no rio Vakhsh na União Soviética, que com 325 e 377 metros de altura são de longe as mais altas barragens do mundo, todos os tipos incluídos (Engineering News-Record, 1975).

Do ponto de vista do seu emprego os enrocamentos serão encarados fundamentalmente como material de construção de barragens, perspectiva que se reflectirá na análise do seu comportamento em obra.

O recurso a enrocamentos na construção de molhes de protecção e outras obras portuárias é frequente. Pode ser utilizado como aterro de enrocamento submerso para fundação duma estrutura que desempenha as funções de defesa contra o efeito das vagas, de cais acostável, ou ambas, ou simplesmente como dispositivo estabilizador face ao referido efeito erosivo das vagas. Neste último caso os blocos podem atingir elevadas dimensões com o peso de várias toneladas, função obviamente das características locais da agitação marítima. A construção destas protecções é feita por simples lançamento de blocos, procedimento que incorpora assim a própria compactação.

Nos aterros de enrocamento submersos o método de construção é também por lançamento. Em igualdade de circunstâncias (peso e altura de queda) o efeito de compactação é sensivelmente reduzido por se efectuar debaixo de água. Estes aterros atingem hoje alturas apreciáveis (como é o caso de Sines, por exemplo, com cerca de 60 metros de altura máxima) tendo pois o porte de uma grande barragem de aterro de enrocamento.

Face aos métodos construtivos normalmente utilizados os enrocamentos marítimos não serão objecto duma referência especial.

A utilização crescente de aterros de enrocamento no domínio viário é um facto recente. É o caso das auto-estradas, dadas as alturas de aterros a que modernamente se recorre nesse tipo de vias (por ex. Penman, 1971 e Rodriguez-Miranda e Manjon, 1976). As vantagens dos enrocamentos sobre os solos nesses

aterros muito elevados, para além duma circunstância obrigatória de falta de terra, é poder serem construídos mais rapidamente por não terem problemas de pressões neutras (devido ao acelerado crescimento em altura da obra) ou de traficabilidade, durante os períodos chuvosos, e necessitarem dum volume de material apreciavelmente menor. Penman, (op. cit.), refere um caso típico dum atravessamento dum vale com 600 metros de desenvolvimento a uma altura máxima de 50 m em que, usando taludes de 1:1,8, com enrocamentos em vez de 1:4 para solos, se reduziu o volume do aterro em  $1,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Finalmente e no que diz respeito a aeroportos também os aterros de enrocamento têm sido utilizados, principalmente quando se trata duma obra "off-shore". A título de exemplo refere-se o aeroporto de Nagasaki com uma pista de 3000 m e para a construção do qual se utilizaram  $24 \times 10^6 \text{ m}^3$  de rochas (exploradas a partir de pedreiras) para a constituição dum aterro de enrocamento com altura média de 17 metros, sendo os dois últimos metros acima do nível da água do mar.

### 3 – BREVE REFERÊNCIA À EVOLUÇÃO DAS BARRAGENS DE ATERRO DE ENROCAMENTO

As barragens de aterro de enrocamento começaram a ser construídas, a partir da segunda metade do século passado, em zonas mineiras das regiões montanhosas dos Estados Unidos. Os factores determinantes na adopção desta solução foram a não disponibilidade de solos, as dificuldades de transporte que tornavam proibitivo o custo duma estrutura de betão e a familiaridade com as técnicas de desmonte a fogo por parte dos mineiros.

Tratava-se de obras de pequena altura em que frequentemente se recorria a um núcleo de enrocamento a granel, contido a montante e a jusante por duas paredes, espessas e inclinadas, de alvenaria seca. A estanqueidade era assegurada por uma cortina de pranchas de madeira apoiada no paramento de montante.

Estas barragens possuíam paramentos muito inclinados mas, dada a relação entre custos duma parede de alvenaria e o enrocamento lançado, passou a ser suprimida a parede a jusante com a conseqüente suavização do talude. Progressivamente as cortinas de estanqueidade de madeira foram sendo substituídas pelas de betão armado. Faz-se apenas referência às soluções mais frequentes.

Em 1893 foram construídas as primeiras barragens de aterro de enrocamento com cortina de retenção construída com solos (Pecos Valley n.º 1 e n.º 2) (Creager *et al.*, 1944). Eram constituídas por um aterro de enrocamento limitado a montante por uma parede de alvenaria seca sobre a qual se apoiava, do lado de montante, um aterro de solo compactado (Fig. 1).

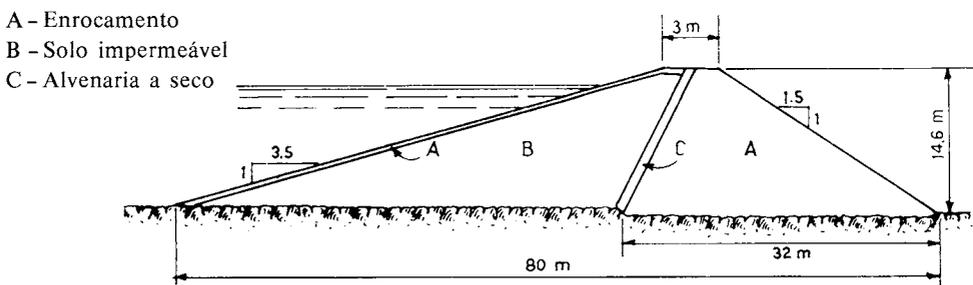


Fig. 1 - Barragem de Pecos Valley n.º 1

Este tipo de solução veio a revelar-se inconveniente com a migração de finos do aterro de solo para os vazios do aterro de enrocamento. Um acidente grave como o da barragem de Schofield, em 1928, (Sherard *et al.*, 1963) pôs em evidência aqueles inconvenientes, pelo que a partir dessa data a solução foi abandonada.

Só com o êxito da barragem de Nantahala, construída em 1942, (Sherard, *op. cit.*), é que tornou a haver confiança nas soluções em que a estanqueidade das barragens de aterro de enrocamento é conseguida por intermédio de aterros de solos com localização e permeabilidade adequadas. No caso concreto de Nantahala trata-se de uma barragem com um núcleo argiloso de reduzida espessura, rodeado a montante e a jusante por filtros de espessura apreciável estabelecendo uma transição para os maciços estabilizadores de enrocamento. Como é evidente, o bom comportamento da barragem (e de toda uma série do mesmo tipo que seguidamente se construíram) ficou a dever-se principalmente ao adequado funcionamento do sistema de filtros. Com núcleos verticais ou inclinados, de reduzida espessura ou de apreciável largura, esta solução passou a ser frequentemente utilizada nas barragens de aterro de enrocamento.

As alternativas que hoje se continuam a poder pôr a essa forma de garantir a estanqueidade, são o recurso a cortinas de materiais não naturais tais como o betão, o betão betuminoso ou o aço. Qualquer destas soluções tem sido adoptada desde o século passado com maior ou menor frequência.

Presentemente as cortinas de aço são pouco utilizadas pois só em casos muito particulares têm justificação económica. As cortinas de betão armado e de betão betuminoso são de utilização corrente. Como é evidente há múltiplos factores a influir na escolha do tipo mais adequado do órgão assegurado da capacidade de retenção dum a barragem de aterro de enrocamento, os quais por sua vez variam com o tempo e de local para local. Mas se se pretender dar uma ideia das tendências actuais verifica-se que as cortinas de betão armado só se aplicam no paramento de montante, que as cortinas de betão betuminoso além dessa mesma localização também se têm vindo a colocar numa posição central e que tanto umas como outras se aplicam sem problemas em barragens de altura inferior aos 80 m (a esta confiança também não é alheia a moderna técnica de construção de enrocamentos). O betão betuminoso tem maior expansão na Europa do que no continente americano.

Outros materiais, tais como os plásticos, cuja aplicação em barragens se iniciou há cerca de dez anos, tem ainda utilização muito pouco frequente e, na maior parte dos casos, limitada a barragens de pequena altura.

Ainda no domínio das barragens de aterro de enrocamento é interessante referir uma técnica utilizada pela primeira vez na União Soviética, em 1968, em que uma barragem de enrocamento de altura apreciável (60 m) foi construída recorrendo a um desmonte directo por explosivos, que deslocou  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  de materiais que constituem o corpo da barragem (esquema de Baipaza, no rio Vakhsh). A construção da barragem era o estágio final do esquema que incluía um descarregador e um túnel de desvio. Com o deflagrar de 1860 t de explosivos, criteriosamente colocados na escarpa do vale, foi deslocada uma massa do maciço rochoso susceptível de formar o corpo da barragem, tendo as explosões, para evitar efeitos de natureza sísmica, sido diferidas de intervalos de tempo correspondentes a fracções de segundo. O perfil tipo obtido ficou muito aproximadamente igual ao previsto (Ignatyuk, 1970). A esta nova técnica tem continuado a ser dada muita atenção na União Soviética.

#### 4 – BARRAGENS DE ATERRO DE ENROCAMENTO. PRINCIPAIS TIPOS

No simpósio sobre barragens de aterro de enrocamento promovida em 1960 pela American Society of Civil Engineers (ASCE), definiu-se uma

barragem de aterro de enrocamento como sendo “uma barragem cujo principal elemento estrutural é constituído por rocha, quer lançada quer compactada em camadas”. Não deixa de ser interessante comparar com a definição dum anterior simpósio da ASCE, em 1939, em que se afirmava tratar-se de “uma barragem de enrocamento a granel, com inclinações de ambos os paramentos muito próximos do ângulo de talude natural, com uma cortina impermeável no paramento de montante apoiada sobre um «colchão» de enrocamento arrumado”. Estava-se ainda a um decénio dos projectos de Growdon (Nantahala) e é de notar a referência ao enrocamento a granel, sendo portanto ignorado, em 1939, o enrocamento compactado.

Quanto ao conceito estabelecido em 1960, há uma certa flexibilidade ao definir “elemento estrutural principal” e “rocha” (Barry Cooke, 1964). Pode considerar-se que uma barragem é de aterro de enrocamento sem que para isso se esteja vinculado a uma percentagem exacta da resistência ou da rocha que constitui o referido elemento estrutural principal. A não definição de rocha levanta a questão da classificação das barragens com maciços estabilizadores de burgau: se barragem de aterro de solo se de enrocamento. Mas como as barragens com espaldas de burgaus e blocos tem paramentos com inclinações muito próximas das construídas com rochas obtidas de pedreiras e como as propriedades físicas dos elementos, a granulometria, a resistência ao corte e a permeabilidade também se aproximam mais das dos enrocamentos, as barragens de aterro de burgau ou cascalho tendem a ser classificadas como de aterro de enrocamento.

Quanto aos tipos de barragens de aterro de enrocamento, como são meramente descritivos não permitem uma classificação muito precisa (Barry Cooke, op. cit.). Assim o tipo *cortina impermeável* inclui as barragens com cortina sobre paramento de montante e no interior do enrocamento, podendo essa mesma cortina ser de madeira, aço, betão betuminoso, betão, plástico ou borracha. O tipo *núcleo inclinado* designava inicialmente as barragens com um núcleo de solo compactado colocado sobre o talude natural do maciço de enrocamento lançado. Com o advento do enrocamento compactado o núcleo pode apresentar-se em qualquer posição compreendida entre a central vertical e a inclinada devido à colocação sobre o paramento do maciço de enrocamento compactado, com inclinações de 1,3:1 a 1,4:1. Quando inclinado o núcleo é necessariamente pouco espesso. O tipo *núcleo moderadamente inclinado* corresponde a núcleos deitados cujo paramento de jusante inclina

cerca de 0,5:1. O tipo *núcleo central* inclui as barragens com núcleos simétricos ou assimétricos com o paramento de jusante vertical ou ligeiramente inclinado para montante.

Quanto à dimensão do núcleo (delgado ou espesso) tem-se que quando a respectiva base tem uma dimensão inferior à altura da barragem, praticamente não afecta os paramentos pelo que se pode designar de delgado. Outro tanto não sucede quando a largura na base do núcleo é superior a 1,5 vezes a altura da barragem. Trata-se dum núcleo espesso e torna-se um elemento estrutural da barragem muito importante.

### 5 – A RECENTE EXPANSÃO DAS BARRAGENS DE ATERRO

Como já foi referido as barragens de aterro de solo ou de enrocamento são soluções adoptadas com frequência crescente. A Fig. 2 dá uma ideia dessa preferência a nível mundial (Schmitter, 1976) sendo de assinalar que se acentua a partir de 1970, tudo indicando que com tendência para aumentar

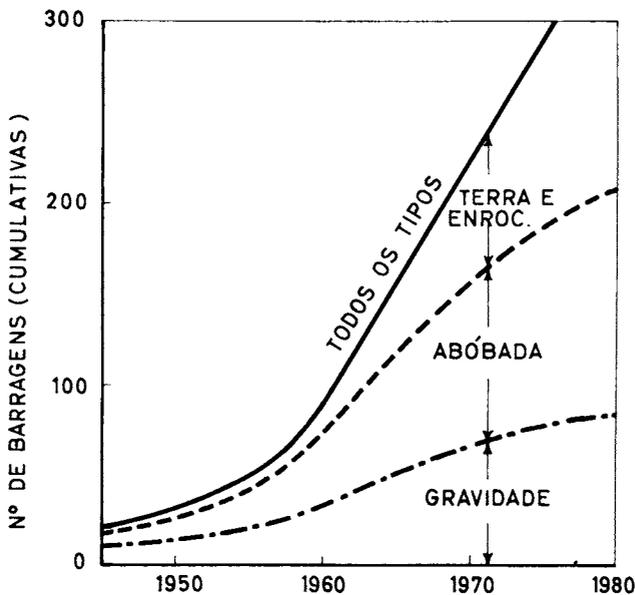


Fig. 2 – Evolução na opção entre os principais tipos de barragem (segundo Schmitter, 1976)

e com grande influência das barragens de aterro com enrocamento. A partir da Segunda Guerra Mundial estas obras conheceram uma difusão notável, a qual se tem vindo sempre a acentuar quer pelo número de obras construídas quer pela respectiva importância. São estruturas que, graças aos progressos conseguidos no domínio da geotecnia e à experiência adquirida com as numerosas barragens da geração precedente, são consideradas muito seguras do ponto de vista técnico. Como também já foi referido em 1, os progressos no plano do conhecimento do comportamento de barragens de aterro de enrocamento de vários tipos e dimensões foram acompanhados dum desenvolvimento técnico notável no que diz respeito ao transporte e colocação em obras de materiais naturais (solos e rochas) através da adopção de meios de transporte de grandes dimensões e com a afirmação definitiva da vibração, conseguida à custa de ciclindros vibradores dotados de grande eficácia e facilidade de manobra que permitem a execução, com um custo competitivo, de aterros muito bem compactados.

Acontece assim que as barragens de aterro de enrocamento são hoje as mais indicadas, mesmo em locais em que as características da fundação sejam adequadas à construção duma barragem de betão. Pode ainda acrescentar-se a necessidade crescente de construir obras hidráulicas em zonas muito distantes de centros habitacionais, em países sem indústria e com uma rede viária muito reduzida, onde se torna muito onerosa a obtenção de cimento e equipamento necessários à execução duma barragem de betão.

Compreende-se assim mais facilmente como as barragens de aterro de enrocamento, longe de representarem uma solução para problemas de natureza particular, como na generalidade dos casos nos primeiros decénios deste século, devem ser actualmente consideradas como a única solução em problemas do género descrito e uma alternativa séria em muitíssimas circunstâncias (Calenda, 1971).

De todo este surto na construção de barragens com enrocamentos resultará uma experiência adicional de valor incalculável. A título de exemplo veja-se o caso da inclusão de materiais de escavação visando o aproveitamento de materiais pedregosos eventualmente menos são. De acordo com V. de Mello (1972) "este aproveitamento denota com uma oposição já que não dispõe de muito apoio na informação técnica e não constitui preocupação comum nos países mais desenvolvidos. É necessário um programa de investigação a longo prazo pelo que se torna urgente iniciá-lo. Acontece ainda que, perante os

problemas de alteração, as observações visuais são sempre desfavoravelmente exageradas já que só incidem sobre a superfície exposta. Por outro lado os ensaios de laboratório, sem uma confirmação da experiência na natureza, não são muito convenientes.

Há assim que começar desde já a utilizar materiais menos são tendo o cuidado de limitar o seu uso a situações de menor responsabilidade, de observação fácil e sistematizada e de manutenção ou eventual substituição viável do ponto de vista económico. Podem então constituir-se nas obras zonas de compactação experimental onde poderão ser colocados materiais que em princípio seriam rejeitados, sem que o maciço sofra qualquer risco”.

## 6 – OS ANTECEDENTES RELATIVAMENTE A BARRAGENS DE ATERRO DE ENROCAMENTO EM PORTUGAL

É reduzida a experiência com barragens de aterro de enrocamento em Portugal. Ignorando pequenas barragens tem-se que as primeiras obras que incorporaram maciços significativos de enrocamento foram as de Pego do Altar (Fig. 3) e Vale do Gaio, (Fig. 4), construídas na bacia do Sado entre os anos 43 e 49.

O elemento estanque da barragem de Pego do Altar é constituído por uma cortina metálica sobre o paramento de montante e que se apoia sobre uma delgada camada de betão colocada sobre alvenaria hidráulica. Com 56 m

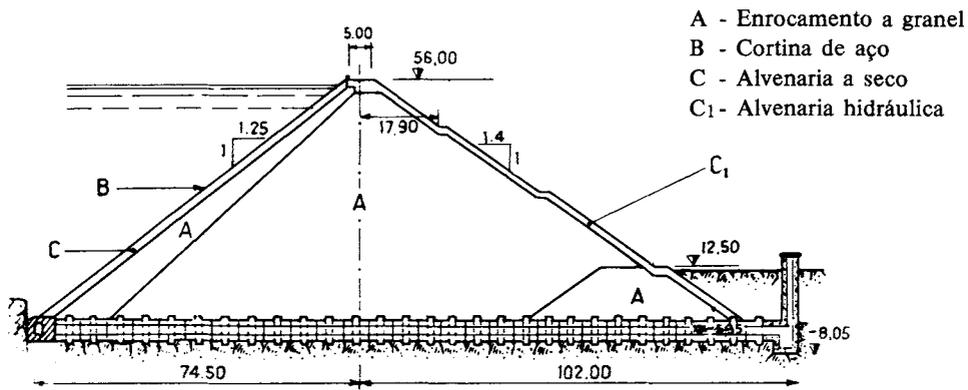


Fig. 3 – Barragem de Pego do Altar

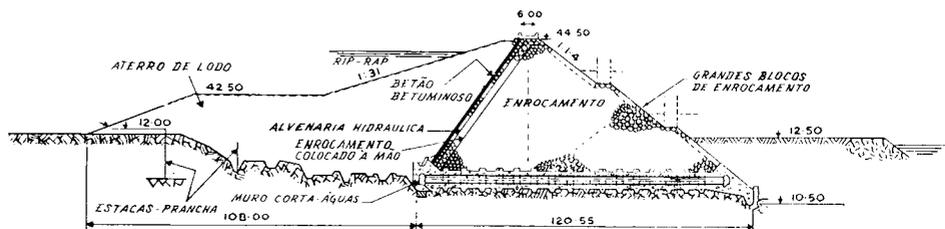


Fig. 4 – Barragem de Vale do Gaio

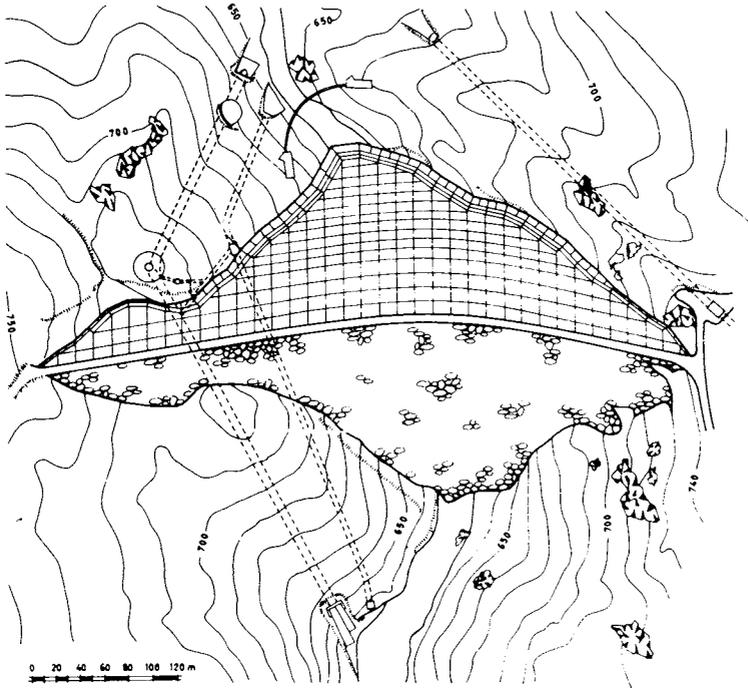
de altura esta barragem de aterro de enrocamento lançado é ainda a mais elevada estrutura dotada de um revestimento metálico do paramento de montante, mais concretamente com placas de aço soldadas. Durante os dois primeiros anos de operação ocorreram alguns repasses através de fendas localizadas nas soldaduras das juntas de dilatação. Remediado este inconveniente nada de anormal foi registado até hoje.

A barragem de Vale do Gaio tem 45 metros de altura e a impermeabilização do maciço de enrocamento arrumado foi conseguida à custa duma cortina interna de betão betuminoso, ligeiramente inclinada para montante e com espessura variável entre 0,1 e 0,2 metros. Este órgão de estanqueidade é recoberto pelo aterro de solo compactado de montante. O betão betuminoso é assente sobre uma camada de alvenaria de 0,8 metros de espessura.

O recurso a cortinas de aço, não sendo uma solução generalizada, como já foi afirmado, nunca foi totalmente posta de lado. Em determinadas circunstâncias (rapidez de execução, por exemplo) as vantagens destas cortinas podem superar os principais inconvenientes que são, genericamente, o custo elevado e a corrosão. Para citar um caso recente refere-se a barragem chilena de Aguada Blanca, de 45 m de altura, a qual foi completada em 1970 (Sembenelli e Fajiolo, 1974).

Quanto aos revestimentos com betão betuminoso trata-se de uma técnica que também nunca foi posta de parte sendo, relativamente às cortinas metálicas, de emprego muito mais generalizado. Recentemente tem mesmo havido muitos casos de aplicação, facto que se julga derivar de assinaláveis progressos tecnológicos no domínio dos betões betuminosos e da sua aplicação em obra. Também nos aproveitamentos hidráulicos em que as perdas de água através dos aterros podem ser economicamente desfavoráveis (reservatórios de bombagem, por exemplo), o revestimento com betão betuminoso é muito utilizado.

PLANTA



PERFIL

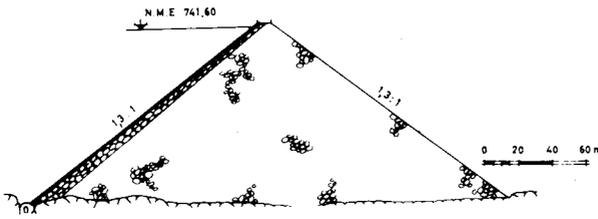


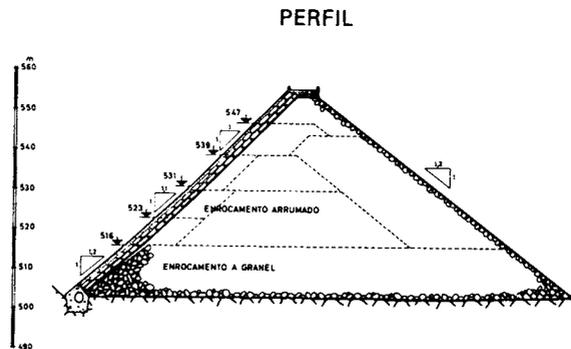
Fig. 5 - Barragem de Paradela

Em 1958 terminou a construção, no rio Cávado, da barragem de aterro de enrocamento de Paradela, a mais elevada do mundo a essa data mas que ainda hoje é uma das mais altas do seu tipo (110 metros, Fig. 5). A estanqueidade é assegurada por uma cortina de betão armado no paramento de montante, com juntas verticais e horizontais.

O maciço de enrocamento foi construído por lançamento de blocos de granito (aproveitando-se portanto a energia de queda para um efeito de compactação) em camadas que atingiram cerca dos 20 metros de altura. O material foi sujeito à acção de jactos de água durante o lançamento de modo a eliminar os finos não separados na pedreira (a percentagem de material considerado estéril na pedreira, foi calculada em cerca de 20%).

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 e Bear River com 100 e 73 metros de altura, respectivamente.

Não se dispõe de elementos que permitam avaliar da granulometria do material, quer após arranque da pedreira quer após colocação em obra. Também



*Fig. 6 – Barragem de Vilar*

não há informação sobre o peso volúmico aparente *in situ* do enrocamento. O volume dos aterros da barragem estima-se em  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, aproximadamente.

Pouco tempo depois foi iniciada a construção, no rio Távora, da barragem de Vilar. Utilizou-se também quer o enrocamento de granito lançado quer o revestimento do paramento de montante por uma cortina de betão armado (Fig. 6). A barragem foi completada em 1965.

Quanto ao panorama mundial relativamente a este tipo de barragens é de acrescentar que após um período em que não se construíram obras muito altas, se assinalam depois barragens de grande envergadura, umas já terminadas, outras em construção, outras ainda em fase de projecto. Citam-se como exemplo as barragens de Cethana na Austrália, com 110 m de altura (Wilkins *et al.*, 1973), Anchicaya, na Colômbia, com 150 m de altura (Herrerias, 1973), Pozo de Los Ramos, em Espanha, com 100 m de altura (Jimenez Salas, 1976) e Foz de Areia, no Brasil, com 160 m de altura (V. de Mello, 1975). O progresso em altura das barragens de aterro de enrocamento com cortina de betão armado a montante relaciona-se com a possibilidade de compactação dos enrocamentos e consequente diminuição dos assentamentos.

A barragem de Vilar foi a última barragem de aterro de enrocamento construída em Portugal.

## 7 – PANORAMA ACTUAL EM PORTUGAL

Como se pode verificar, nunca em Portugal se construíram barragens de enrocamento com núcleo argiloso. Quando a partir de 1940 o número, altura e volume das barragens, quer de aterro de solo quer de enrocamento, aumentava espectacularmente em todo o mundo em virtude das repercussões económicas da utilização dum equipamento de construção constantemente melhorado, em Portugal não se passava nada de semelhante. A experiência americana iniciada com a barragem de Nantahala não teve reflexo no nosso país.

Pode procurar-se uma explicação no reduzido custo, ao tempo, da mão-de-obra em Portugal. É factor comum a outros países como por exemplo a Itália (Calenda, 1971). De qualquer modo o desenvolvimento nas barragens de enrocamento com núcleo argiloso ficou a dever-se principalmente a um melhor domínio no comportamento dos filtros. Só muito recentemente e apenas nas barragens de aterro de solos, surgem obras que integram o referido domínio do comportamento dos sistemas de filtragem-drenagem.

Verifica-se assim que quando em Portugal se começou a intensificar a construção de barragens de aterro se optou sempre por terras e, mesmo assim, estatísticas de 1964 referentes a barragens com mais de 30 metros de altura indicavam que a percentagem deste tipo de obras era de apenas cerca de 28% (Slichter, 1967).

Julga-se com interesse comparar com o que se vem passando em Espanha. Assim, no início de 1976, os volumes que haviam sido colocados nas 113 grandes barragens\* existentes a essa data eram de 19 milhões de m<sup>3</sup> (aterros de solos) e 14 milhões de m<sup>3</sup> (aterros de enrocamento). Mas as realizações com enrocamento são posteriores a 1960 e, na sua maior parte, a 1970 (Laa e Hernandez, 1976). Na Fig. 7 apresenta-se um mapa da Espanha com a localização das barragens de aterro. O Quadro I permite identificar e obter algumas características das barragens de aterro zonadas, o mesmo sucedendo com o Quadro II relativamente a barragens de aterro com cortina impermeável a montante (Jimenez Salas, 1976).

Dada a proximidade da fronteira com Portugal de muitas barragens de enrocamento e ainda à continuidade geomorfológica entre os dois países, verifica-se que se parece não haver no nosso país qualquer particularismo susceptível de modificar significativamente as tendências verificadas a nível internacional, mais se confirma essa convicção quando se estabelece um paralelo entre a situação actual em Portugal e em Espanha. Parece pois pertinente considerar-se a falta de experiência própria dos últimos anos como o principal óbice à adopção de soluções em enrocamento.

Como é bem sabido, da não execução de obras resulta não só uma progressiva falta de prática na construção como um elevado grau de desconhecimento dos assuntos básicos, tais como a pesquisa do comportamento dos materiais, quer em laboratório quer *in situ*, técnicas de projecto e observações de obras.

É assim que a engenharia portuguesa que construiu barragens de enrocamento como as de Pego do Altar e Paradela, qualquer delas estruturas de grande envergadura no seu tipo (obrigatoriamente referidas em todos os estudos da evolução das barragens de aterro de enrocamento), viu a sua experiência reduzida praticamente a zero decorridos que são cerca de 20 anos.

---

\* Grande barragem de acordo com os critérios preconizados pela Comissão Internacional de Grandes Barragens.



QUADRO I  
BARRAGENS DE ATERRO ZONADAS (1976). (ESPAÑHA).

	NOME DA BARRAGEM	TERMINADA EM	VOLUME (m <sup>3</sup> )	(m)	SOMA DOS TALUDES (h <sub>1</sub> + h <sub>2</sub> )
1	LAGO NEGRO	1956	16.000	11	3,50
2	ESCARRA	1957	152.000	43	3,70
3	TRAMACASTILLA	1957	17.000	17	5,00
4	VALDESIRGAS	1963	26.000	21	3,50
5	ARBON	1967	323.000	32	4,30
6	PORTODEMOUROS	1967	2.337.000	93	4,40
7	RENEGADO	1969	572.000	65	3,60
8	ARGOS	1970	375.000	33	4,20
9	AGUA	1971	400.000	29	3,60
10	GUADALTEBA	1972	3.125.000	84	3,90
11	GUADALHORCE	1973	935.000	75	3,90
12	LLODIO	1973	53.000	21	5,50
13	IP	1974	253.000	31	4,60
14	TIRAJANA	1974	310.000	74	3,20
15	LA BUJEDA	1975	389.000	41	3,70
16	ARENOS	1975	3.042.000	108	4,40
17	TOUS	E. C.	4.000.000	127	2,90
18	BENINAR	E. C.	3.800.000	83	4,80
19	CAMPOAMENO	E. C.	76.000	19	5,00
20	ESTANDA	E. C.	300.000	39	5,00
21	FINISTERRE	E. C.	1.491.000	40	5,50
22	GAYA	E. C.	575.000	50	3,60
23	CALANDA	E. C.	767.000	58	3,20
24	EL COBRE	E. C.	4.830.000	90	4,80

E. C. - Em Construção; h<sub>1</sub> + h<sub>2</sub> - Inclinação dos paramentos.

QUADRO II  
BARRAGENS DE ATERRO COM CORTINA A MONTANTE (1976). (ESPAÑHA).

	NOME DA BARRAGEM	TERMINADA EM	VOLUME (m <sup>3</sup> )	ALTURA (m)	SOMA DOS TALUDES (h <sub>1</sub> + h <sub>2</sub> )	TIPO DE CORTINA
1	PROSERPINA	Siglo II	68.000	19	4,10	ALVENARIA
2	GRANJILLA 2	1560	14.000	6	3,00	ALVENARIA
3	GRANJILLA 1	1660	42.000	14	3,00	ALVENARIA
4	MOLINO DE CABRA	1850	5.000	4	6,00	ALVENARIA
5	QUEBRADA DE TIENDAS	1850	6.000	8	2,20	ALVENARIA
6	LA MASIDE	1919	30.000	17	1,80	ALVENARIA
7	LA PINETA	1920	11.000	9	4,30	BETAO
8	RIBERA DE MULA	1920	9.000	13	1,00	ALVENARIA
9	URDICE TO	1930	65.000	26	1,00	ALVENARIA E CORTINA
10	PLANDESCUN	1934	24.000	15	1,80	BETAO
11	DIQUE PINO	1948	20.000	13	2,60	ALVENARIA
12	PUNTE PORTO	1953	32.000	32	2,00	BETAO
13	CARDENA	1954	88.000	19	2,50	BETAO
14	LLANO MONCASAU	1955	10.000	11	1,20	BETAO
15	DOMICO	1958	26.000	26	2,20	BETAO
16	PIAS	1961	260.000	47	3,20	BETAO
17	GARANDONES	1962	20.000	11	1,60	BETAO
18	PIEDRAS	1968	380.000	40	2,60	BETAO
19	AIGUAMOIX	1969	59.000	26	2,70	BETAO
20	ALMENDRA (COLLADO)	1969	963.000	38	3,10	BETUMINOSO
21	SANTILLANA	1969	740.000	40	3,10	BETUMINOSO
22	ABONO	1970	199.000	22	4,90	BETUMINOSO
23	PEREJIL-ODIEL	1970	94.000	30	2,60	BETUMINOSO
24	GUJARAZ	1971	415.000	47	3,10	MATERIAL ARTIFICIAL
25	GUILLENA (COLLADO)	1972	2.000	5	1,60	BETUMINOSO
26	SIERRA BOYERA	1973	380.000	30	2,60	BETAO
27	UNDURRAGA	1973	300.000	33	3,10	BETAO
28	LOS CAMPITOS	1974	576.000	54	2,80	BETAO
29	EL TEJO	1974	340.000	40	2,70	BETAO
30	VALMAYOR	1974	2.100.000	59	3,10	BETUMINOSO
31	MIRAFLORES	1975	243.000	37	3,20	MATERIAL ARTIFICIAL
32	POZO DE LOS RAMOS	E. C.	1.570.000	96	2,80	BETAO
33	SIBERIO	E. C.	900.000	74	3,00	BETUMINOSO
34	URKULU	E. C.	312.000	49	3,10	BETAO
35	ALFILORIOS	E. C.	347.000	72	3,30	BETUMINOSO
36	L. DE LA YEGUAS	E. C.	101.000	19	3,60	BETAO

Para uma recuperação há que adquirir domínio sobre as técnicas laboratoriais de determinação de características de corte e compressibilidade de enrocamentos “modelados”, explorando as vias de transposição dos resultados obtidos para materiais dos aterros dos protótipos.

Por outro lado a falta de experiência (com os seus reflexos na tecnologia da construção, no projecto e no domínio dos fenómenos básicos que condicionam o comportamento dos enrocamentos) é tanto mais evidenciada quanto mais alta a barragem a construir.

Daí que sejam as barragens de altura média aquelas que mais vantagens poderiam apresentar numa fase inicial (as pequenas barragens, dadas as baixas tensões induzidas nos maciços de enrocamento, são pouco úteis deste ponto de vista dada a grande dependência do comportamento do enrocamento do estado de tensão média a que está submetido). Permitiriam uma experiência na técnica de previsão, nos métodos de construção mais adequados (aterros experimentais, por exemplo) bem como um acréscimo de conhecimento nos domínios de projecto e tecnologia da construção (incluindo a exploração de pedreiras). Finalmente salienta-se a observação da obra, a qual só se justifica plenamente quando a barragem ultrapassa certas dimensões.

## 8 – QUESTÕES FUNDAMENTAIS A ABORDAR NO ESTUDO DOS ENROCAMENTOS

No capítulo anterior procurou-se descrever a situação em Portugal no domínio da construção de barragens de aterro de enrocamento. Poder-se-á agora tentar localizar a questão no panorama geral, em Portugal, da geotecnia aplicada na construção de aterros de solos ou de enrocamentos para barragens ou com outros fins (Maranha das Neves e V. Pinto, 1977). Resumidamente ter-se-á:

- a) Solos coerentes ou incoerentes em que dominam os elementos finos (passados no peneiro n.º 4), provenientes de manchas de empréstimo.

São os materiais de uso mais convencional com aplicação em pequenas e grandes barragens ou em aterros para obras viárias ou com qualquer outra finalidade. A experiência pode considerar-se actualizada relativamente ao estado actual dos conhecimentos e é de utilização corrente.

- b) Solos coerentes, de granulometria extensa, com abundância de elementos grossos (retidos no peneiro n.º 4 e podendo atingir dimensões da ordem dos 20 cm), provenientes de manchas de empréstimo.

Trata-se de um tipo hoje em dia de uso corrente em Portugal, facto que se fica a dever à larga utilização dos xistos alterados na construção de barragens de terra. Através da caracterização geotécnica dos xistos alterados, antes e após compactação, e da observação das barragens construídas com esses solos, desempenhou o LNEC um papel decisivo na radicação do seu emprego generalizado bem como das inerentes técnicas construtivas.

- c) Materiais incoerentes, de granulometria variável, mas em que dominam os elementos grossos (da ordem da dezena de centímetros), provenientes de pedreiras, geralmente com granulometria integral.

Praticamente não existe experiência com estes materiais sendo o seu estudo, bem como das respectivas aplicações e técnicas construtivas, o objectivo do presente trabalho. Prevê-se um largo campo de aplicação, tanto no domínio das barragens de aterro de enrocamento como nos aterros viários.

- d) Materiais rochosos de grandes dimensões (0,6 m de diâmetro) e com elevado grau de uniformidade, provenientes de pedreiras quase sempre com um certo processamento.

É o enrocamento tradicional. Como já se verificou, a experiência esteve actualizada ao tempo da construção das barragens de enrocamento. Posteriormente não foi mais utilizado na construção de barragens (com a excepção óbvia de zonas muito limitadas e de funções específicas) não resultando daí inconvenientes por ser uma solução caída em desuso. Estes enrocamentos são no entanto muito utilizados em obras marítimas. Dado que em Portugal se vêm executando obras desse tipo de grandes dimensões, é apreciável o domínio tecnológico na construção desses maciços de enrocamento. É no entanto um assunto que, como já se disse, não foi especialmente focado, embora alguns dos aspectos abordados lhe digam respeito.

É portanto aos materiais descritos em c) que se deverá dar mais atenção e muito embora se tenha feito referência a um material integral (tout-venant), casos há em que se admite o processamento.

Quanto aos estudos a efectuar com os enrocamentos, verifica-se que eles se vêm desenvolvendo em vários países de há uns anos a esta parte. Sem prejuízo dum tratamento do assunto mais em pormenor, o qual será efectuado nos próximos números da GEOTECNIA, adiantam-se algumas notas sobre o assunto.

Um certo número de centros de investigação dispõe de equipamento de laboratório que, pelas elevadas dimensões, permite uma investigação muito cuidada no domínio da deformabilidade e resistência dos enrocamentos. Na realidade as amostras têm de ter dimensões apreciáveis para serem representativas do enrocamento real, razão pela qual se construíram dispositivos para submeter essas amostras de elevadas dimensões a ensaios de corte directo, triaxial, deformação plana e ensaios edométricos. Como é evidente o custo desses equipamentos cresce exponencialmente com a dimensão da amostra.

Pretende-se assim estudar as características tensão-deformação dos materiais e investigar até que ponto os resultados laboratoriais são válidos para descrever o material *in situ*, isto é, estudar os efeitos de escala na compressibilidade e resistência ao corte dos enrocamentos.

Paralelamente há que conduzir uma investigação sobre o próprio material, num esforço complementar para a compreensão dos fenómenos que caracterizam o comportamento dos enrocamentos: estudo da fábrica dos materiais granulares, dimensões e formas das partículas, número de contactos e outros parâmetros. Simultaneamente tem-se tentado estabelecer um modelo para calcular a distribuição probabilística das forças de contacto entre partículas, no sentido de um melhor conhecimento do fenómeno da fracturação e de outros elementos que contribuam para a investigação do comportamento mecânico dos enrocamentos. Tais progressos no domínio reológico permitem aproveitar cada vez melhor a aplicação dos métodos numéricos no dimensionamento das obras de enrocamento, possibilitando uma análise em termos de tensão-deformação.

Finalmente um dos modos de julgar os referidos progressos é a observação de barragens de aterro de enrocamento, considerando-se desnecessário salientar outros aspectos positivos decorrentes deste procedimento.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRY COOKE, J. - "Design, methods of construction and performance of high rockfill dams (above 80 m)". Trans. of the Eighth Int. Cong. on Large Dams. General Report (question n.º 31). Edinburgh, 1964.
- CALENDA, G. - "Dighe di pietrame". Università Degli Studi di Roma. Istituto di Costruzioni Idrauliche. Pub. n.º 111, Serie Scientifica. Roma, 1971.
- CREAGER, W. P., DUSTIN, J. D. e HINDS, J. - "Engineering for dams". John Wiley & Sons, New York, 1944.
- ENGINEERING NEWS-RECORD, 16, October, 1975.

- HERRERAS, J. A. - "The membrane of the Pozo de Los Ramos dam". Eleventh Int. Cong. on Large Dams, vol. III, R 48. Madrid, 1973.
- IGNATYUK, G. L. - "Rockfill dam construction in Soviet Union with the use of directed blasting". Trans. of the Tenth Int. Cong. on Large Dams, vol. I, R 16. Montreal, 1970.
- JIMENEZ SALAS, J. A. - "Presas de materiales sueltos" - Grandes Presas. Experiencias Españolas en su Proyecto y Construcción. Editado pelo Comité Nacional Español de Grandes Presas. Madrid, 1976.
- LAA, G. G. e HERNANDEZ, J. L. R. - "Breve comentário a una estatística de presas españolas de materiales sueltos". Memórias del Simpósio Nacional sobre Rocas Blandas, vol. I, B 1. Madrid, 1976.
- MARANHA DAS NEVES, E. e VEIGA PINTO, A. - "Enrocamentos. Atualização de conhecimentos, estudos experimentais e aplicações em barragens e vias de comunicação". Relatório LNEC, Lisboa, Junho, 1977.
- MELLO, V. F. B. de - "Recomendações referentes a estudos geológicos e geotécnicos para barragens". 8.º Seminário Nacional de Grandes Barragens. São Paulo, 1972.
- MELLO, V. F. B. de - "Dispositivos de impermeabilização de barragens de enrocamento e apreciação simultânea da protecção de taludes". Geotecnia n.º 14, pp. 23-51. Out. Nov., 1975.
- PENMAN, A. D. M. - "Rockfill". Building Research Station. Current Paper, Abril, 1971.
- RODRIGUEZ-MIRANDA, M. A. e GUTIERRES MANJON, J. M. - "Comportamiento de un pedraplen de 80 metros de altura para una autopista" Memórias del Simpósio Nacional sobre Rocas Blandas, vol. 1, B 3. Madrid, 1976.
- SCHMITTER, N. J. - "The evolution of arch dams". Part Two. Water Power and Dam Construction. November, 1976.
- SEMBENELLI, P. e FAJIOLO, M. - "Aguada Blanca rockfill dam with metal facing". Journal of the Geot. Eng. Div., ASCE, pp. 31-35. Jan., 1974.
- SHERARD, J. L., WOODWARD, R. J., GIZIENSKI, S. F. e CLEVINGER, W. A. - "Earth and earth-rock dams". John Wiley & Sons. New York, 1963.
- SLICHTER, F. B. - "Influences on selection on the type of dam". Journal of the Soil Mech. and Found. Eng., ASCE, vol. 93, NO. SM 3. May, 1967.
- WILKINS, J. K., MITCHELL, W. P., FITZPATRICK, M. D. e LIGGINS, T. - "The design of Cethana concrete face rockfill dam". Eleventh Int. Cong. on Large Dams, vol. III, R 3. Madrid, 1973.