

# CONSIDERAÇÕES SOBRE A ADMISSÃO DE FINOS EM ENROCAMENTOS

## Considerations on the acceptance of small size particles in rockfills

por

M. J. Leal Gomes\*

**RESUMO** — Na presente nota técnica procura analisar-se o papel dos finos no comportamento dos enrocamentos, salientando que a granulometria desses finos e a sua proporção em relação aos elementos grosseiros que constituem o enrocamento propriamente dito têm uma intervenção complexa e pouco esclarecida no comportamento e na estabilidade dos aterros de enrocamento, traduzida, frequentemente, em mais severas exigências de segurança no projecto. Aborda-se a própria definição de fino, referindo a indefinição do diâmetro a partir do qual as partículas conferem ao enrocamento propriedades que um material de grossos limpo não manifestaria, mormente aquelas que são desfavoráveis aos empreendimentos de engenharia. As observações que faremos incidirão principalmente sobre barragens até 50 metros de altura (empreendimentos correntes), ( $\sigma_v < 10 \text{ kg/cm}^2$ ). As considerações delineadas poderão, todavia, ter interesse em outras situações mais severas. Acaba-se referindo o caso concreto do projecto de uma barragem de ENS (enrocamento não seleccionado) com núcleo argiloso, onde houve que considerar o problema dos finos no enrocamento e sua eventual mobilização através do corpo da barragem, apesar da escassez de elementos na literatura e de antecedentes conclusivos disponíveis.

**SYNOPSIS** — In this paper we try to analyse the role and the influence of the small size particles included in the rockfills on their behaviour, emphasizing the complex and the little clarified meaning of their size and their percentage in the rockfills, over the behaviour and stability, usually translated in harder safety factors of project. It is related the lack of a clear definition when the smallness of the particles and their proportion give to the whole rockfills different attributes from the clean coarse rockfill, mainly those unfavourable to the engineering works. The study comprises mainly dams till 50 meter in height (the most usual works), but probably some present considerations may be applied to harder situations. We finish referring a "tout venant" dam with clay core where it was necessary the consideration of the admission of the small size particles (soils) in the rockfill and their possible migration through the dam in spite of the lack of conclusive antecedents.

### 1 — INTRODUÇÃO

A partir de meados da década de 60 assistiu-se em todo o mundo a um grande incremento das obras de terra e de enrocamento, principalmente de barragens, cada vez mais extensas e de maior altura. O uso de enrocamentos tornou-se assim cada vez mais vulgar, sendo hoje considerada relativamente bem dominada a tecnologia de construção nestes materiais.

---

\* Engenheiro de Minas, Assistente da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Embora intuitiva, a definição de enrocamento não deixa de ser controversa e liga-se directamente ao objectivo desta nota técnica. Maranhã das Neves diz que uma barragem zonada se diz de enrocamento "se, construída com material de enrocamento, exhibir um coeficiente de permeabilidade maior ou igual a  $10^{-3}$  cm/s", acrescentando que a quantidade de finos poderá ser qualquer desde que compatível com aquele limite. Como veremos, embora a maioria das situações sancione este ponto de vista, ele põe dificuldades porque não considera aspectos de deformabilidade e resistência.

Posteriormente Maranhã *et al.* (1984) definem "enrocamento" como um material de aterro em que mais de 60% fica retido no peneiro de 3/4 (2 cm) sendo o material misto quando o material retido nesse peneiro varia entre 60% e 35%. Abaixo desse valor espera-se que ele já possa ser tratado como um material terroso sendo inclusive viável o seu controlo de compactação pelos métodos convencionais do tipo Proctor, enquanto para os enrocamentos semelhante procedimento põe apreciáveis dificuldades e a sua eficiência (admitindo tais ensaios realizáveis rotineiramente, o que não se afigura muito fácil, podendo mesmo ser impossíveis, pelos volumes envolvidos) em face do seu tipo de comportamento reológico, tendo em atenção a natureza dos materiais e a sua granulometria, não deverá ser grande. Realmente não fará sentido, à partida, falar em humidade óptima ou desvio de humidade em meios onde a água intersticial se perde com imediata anulação das tensões neutras. É sabido que na prática, relativamente à adição de água às camadas lançadas no aterro, se adoptou uma regra de procedimento tão vaga como regar os enrocamentos a compactar (ou não) com 150 a 300 l de água/m<sup>3</sup> de aterro, sendo porém o contexto desta operação — como transparece do que adiante se diz — algo distinto das operações análogas conduzidas na construção de maciços de terra.

Julgamos que uma definição mais simples e geral e que reúne os pontos de vista anteriores é considerar como enrocamentos os materiais que uma vez colocados na obra exibam uma estabilidade, no seu mais amplo sentido, controlada principalmente pelos "grossos" e uma permeabilidade elevada, geralmente consentânea com a imediata dissipação de tensões neutras, quer em fase construtiva quer de rebaixamento rápido. Esta definição talvez peque por excessiva latitude mas tem o mérito de permitir a inclusão entre os enrocamentos de materiais que, embora exibindo comportamentos algo diferentes dos que as definições anteriores deixam entender, apresentam problemas de exploração, construção e controlo análogos aos dos enrocamentos típicos. É evidente que esta definição põe desde logo dificuldades no estabelecimento da diferença entre "grossos" (materiais inequivocamente de enrocamento) e "finos" (vulgarmente associados aos materiais terrosos). Como veremos, estas granulometrias poderão ter um papel importante no comportamento das obras de enrocamento. Dentro da óptica intuitiva em que estamos a abordar este assunto, umas das justificações deste estudo pode ser, por exemplo, a necessidade de aceitar, acrescentar ou subtrair ao enrocamento, processado ou não, material terroso, para suavizar a diferença de deformabilidades, numa estrutura zonada, entre os diversos órgãos. No caso de barragens zonadas há o clássico problema da transferência de tensões entre o núcleo e os maciços estabilizadores de enrocamento com riscos de fracturação do núcleo. São pois necessários critérios que, se nalgumas circunstâncias não põem grandes dificuldades, noutros casos exigem a apreciação caso a caso quanto ao material "fino" admissível no aterro. Aliás, para concluir que este problema dos finos em enrocamentos não é

um mero preciosismo, há o facto de Victor de Mello citar que enquanto os aterros de enrocamento eram construídos com materiais limpos, vulgarmente apenas lançados e compactados pelo choque e peso próprios, os taludes aceites como seguros eram muito mais íngremes do que aqueles que se passaram a usar, quando por motivos de deformabilidade se começaram a utilizar enrocamentos sujos e compactados com rolos vibratórios. Nestes casos o volume de material de aterro é significativamente maior, com implicações económicas de importância maior ou menor conforme os casos. Também o desenvolvimento de equipamentos pesados de compactação ajudou a vulgarizar o uso do material não seleccionado proveniente de desmontes e outros empréstimos, directamente transportado para a obra e lançado em camadas variando geralmente entre os 0,60 e 1,20 de espessura sem processamento intermédio.

Assim, consoante a sua origem, esse material poderá ser são e resistente, desmontado a fogo (após morosos ensaios prévios com vista à obtenção da melhor granulometria), exibindo vulgarmente dimensões e coeficientes de uniformidade elevados, normalmente entre 3 e 5, ou alterado, conferindo características de resistência, de permeabilidade, de deformabilidade e de evolução no tempo, quer em termos de assentamentos quer de alterabilidade, diferentes das do primeiro, que têm de ser atentamente consideradas e frequentemente segundo perspectivas um tanto distintas. Frequentemente nestes últimos casos se usa a ripagem ou a escavação mecânica como métodos de exploração e fácil é concluir que nestas circunstâncias o papel dos "finos" já deve ser considerável, qualquer que seja a sua origem e natureza.

Sendo os materiais obtidos em rocha de elevada qualidade, geralmente desmontados a fogo e apresentando grande uniformidade, colocam problemas diferentes dos obtidos por outros processos, em empréstimos pouco são, alteráveis ou já com grande quantidade de finos na origem.

Frequentemente há necessidade de importantes desmontes para a instalação de órgãos hidráulicos ou de desvio em barragens e, aproveitando directamente o material dos desmontes sem operações de gradação de calibres, se possível sem parqueamentos intermédios a complicar e a onerar as operações, com os escombros consegue-se uma das construções mais económicas dos barramentos a executar. No fundo havendo material de desmonte adequado, é uma questão de se compararem as opções viáveis, sob o ponto de vista de economia, segurança e conhecimento prévio do funcionamento das estruturas, nesses materiais terrosos e rochosos com as opções em betão. No caso dos desmontes necessários à implantação de obras hidráulicas, a remoção e a acumulação dos escombros em escombrelas não só implicariam em excesso de despesas como eventualmente poderiam vir a ocupar áreas com utilidade para outros fins.

Fizeram-se estes parêntesis para salientar que o uso de enrocamentos cuidadosamente processados vai sendo menos vulgar. Mas sob o ponto de vista de admissão de finos chega a cair-se na posição extrema de admitir indiscriminadamente qualquer percentagem, o que talvez não sirva como norma.

Sendo viável, a execução de obras nestes materiais grosseiros põe poucos problemas, dispondo os maciços de enrocamento de elevada permeabilidade, de uma maneira geral, e elevada resistência, com redução dos volumes a mobilizar na construção, só por si tornando muitas vezes economicamente interessante o seu uso.

Do exposto se conclui que o enrocamento constitui um bom material de construção de aterros e em especial dos maciços estabilizadores de barragens zonadas ou com cortina de montante, ou mesmo para o corpo de aterros com outras funções em que se não exija estanquidade transversal.

Dentro dos pontos de vista apresentados não há aparentemente restrições quanto ao tipo de material a ser usado nos enrocamentos sejam estes processados com vista principalmente à obtenção de granulometrias determinadas ou não (enrocamentos não seleccionados). Mas como se referiu é necessário nalguns casos uma atenta consideração no tocante aos finos presentes no aterro porque, como se verá, influem nas características de estabilidade, resistência, deformabilidade, permeabilidade, podendo inclusive migrar duns órgãos para outros com efeitos perniciosos ou que têm de se previstos.

É notória a dificuldade em definir “fino” dentro desta problemática.

Julgamos que eles corresponderão sempre a granulometrias de reduzido diâmetro. Se essa definição é suficiente em relação a siltes e argilas já o limite superior das referidas dimensões permanece indefinido. Em relação a materiais até à ordem de grandeza do areão (2 mm) podemos usar como critério o seu ângulo de atrito, em geral significativamente inferior aos dos blocos de enrocamento ou de cascalho e que submersos e sem confinamento perdem as suas características de resistência ao corte, já que a superfície específica oferecida às pressões hidráulicas pelas areias é muito superior à dos materiais mais grosseiros que concomitantemente transmitem entre si pressões mais elevadas nos pontos de contacto dos clastos. Assim, enquanto é possível manter um talude com determinada altura de cascalho ou de partículas mais grosseiras, submerso (enrocamento), isso não acontece com essas partículas de menores dimensões (finos), para a mesma pressão hidrostática. Mas o que se verifica é que a definição de “fino” depende bastante da propriedade que se está a considerar e ainda que os aspectos de resistência e deformabilidade associados a este problema têm cariz diferente consoante os estados de tensão envolvidos.

Considerando os enrocamentos constituídos por um esqueleto de grossos exercendo pressões entre si, clasto a clasto, com finos preenchendo os vazios ou mesmo intercalando-se nas áreas de contacto, também poderemos admitir como critério de definição de “fino” aquela dimensão para a qual há significativa proporção (carecendo este aspecto de investigação ulterior) que já não participa do processo de transmissão de tensões através do corpo do aterro como que alojadas em cavidades, livres e sob este aspecto inactivas. Trata-se de definição com contexto muito diferente da anterior. Como se verá estes elementos apenas prejudicam as funções estabilizadoras dos corpos de enrocamento diminuindo a permeabilidade e desfavorecendo mesmo a resistência, nada contribuindo para o controlo de deformabilidades. Na verdade o esqueleto de finos que participam na transmissão de tensões vai variando em função dos assentamentos por compactação, por carregamento do aterro acima da camada em questão e ao longo do tempo, mas uma vez estabelecida a altura máxima do aterro, a percentagem de finos transmissores de tensões permanece sensivelmente a mesma, já que pouco variam as tensões envolvidas (ressalvando o efeito das flutuações do nível das albufeiras e o eventual desenvolvimento de fracções viscosas), e por conseguinte as áreas de contacto das partículas necessárias para as receber sem posteriores fracturações e rearranjos dos clastos.

## 2 — A ESTABILIDADE DOS MACIÇOS DE ENROCAMENTO E O PAPEL DOS “FINOS”

É difícil conseguir-se um enrocamento limpo de finos. Ainda que um material seja processado e lavado, uma vez colocado, a simples pressão de umas pedras contra as outras e os rearranjos estruturais, provenientes da compactação e acumulação, os produzem, se bem que nestas condições não afectando os parâmetros básicos de cálculo. Esse material de menor granulometria tenderá a preencher os espaços entre as pedras maiores sem intervir seriamente nos parâmetros de resistência dos maciços.

Com a compactação diminui o índice de vazios, aumentando a probabilidade de uma eventual superfície crítica ou de equilíbrio limite encontrar um maior número de fragmentos a galgar, a deslocar ou mesmo a romper, consoante o confinamento, beneficiando deste modo a estabilidade do aterro. Este último ponto traduz-se frequentemente no aspecto das envolventes de rotura que a partir de cerca dos 10 kg/cm<sup>2</sup> de pressão normal apresentam significativa diminuição do ângulo de atrito (Fig. 1), mas certa “coesão fictícia”. E é sabido como as análises de estabilidade convencionais são sensíveis mesmo a reduzidos acréscimos da coesão.

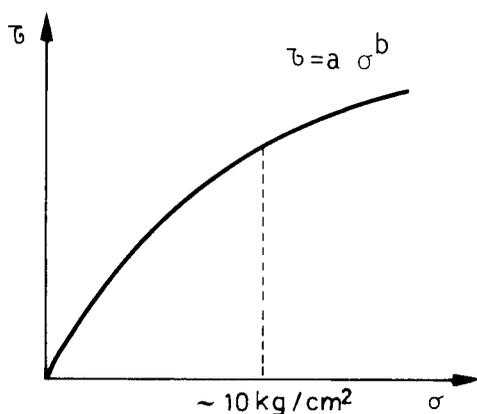


Fig. 1

Todavia na prática a curva referida reflecte-se em algumas barragens elevadas no aparecimento de taludes mais íngremes nas cotas superiores onde as tensões envolvidas são mais reduzidas. A cotas mais baixas a menor inclinação dos taludes traduz a precaução de se considerar um ângulo de atrito do enrocamento menor. Aí a rotura tenderá a dar-se não só por galgamento ou rolamento dos clastos a tensões inferiores, mas também por esmagamento dos fragmentos no plano de corte, associada a relativa ausência de confinamento no sentido da tensão principal mínima, sendo que, nestes aterros, se estará próximo de uma situação de estado plano de tensões. Para baixos valores de  $\sigma_1$  ou da tensão octaédrica o efeito dilatante é pois muito importante.

Para baixos valores da tensão normal máxima — situação em que nos colocaremos em todo este estudo ao limitarmo-nos, como o fizemos no “resumo”, a barragens ou aterros de

altura não superior a cerca de 50 metros — Mogami (cit. Veiga Pinto) estabeleceu uma relação entre o índice de vazios, a forma, resistência ao esmagamento e origem dos fragmentos e o ângulo de atrito, tal que:

$$\text{sen } \varphi = \frac{K}{1 + e} \quad (1)$$

onde  $e$  é o índice de vazios e  $K$  é uma constante que conforme o esquema da Fig. 2 tem valores significativamente diferentes consoante os fragmentos de enrocamento forem provenientes do processamento de uma pedra sã (angulosos e uniformes) ou com origem em empréstimos que evoluíram naturalmente mostrando fragmentos mais arredondados.

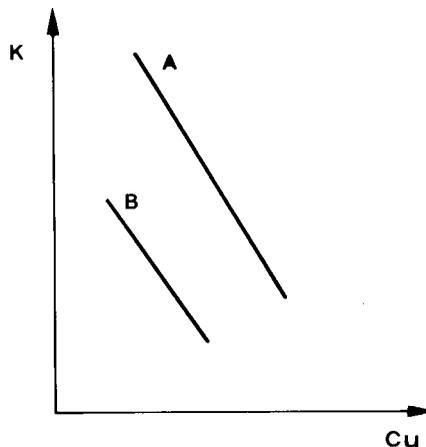


Fig. 2

- A - material de processamento de pedreiras
- B - material de génese natural

Esta relação, se outro mérito não tiver, chama a atenção para duas ordens de problemas extremamente complexas: a influência do índice de vazios do enrocamento construído e a sua origem e processamento, na resistência.

Citamos que de acordo com Leussink, Nichiporovich e Rankazov (cit. Maranhã) o ângulo de atrito aumenta com a dimensão das partículas enquanto Leslie, Marsal e Marachi *et al.* em estudos coevos concluíram o oposto. Os primeiros ainda são de opinião que considerando todos os restantes factores iguais, quanto mais extensa é a granulometria dum material, menor o seu ângulo de atrito. Entende-se este ponto de vista admitindo que as fracções mais finas insinuando-se entre outras mais grosseiras diminuem o imbricamento e áreas de contacto dos blocos rochosos maiores que opõem o seu maior volume muito mais resistente ao escorregamento que o material fino facilmente galgável do aterro.

Nesta perspectiva, talvez algo simplista, esses blocos conferem as principais garantias de estabilidade.

Todavia, apesar destes pontos de vista contraditórios, o que se acabou por concluir foi a tendência exposta na Fig. 1 (diminuição do ângulo de atrito com o confinamento), efeito que de acordo com as curvas apresentadas por Marachi e Becker (cit. Veiga Pinto — 1983) é muito superior à influência das dimensões das partículas.

Quando se deixa o domínio desses materiais mais grosseiros e se penetra no domínio do que convencionamos chamar “finos” não só o ângulo de atrito é geralmente mais baixo do que o daqueles, como se tem de considerar o seu papel atentamente. Com efeito, embora diminuindo eventualmente o índice de vazios preenchendo os espaços entre os blocos, será necessário que esses finos sejam “activos” na transmissão de tensões para poderem ser contabilizados no esquema mental proposto por Mogami. E é preciso notar que, teoricamente, a uma mesma distribuição granulométrica podem corresponder diferentes configurações espaciais “grossos-finos”, que podem conferir ao conjunto diferente resistência em relação à instabilização potencial, apesar de se terem obtido índice de vazios globais similares.

Outro aspecto que se pode ir adiantando é que, de acordo com Victor de Mello (1982), mesmo materiais granulares não argilosos se podem considerar possuidores de permeabilidades da ordem das argilas desde que exibam coeficientes de uniformidade entre 1000 e 2500, o que significa que terrenos ou aterros bem graduados, com uma vasta gama de finos, exibem problemas de permeabilidade a acrescentar aos que eventualmente se põem à resistência.

Compreendendo na definição de “finos”, que encetámos, principalmente as fracções de granulometria igual ou inferior à do areão (2 mm), podem admitir-se fundamentalmente cinco razões para a sua presença nos enrocamentos: *a)* resultarem do próprio processo de desmonte; *b)* serem provenientes de material terroso estranho adquirido ao longo das operações de carregamento, processamento, transbordo; *c)* serem intencionalmente adicionados ao enrocamento; *d)* resultarem da sua manipulação, lançamento, compactação e evolução dos estados de tensão nos corpos dos aterros; *e)* resultarem da alteração do enrocamento em fase de operação da obra.

Para fins de obra não tem grande importância a origem dos finos. De acordo com estudos efectuados, a mineralogia pouco afecta os parâmetros de deformabilidade e resistência, desde que se encarem as argilas não como minerais peculiares mas como fracções a que a pequeníssima granulometria conferiu propriedades físico-químicas particulares. Importa sim que além de certa percentagem — que para fins práticos importa determinar em muitas situações — prejudicam a resistência do maciço ao corte, diminuindo a probabilidade de a superfície crítica encontrar suficiente área resistente entre os blocos maiores, e inclusive produzindo inconvenientes segregações de terra no maciço construído, com todos os inconvenientes desse fenómeno. Assim se compreende facilmente a nota já referida de V. Mello de que os maciços compactados e idealmente sujos, por razões de deformabilidade, exibem menor ângulo de atrito. Aliás Veiga Pinto refere que percentagens ponderais de silte e argila de 10% já reduzem significativamente o ângulo de atrito e que um pouco acima desse valor já influenciam significativamente a permeabilidade.

É comum considerar-se o enrocamento em geral suficientemente permeável para dissipar instantaneamente as subpressões em qualquer das fases críticas da construção e operação do aterro. Se os materiais forem alteráveis e nesse processo produzirem importante fracção de

finos, deve avaliar-se a situação verificando-se se se degradam no tempo as condições do enrocamento. Por isso e não só, os aterros de enrocamento com importante fracção pelítica apresentam geralmente taludes bastante abatidos.

Aumentando a percentagem de finos, intuitivamente se sente que ficando os grossos isolados na massa terrosa, serão os parâmetros desta que passarão a controlar a estabilidade do aterro. Já se não poderá em rigor falar de enrocamento. Na prática ocorre esta situação, por exemplo, quando, intencionalmente e para reduzir os contrastes da deformabilidade entre o núcleo e os maciços estabilizadores, se adiciona cascalho à argila do núcleo. Evidentemente que então se põem problemas complicados de controlo de compactação, exigindo um perfeito envolvimento pela argila dos fragmentos de cascalho e evitando o grave desenvolvimento de canais preferenciais de percolação através dos órgãos de estanquidade.

A partir de certa quantidade de finos começarão a degradar-se as condições do aterro no tocante à estabilidade e rapidez no alívio das subpressões, sobretudo se a percentagem de material de granulometria inferior à do silte for importante. Acima duma percentagem ponderal de 30%, relativamente à resistência, o comportamento do “enrocamento” será o do solo fino (Veiga Pinto). Todavia, de acordo com o mesmo autor, já uma mistura de areia com enrocamento em percentagens entre 30 e 50% de areia corresponde a um máximo de resistência.

Quanto a eventuais dificuldades na dissipação de subpressões elas serão em geral localizadas e ocorrendo em determinada zona, far-se-á lateralmente através de trechos menos colmatados.

Aliás Victor de Mello diz que a própria compactação impõe condições em geral superiores às impostas pelo aterro na sua máxima altura (para barragens dentro dos limites em consideração — altura não superior a 50 metros). Na sua opinião a passagem dum cilindro compactador vibratório de 10 toneladas equivale a uma pré-compressão de  $7 \text{ kg/cm}^2$ , como que pré-testando o aterro ainda em fase construtiva, camada a camada. Semelhante carga pode assimilar-se ao peso total vertical de uma coluna de enrocamento de 35 metros de altura. Se se levarem em conta as formas aproximadamente trapezoidais das secções com taludes que para esta ordem de alturas e materiais uniformes anda pelos  $30$  a  $35^\circ$  de inclinação, é de esperar que a pré-compressão ainda favoreça barragens de altura um pouco superior por nas regiões próximas dos paramentos dos taludes, onde se presume que se iniciam as roturas e na maior parte do corpo dos aterros, atendendo à coluna de material suprajacente, se não atingir aquele valor. As condições da deformação plana geralmente associadas a este tipo de obras aparentemente também favorecem o cálculo da sua estabilidade (os esquemas mentais são baseados em resultados de triaxiais que conferem  $2^\circ$  a  $3^\circ$  menos de ângulo de atrito relativamente às condições de deformação plana). Se se tiver em conta que abaixo dos  $10 \text{ kg/cm}^2$  se trabalha frequentemente com ângulos de atrito a favor da segurança, todos estes efeitos conjugados, permitem, numa análise preliminar, que se considerem asseguradas pela compactação de rolos vibratórios de 10 toneladas barragens de altura inferior a 50 metros. Contudo acima dos 35 metros todas as ilações terão de ser cuidadosamente medidas, caso a caso, por já se estar, de certo modo, a lidar em domínios moveiços.

Admite-se ainda que há benefício do ângulo de atrito para baixos estados de tensão (Fig. 3) equivalentes à pré-compressão. Ela homogeneiza e pré-ensaia o aterro, além de lhe beneficiar a resistência. Portanto as regas abundantes do enrocamento e a sua compactação têm de ser consideradas favoráveis na medida em que testam previamente o aterro em relação às condições futuras de construção e operação.

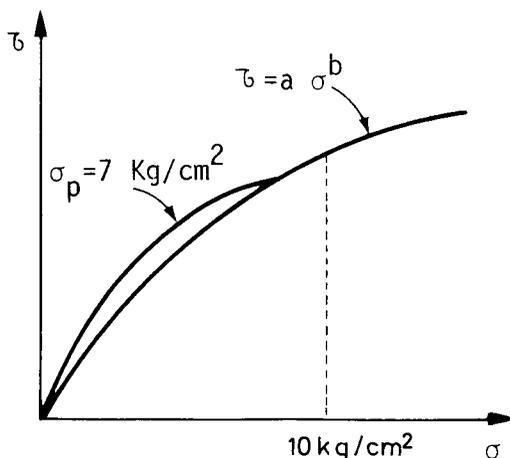


Fig. 3

Aparentemente, neste caso convém que o enrocamento seja tão limpo quanto possível de modo a que os finos não atenuem as pressões nos contactos entre os blocos, favorecendo a sua fracturação ou esmagamento nesses pontos (com ajuda de rega se necessário), o imbricamento e o aumento das áreas de contacto entre os clastos, com diminuição da tensão entre eles, o que favorece o coeficiente de atrito, traduzido na envolvente mais inclinada e até em alguma “coesão fictícia”. Refere-se que quando a granulometria é muito extensa a pré-compressão tem muito menor interesse, porque não há verdadeiro melhoramento da resistência, já que os milhares de contactos, grão a grão, traduzem o efeito dos pontos de contacto esmagados e dos rearranjos imbricados como acontece nos casos de grande uniformidade. Neste caso os finos têm um papel nocivo. Apesar disso reconhece-se que o comportamento melhorado ocorre paralelamente a uma redução de porosidade.

O enrocamento compactado embora sobreconsolidado não exhibe significativa expansão após a retirada da carga ou do compactador, embora a compactação tenha imposto enormes variações do índice de vazios. Na realidade após a compactação o módulo de deformabilidade de expansão é praticamente infinito. A título de curiosidade cita V. de Mello que os cascalhos compactados são dos materiais de aterro mais incompreensíveis que se conhecem e adianta que realmente se parece notar um aumento de  $\phi$  com a diminuição das dimensões máximas do enrocamento. Os cascalhos compactados também mostram melhores características de resistência do que os enrocamentos de pedra de maiores dimensões. Caso se pretenda usar os “tout-

-venant” a dificuldade está em que apesar da sua eventual uniformidade só muito raramente se conseguem enrocamentos não seleccionados constituídos por esses cascalhos sem participação importante de fragmentos maiores e até de menores dimensões.

Salienta ainda V. de Mello (1977) que a compactação de aterros cresceu exclusivamente devido à necessidade de controlar as deformações. Se no início as barragens de enrocamento de material lançado e simplesmente sujeito ao peso próprio exibiam inclinações de taludes de 60° para alturas da ordem dos 15 metros, quando se começaram a construir barragens mais elevadas os danos que as deformações ao longo do tempo produziam nos elementos impermeabilizadores (principalmente cortinas de montante) obrigou, ou quase forçou, a prática da compactação. E assim, de taludes próximos do “ângulo de repouso” dos materiais, evoluiu-se para taludes muito menos inclinados, sobretudo quando por razões de deformabilidade se começaram a sujar os enrocamentos concomitantemente com a compactação. Como se disse, as implicações económicas da inclinação dos taludes tornaram-se assim consideráveis. Na verdade, parece que relativamente aos parâmetros de resistência, o que acontece é que permanecem indefinidos os campos em que prepondera o benefício desses parâmetros por dois processos distintos mas complementares: ou pelo imbricamento dos blocos ou pelo aumento da área de contacto entre as partículas, com diminuição da tensão normal e elevação do coeficiente de atrito que, sabemos, varia com esta. Evidentemente que a partir de certo limite de proporção de finos, ainda muito incerto, a fundamental colaboração do contacto e imbricamento dos blocos maiores começa a ser prejudicada e com ela a resistência do conjunto do enrocamento.

Estima-se que a força de contacto média  $P$  num material granular uniforme seja dada por

$$P = \frac{2}{N_c n_s} \bar{p} \quad (2)$$

onde

$$\bar{p} = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2 + \sigma_z^2} \quad (3)$$

é a resultante das tensões efectivas;

$N_c$  é o número médio de contactos por grão que varia entre 3 e 15 num material granular uniforme, mas geralmente de valor compreendido entre 6 (pouco denso) e 8 (compactado). Em materiais não uniformes verifica-se que  $N_c$  é da mesma ordem de grandeza;

$n_s$  é o número de grãos por unidade de área representativa e depende da granulometria e do índice de vazios (cit. Veiga Pinto, 1978).

Verifica-se assim que, para determinado  $\bar{p}$ ,  $P$  depende quase exclusivamente de  $n_s$  que, para dada compacidade, cresce bastante com a diminuição da granulometria. Assim  $P$  depende do diâmetro dos grãos e deste modo se explica essa tendência para se sujarem os enrocamentos para se lhes diminuir a compressibilidade. Atendendo à discussão feita por V. de Mello isso só terá interesse quando a pré-compressão introduzida pelos rolos vibratórios for inferior à compressão aplicada pelo aterro em toda a sua altura, portanto para as camadas inferiores. Mais

para cima já o efeito do controlo da compressibilidade através da adição de finos é menos importante e permanece o interesse da pré-compressão. Aliás, autores há que afirmam que além de um  $Cu = 7$  já é reduzido o efeito sobre a compressibilidade no material de enrocamento a compactar.

Uma vez que  $P$  depende da dimensão dos grãos refere-se a expressão de Maranha das Neves *et al.* (1977) que se insere na mesma ordem de cogitações.

$$P = 3,8 d^{2,04} \quad (4)$$

onde  $d$  é o diâmetro dos grãos.

De tudo o que se afirmou já se observa que convém que as fracturações dos fragmentos tenham lugar na fase de construção, mantendo elevada resistência nas fases posteriores, reduzindo ao mínimo os assentamentos complementares que se verificam ao longo do tempo.

Nestas condições, a fim de manter a pressão média de contacto  $P$  inferior à pressão  $Pa$  de rotura dos fragmentos do enrocamento, quando as tensões envolvidas são muito elevadas, julgou-se assisado diminuir a deformabilidade através duma granulometria extensa. Essa deformabilidade deve-se a roturas localizadas, ao longo do tempo, em grande número. Mas se as barragens ou os aterros de enrocamento forem baixos este aspecto deixa de ter grande interesse. Convirá que no momento da construção se produza intensa fracturação e intensa pré-compressão, para restringir os futuros assentamentos. Através de compactação por rolos vibratórios de 10 toneladas isso só atinge o seu máximo interesse para barragens baixas convindo usar granulometrias uniformes. Para barragens de grande altura o recurso a enrocamentos sujos como controlo de assentamentos — ainda associado a compactação — pode ser mais eficaz. Assim sob o ponto de vista da deformabilidade há vantagem no uso de enrocamentos misturados com areias que em princípio garantirão numerosos contactos, com um  $P$  baixo. As areias puras são muito pouco compressíveis pelo que não há motivos para as compactar energeticamente. O número de contactos grão a grão é nelas muito elevado. Pela mesma razão não faz sentido usar para estes finos os critérios de pré-compressão que se usaram para os enrocamentos por serem inclusive perniciosos ou inúteis, já que além de difícil não há qualquer interesse na fracturação das areias, fazendo estas, geralmente, parte do sistema de filtros dos corpos das barragens de enrocamento. Basta que sejam vibradas e regadas de modo a acomodarem-se os grãos na sua configuração mais estável (Victor de Mello, 1982). Além das funções canalizadoras dos efluentes dos órgãos vizinhos e da dissipação de tensões neutras — papel que os enrocamentos uniformes, apesar de usados com funções estabilizadoras, realizam também bastante bem —, os filtros evitam principalmente o arrastamento pela percolação da água de finos através e para fora do corpo da barragem (erosão interna). Isso pode ter efeitos nocivos sobre as funções a serem desempenhadas pelos órgãos a que eles foram subtraídos ou por eles foram contaminados. E fazem a transição entre órgãos com deformabilidades muito diferentes, além de prevenirem problemas levantados pela colmatação e por eventuais danos nos órgãos de estanquidade.

Assim, tendo-nos limitado principalmente ao estudo de barragens até 50 metros de altura o problema das transições por filtros reside geralmente na transmissão de tensões do núcleo para os maciços, o que pode danificá-lo. As soluções que em geral se preconizam para este

fenómeno são a enérgica compactação e a contaminação intencional com finos das transições e filtros, para diminuir a sua deformabilidade. Todavia, em que medida esse procedimento deve ser seguido, não há elementos definitivos, salvo algumas regras muito gerais, pelo que pensamos que o assunto tem de ser considerado caso a caso.

Para barragens de grande altura em que o efeito de pré-compressão é limitado, o procedimento indicado parece ser o mais conveniente, estendendo a contaminação aos próprios maciços estabilizadores. Para barragens de menor altura parece ser a utilização localizada de granulometrias extensas, que façam a transição entre os finos do núcleo e o material dos maciços estabilizadores mais grosseiros e em princípio mais uniformes, onde prevalecerá a pré-compressão, o mais indicado.

Embora necessário, todo o zonamento de filtros implica algum acréscimo de dificuldades construtivas. Essas transições e filtros construídos principalmente com cascalhos e areias como se disse são pouco sensíveis ao efeito da pré-compressão e pouco deformáveis. Se os materiais de transição forem misturas de britas angulosas cheias de rugosidades e baixa esfericidade, já é de esperar maior compressibilidade de tais materiais pelo que a inclusão de finos entre os núcleos e os enrocamentos quase se impõe nalgumas situações. A dificuldade maior está na determinação da exacta percentagem em que se deve fazer intervir a areia, ou os finos de uma maneira geral, sem provocar a colmatação dos filtros (o que em muitos casos não seria grave pois a maioria dos maciços estabilizadores de enrocamento dispõe de elevada permeabilidade) e também evitando a migração indesejável das menores granulometrias através da barragem.

Parece já assente que há benefício da resistência e da deformabilidade com a diminuição da porosidade pelo que seria desejável proceder sempre com este objectivo. Mas em relação aos filtros e órgãos drenantes não convém que esta regra seja levada ao ponto de prejudicar a permeabilidade. Continua a ser de grande utilidade o conhecido critério de Terzaghi. O uso de transições ou filtros zonados evita o arraste de finos entre as pequenas granulometrias do núcleo, frequentemente com curvas granulométricas muito mais deitadas que as dos corpos dos enrocamentos uniformes. Aquele critério, na prática, obriga as curvas granulométricas das transições a disporem-se grosseiramente paralelas à do material base que se pretende proteger:

$$\begin{aligned} D_{15}(\text{filtro}) &> 4 \text{ a } 5 D_{15}(\text{material base}) \\ D_{15}(\text{filtro}) &< 4 \text{ a } 5 D_{85}(\text{material base}) \\ D_{15}(\text{filtro}) &< 40 D_{15}(\text{material base}) \end{aligned} \quad (5)$$

Por outro lado, zonando os filtros e espessando-os, do mesmo modo se contorna a dificuldade de com um único tipo de material se não conseguir fazer a dupla transição de granulometrias e deformabilidades. Para a quantidade de finos que se recomenda adicionar (controlo de deformabilidade) continua-se a trabalhar com base em critérios tão voláteis como traduzi-la numa percentagem arbitrária da porosidade compactada dos filtros ou do enrocamento limpos, conforme os casos, sendo o procedimento usual do respectivo controlo a simples avaliação visual da percentagem de finos em relação à totalidade do material lançado. Aliás as recomendações neste aspecto do Corps of Engineers não se afastam muito deste tipo de cogitações, parecendo ser a limitação principal no uso de finos para controlo de deformabili-

dade a exigência da manutenção duma permeabilidade consentânea com a imediata dissipação das pressões neutras. Felizmente para o dimensionamento dos filtros dispõe-se de critérios experimentais do tipo do de Terzaghi que permitem dimensionar com relativa segurança.

Do exposto podem resumir-se algumas conclusões genéricas mas que têm significado quando encaradas como directrizes:

- A porosidade é o factor essencial na observação deste tipo de questões. Se sob compactação é de admitir como facto inelutável a diminuição da porosidade, o aumento da percentagem de finos pode não significar benefício directo pois prejudica a pré-compressão e o seu interesse comprovado para pequenas alturas de aterro (<35 m). Por outro lado é variável a sua influência sobre o índice de vazios, conforme os casos em apreço.
- A compactação enérgica de dimensões entre a areia e a argila é pouco eficiente, se não quase irrelevante.
- Os materiais bem graduados exibem menor deformabilidade.
- Além de  $C_u > 7$  o efeito da gradação sobre a compressibilidade evanesce. Isso dispensa a inclusão de finos por razões de deformabilidade em muitos enrocamentos obtidos directamente dos empréstimos e de pedreiras.
- Além de certa percentagem os finos diminuem o valor do ângulo de atrito do enrocamento.
- Pequenas percentagens de silte e argilas ou de solos plásticos misturados com enrocamentos, em geral, produzem significativa diminuição da permeabilidade. Por isso há que ter atenção quando se utilizam materiais de matriz pelítica ou pouco são e avaliar a sua evolução ao longo da vida útil da obra.
- Além dos finos incluídos no enrocamento, lançados juntamente com o material grosseiro, há que contar com a possibilidade de formação de outros por efeito da alteração do material ou materiais do aterro. Também a migração de finos (que deve ser evitada com o auxílio de adequadas transições) pode contaminar órgãos onde eles são desfavoráveis ou mesmo causar fenómenos de erosão interna ou percolação livre. Estes aspectos estão muito pouco esclarecidos e a sua importância real mal estabelecida.
- A presença de uma percentagem elevada de finos que não participam na transmissão de tensões (mesmo que ao longo do tempo se modifique a configuração do esqueleto resistente) é, aparentemente, sob todos os pontos de vista, desfavorável.
- Uma das maiores dificuldades no projecto das transições é a avaliação das correctas proporções de finos a incluir ou a admitir nesses órgãos.
- As granulometrias extensas podem favorecer a deformabilidade e eventualmente a resistência (esta dentro de limites a analisar) mas podem prejudicar a permeabilidade que nos enrocamentos e principalmente nos enrocamentos de barragens se pretende geralmente elevada. Talvez tenha interesse verificar qual a não uniformidade limite consentânea com a imediata dissipação de pressões neutras. Todavia não parece tratar-se de questão premente.

- As pressões de percolação tendem a arrastar os finos (principalmente os que deixam de participar na transmissão de tensões) para os contactos entre os grãos ou blocos maiores. Insinuando-se entre estes, podem admitir-se situações em que prejudiquem localmente a resistência do aterro. Por isso são de recear.
- As rochas sãs eruptivas tendem a alterar-se pouco e constituem excelentes materiais de enrocamento compactado, principalmente para as obras de pequena a média altura que considerámos.
- Todas as rochas xistosas de vincada componente pelítica, mesmo sãs, tendem a alterar-se, sobretudo se sujeitas a embebição e principalmente a variações do teor em água (argilificação, esfoliação).
- Sob o ponto de vista de produção de finos, principalmente em presença da água, as rochas sedimentares gresosas e as margosas devem ser muito atentamente consideradas.
- Eventualmente, certas rochas, como os xistos, principalmente os alterados, quando utilizados como enrocamento podem levar à consideração de tensões neutras nas diferentes fases críticas da obra. Este facto pode obrigar a considerações de estabilidade da mesma ordem das usadas em obras de terra (de acordo com V. de Mello a maioria das obras de enrocamento não necessita de factores segurança tão elevados como as de terra).
- Deste modo podem considerar-se como regras, ainda que muito incipientes, para a admissão de finos, os seguintes aspectos a ponderar em cada caso concreto:
  - a) Deve estudar-se o valor mínimo de finos a incluir no enrocamento por necessidades impostas pela deformabilidade.
  - b) O limite superior da percentagem de finos é geralmente imposto pela resistência (ângulo de atrito). Este, para cada material e processo construtivo, reflecte-se na porosidade ou no peso específico.
  - c) A permeabilidade também limita superiormente a percentagem de finos admissível e a não uniformidade dos materiais de aterro.
  - d) Para elevadas tensões ( $\sigma_v > 10 \text{ kg/cm}^2$  — barragens altas) torna-se mais obscuro o papel dos finos. Melhoram a compressibilidade mas não está esclarecido o papel que terão sobre a resistência sob essas elevadas tensões em que os enrocamentos manifestam menor  $\phi$ . Sob este ponto de vista provavelmente terão intervenção diferente da que têm em barragens baixas, devido à substituição do simples mecanismo de cedência por galgamento ou de rolamento pelo de esmagamento. Inclusive o aterro já se não encontrará “pré-testado” nas suas zonas mais baixas. Só a experimentação e a observação de obras destes materiais poderão fornecer subsídios mais concretos.
  - e) No fundo, se não fossem os problemas de deformabilidade, dir-se-ia que convinha que os enrocamentos fossem o mais limpos possível a fim de proporcionar elevadas pré-compressões e boa permeabilidade (em obras baixas). Assim, salvo situações peculiares, continua pouco esclarecida a proporção óptima da inclusão ou admissão de finos em enrocamentos. Aliás, como facilmente se constata, esta questão depende não só dos materiais em apreço como de inúmeras outras variáveis, onde o tipo de órgão em que são utilizados, a sua disposição e a estrutura e funcionamento da obra são das mais importantes.

Finalmente há que ter sempre em mente que o material do aterro não rompe "por causa" das tensões instaladas. Embora cómoda e útil, esta visão é decerto convencional. O material rompe principalmente quando não é capaz de suportar sem solução de continuidade as extensões instaladas. Daí que em vários modelos de comportamento destas obras, intervenham nas mesmas relações parâmetros de resistência e de deformabilidade. Os modelos de estabilidade baseados em envolventes de rotura não são inteiramente satisfatórios. De certo modo é na reologia que se devem ir buscar as raízes do comportamento na rotura. Na verdade o fenómeno não se resolve nas suas causas e sim nas suas manifestações, isto é, nas extensões incompatíveis com a segurança e a continuidade. Continuamos a falar separadamente, embora de forma integrada, em resistência, deformabilidade e estados de tensão, porque em relação ao assunto em apreço nos continua a parecer que é o único caminho viável, em face dos elementos existentes, permitindo-nos eventualmente vir a estabelecer intervalos de percentagens admissíveis ou recomendáveis de finos em aterros de enrocamento, que é o nosso problema central.

### 3 — OS FINOS E O CONTROLO DE QUALIDADE DOS ATERROS DE ENROCAMENTO

O controlo de qualidade dos aterros de enrocamento depende muito dos ensaios prévios feitos em aterro experimental com os materiais a ensaiar. Dadas as dificuldades que por vezes envolve a sua execução em tempo útil, nem sempre são realizados, valendo-se o projectista de elementos conseguidos previamente em outras obras e na literatura. Por meio desses ensaios procura-se concluir, entre outros parâmetros, acerca do zonamento definitivo a dar à barragem ou ao aterro, da espessura das camadas a serem compactadas (quando for o caso), dos métodos de exploração das pedreiras e do eventual processamento dos produtos dos desmontes, qualquer que seja o processo utilizado.

No aterro, os parâmetros vulgarmente determinados são o peso específico "in situ" que envolve ensaios de difícil execução, consistindo na abertura dum poço no aterro cujo material extraído é pesado e cujo volume é avaliado através duma membrana plástica que cheia de água se adapta às paredes do poço. Atribuindo uma densidade ao material, ou à partícula, que inclusive poderá ser determinada de acordo com as normas existentes sobre o assunto, facilmente se obtém uma estimativa do valor da porosidade "in situ" e aproximações da compactidade relativa. A granulometria é determinada com maior facilidade e frequência pelos métodos de crivagem, peneiração e em casos particulares poderá o ensaio ser levado até à sedimentação, disso não havendo em geral grande necessidade pois as indicações práticas do peneiro 200 "mesh" já são geralmente suficientemente conclusivas, acerca das fracções da ordem do silte e inferiores. Fazem-se determinações granulométricas antes e após compactação determinando-se os intervalos dentro dos quais variam as percentagens dos vários diâmetros.

Os ensaios referidos associados àqueles que se referem ao próprio método de desmonte ou exploração do empréstimo permitem chegar às recomendações mais importantes sobre a futura actividade de exploração, processamento e construção. Com efeito durante o desenvolvimento da construção da obra é difícil frequentemente alterar rotinas que já devem vir estabelecidas no projecto.

Nesta fase controla-se principalmente a deformabilidade medindo-se os assentamentos por meio de nivelamento (os interiores exigirão o prévio enterramento de marcas que são depois expostas por escavação). Há outros processos envolvendo tubos enterrados cuja deformação com o crescimento do aterro é medida por métodos adequados.

Outras determinações de deformabilidade consistem em ensaios de placas rígidas onde a carga é aplicada por macacos ou pesos, mas que pela sua dificuldade de execução são realizados com parcimónia. Os ensaios de permeabilidade são os mais fáceis de executar. Pode utilizar-se o vulgar princípio do método Lefranc, por exemplo.

Finalmente as determinações do ângulo de atrito executadas por corte directo são também dispendiosas. Veiga Pinto (1983) refere a execução do ensaio preconizado por Barton e Kjaernsli para a obtenção do ângulo de atrito interno através do enterramento de caixas de corte de grandes dimensões. Uma vez preenchidas com o material do aterro e compactado o seu conteúdo pela passagem dos rolos vibratórios, como toda a camada em que são previamente inseridas, removido o material envolvente das caixas, o seu conteúdo mantém características que se julgam representativas das do nível do aterro em que se encontravam. São então ensaiadas ao corte para verificação dos parâmetros de resistência.

Já para fins de projecto há também o recurso a alguns subsídios fornecidos pela retro-análise, principalmente de acidentes.

Além de todas estas técnicas aqui muito sumariamente descritas, as técnicas de modelagem de materiais, que procuram essencialmente representar ensaios sobre enrocamentos reais a partir de partículas com dimensão máxima bastante menor, estão também em uso mas ainda se resumem ao campo experimental. A vantagem principal do método é a possibilidade de uso de equipamento laboratorial, ainda assim de grandes dimensões.

Na prática, o controlo de qualidade destes aterros assenta fundamentalmente na determinação das granulometrias (e eventualmente do peso específico), pressupondo que para determinadas condições de exploração da pedra, processamento, colocação e compactação no aterro (previamente estabelecidas ou ensaiadas em aterros experimentais) tem uma estreita relação com o fuso granulométrico. Parece bastante sugestivo, em face de tudo o que se disse e atendendo à expressão 1), que exista uma ligação entre a resistência e a porosidade. Sendo os mais vulgares os ensaios de determinação da granulometria (com tolerâncias ensaiadas, estimadas ou estabelecidas por uma via empírica qualquer), procura-se correlacioná-los com os parâmetros fundamentais da estabilidade da obra. Sendo todos os outros tipos de ensaios bastante mais raros, baseia-se a construção dos aterros de enrocamento principalmente em especificações construtivas.

Se nos demorámos a sumariar os ensaios mais correntes em enrocamentos, foi por notar que só muito indirectamente a admissão de material fino ou de baixa granulometria em enrocamentos e o seu papel na estabilidade tem sido abordada.

Por outro lado o estudo da relação entre a compactação, a produção de finos e a percentagem de finos relativamente móveis que embora diminuam a porosidade e aumentem o peso específico não contribuem, como atrás se afirmou, para a estabilidade do aterro, ainda é mais incipiente. Há tentativas pouco sucedidas neste campo, praticamente em aberto, onde, por ausência de quaisquer normas, se podem tentar diversas linhas de investigação experimental.

Em relação com este assunto sugerimos como exemplo testes que terão como maiores óbices os que se apontaram anteriormente para a generalidade dos ensaios em enrocamentos (custos e dificuldades de execução). Porém, realizados quando se preveja ou verifique que os finos incluídos na matriz têm intervenção significativa no comportamento dos enrocamentos em causa, poderão dar subsídios com algum interesse mesmo que meramente indicativos, a serem usados com prudência e reserva. Eles darão sobretudo informação qualitativa, dizendo mais sobre as tendências do comportamento do material do que fornecendo valores taxativos, quando o problema for claramente de estatística de médias. Os ensaios que passamos a sugerir não são aliás mais do que meras indicações dum tipo de esquema mental em que se pode inserir esta pesquisa. Mesmo assim podem eventualmente conter directrizes úteis, caso se decida investigar certas vertentes do papel das granulometrias finas no comportamento dos enrocamentos.

Suponha-se a exploração num empréstimo dum material de que se pretende aumentar a resistência, por razões de projecto, com a adição de finos que diminuam a porosidade e aumentem a área específica de contacto entre partículas. Assim, tomando diversos diâmetros  $D$  dos finos a incluir, podem ensaiar-se em caixas do tipo das idealizadas por Barton e Kjaernsli as condições de compactação previstas para o aterro para diferentes percentagens  $D_i$  dos finos. Obter-se-ão curvas do tipo da Fig. 4, de tendência difícil de prever antecipadamente,

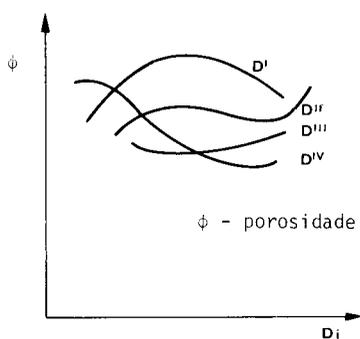


Fig. 4

das quais se poderá estimar a melhor mistura ou a percentagem de determinado diâmetro de finos que corresponde à menor porosidade ou, seleccionando o diâmetro e a melhor percentagem de admissão, para benefício da resistência. Também estarão em causa problemas de outra natureza, mormente de deformabilidade e de permeabilidade que são directamente contempladas neste ensaio, embora, feita uma pré-escolha da granulometria que se supõe mais conveniente, se lhe possam associar, na medida do possível, ensaios que visem

determinar estas últimas grandezas. Não temos conhecimento da realização deste género de estudos que nos parecem não serem muito mais complicados e onerosos do que outros que vêm sendo executados e muito esclareceriam, na nossa opinião, o papel dos diâmetros menores na resistência e até na reologia dos enrocamentos. Note-se que de acordo com Maranhã *et al.* o módulo de deformabilidade  $E$  de um provete depende do índice de vazios  $e_0$  através de:

$$E = a e_0^{-b} \quad (6)$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes que dependem da amostra.

Na verdade a consideração da importância dos finos no comportamento dos enrocamentos não tem tido um relevo comparável ao de outros factores e estudos sobre o assunto, mas casos

há, como se verá no número seguinte, em que a falta de subsídios obriga a estimativas vagas e seguramente algo distantes do óptimo ou até de proporções razoáveis.

Referiu-se também que havia interesse na determinação da quantidade de finos inactivos na transmissão de tensões. Os problemas que esta investigação põe são ainda mais complexos. Mas podem conceber-se diversos ensaios para o efeito, como o que se esboça abaixo, pecando por grande dificuldade de realização e rusticidade de métodos e conclusões. É até legítimo indagar se serão praticáveis. A sua sugestão poderá eventualmente dar uma indicação das dificuldades que se poderão encontrar na exploração laboratorial do assunto:

- a) Compactar o enrocamento no aterro ou em condições similares, ou fazê-lo em laboratório consolidando-o a pressões equivalentes às realizadas no campo, onde existirem células triaxiais com dimensões adequadas;
- b) Determinar a sua porosidade  $\emptyset_1$ ;
- c) Passar a amostra do enrocamento compactado após conveniente desagregação num peneiro correspondente a uma dimensão de “fino”, por exemplo, no de 10 “mesh” (2 mm);
- d<sub>1</sub>) Compactar ou consolidar com energia e em condições análogas às de a) a amostra de enrocamento privada dos finos < 2 mm;
- d<sub>2</sub>) Consolidar para o mesmo confinamento a fracção < 2 mm obtida no peneiramento;
- e) Determinar a porosidade  $\emptyset_2$  do enrocamento após d<sub>1</sub>).

(Eventualmente verificar a percentagem de material fracturado nesta compactação ou consolidação, que dará indicações sobre o grau de fracturação do enrocamento privado de finos, permitindo comparações e aferições de ordem qualitativa mas com algum significado);

- f) Comparar  $\emptyset_2$  com  $\emptyset_1$   
se  $\emptyset_2 > \emptyset_1$

f<sub>1</sub>) ou o volume de vazios ( $V$ ) correspondente a  $\emptyset_2$  da amostra de enrocamento é maior do que o volume da fracção < 2 mm ( $v$ ) — e neste caso é de admitir que haja partículas inactivas em abundância abaixo daquela granulometria (2 mm);

f<sub>2</sub>) ou  $V < v$  e é de esperar que a transmissão de tensões se faça em grande parte através dos finos;

Se  $\emptyset_2 < \emptyset_1$  o ensaio apenas indica que ou a compactação produz importantíssima quantidade de finos ou que o material de enrocamento é plástico e compressível em alto grau. O problema dos finos inactivos também aqui se não põe.

É evidente que, conforme aqui descrito, este ensaio introduz grosseiras imprecisões, não só nas estimativas das porosidades como nas comparações de  $V$  e  $v$  pois o enrocamento limpo, sob confinamento ou compactação, comporta-se diferentemente do enrocamento contendo os finos e estes consolidam de maneira distinta sem os grossos de permeio;

- g) Se se verificar f<sub>1</sub>) recomendar todo o ensaio a partir de a) mas limpando o enrocamento de fracções de granulometria superior à do peneiro usado em c), até se determinar a condição ou o diâmetro para o qual se estabeleça uma das outras condições, isto é, para

o qual deixa de haver percentagem importante de finos "inactivos" no infra do peneiro usado.

Caso se pretenda saber a partir de que diâmetro os finos se tornam inactivos, proceder inversamente.

Esta visão é simplista\* porque a avaliação dos finos mobilizáveis não depende da mera comparação de volumes e diâmetros, mas do arranjo do esqueleto que transmite as tensões. Assim introduz-se significativa imprecisão ao separarem-se as fracções finas das mais grosseiras. Mas havendo necessidade, pode ser que este procedimento, de prática extremamente complexa, necessitando de enorme apuro experimental (se se verificar a sua pertinência), dê pelo menos informações qualitativas com algum interesse e indicações quanto ao diâmetro mínimo acerca do qual em princípio há garantias de que participe na transmissão de tensões, sendo a porosidade que corresponde à sua homogeneização com os blocos maiores, após compactação, a que se deve fazer intervir nas equações, de modo a se estimarem com maior legitimidade os parâmetros de resistência e deformabilidade do aterro. Caberia talvez analisar se a eventual eliminação dos diâmetros móveis não contribuirá por sua vez para a libertação de partículas maiores. Por isso é talvez necessário mantê-los no enrocamento. É evidente que este procedimento exige aferição prática com os diferentes tipos de materiais de enrocamento, apenas se referindo, como se disse, como sugestão para eventuais experiências neste domínio tão pouco explorado. Inclusive pode admitir-se que a mobilidade dos finos não esteja tão estreitamente ligada à sua dimensão, podendo intervir outros aspectos. Mas esta objecção, em condições médias, parece-nos pouco aceitável.

Podem idealizar-se, ainda para o mesmo fim, outros ensaios como os que envolvam a percolação forçada através de uma amostra de enrocamento previamente compactada sob estados de tensão similares aos do campo. A recepção de finos no efluente seria indício claro da sua mobilidade. Mas para lá de dificuldades óbvias de padronização é de admitir que apenas uma fracção, variável conforme o caso, das partículas mobilizáveis acabaria por estar presente nesse efluente.

Note-se que esta linha de raciocínio continua a não esclarecer em que medida os finos potencialmente mobilizáveis intervêm nos parâmetros que descrevam o comportamento dos enrocamentos. Por exemplo, a insinuação de granulometrias inferiores ao silte entre os fragmentos maiores produz decerto reduções de resistência, principalmente se ainda estiverem em curso ajustamentos. A importância deste problema particular continua por esclarecer, como muitos outros e só não têm atraído maior atenção porque se usam factores de segurança e dispositivos com a específica intenção de obstar a imponderáveis. É inútil voltar a salientar que a realização rotineira destes estudos poderá ter um custo inaceitável. E a solução dos problemas postos por esses finos móveis poderá já estar abrangida nas cautelas exigidas por outra ordem de problemas mais ventilados, retirando grande parte da importância a estas preocupações.

---

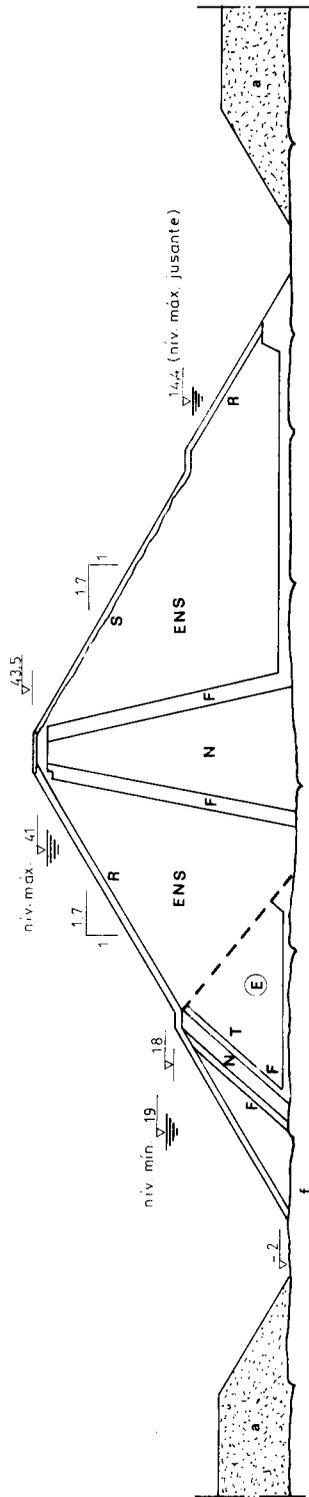
\* Foram toscas considerações desta índole que conduziram ao dimensionamento referido no número seguinte.

#### 4 — UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO

No anteprojecto da barragem do rio Boacica, afluente do rio São Francisco no estado de Alagoas, no Brasil, constatou-se depois de um estudo de viabilidade técnico-económico que a solução mais adequada consistia na construção de uma barragem de enrocamento, usando directamente os materiais dos desmontes para o desvio do rio, instalação do vertedouro, bacia de dissipação e outras obras acessórias que produziam um volume de escombros da ordem do necessário para a construção da opção escolhida dentre várias possíveis. Dada a abundância de material argiloso, e apesar da profunda e problemática escavação do aluvião que chegava aos 13 m de espessura, optou-se por um zonamento do tipo apresentado na Fig. 5 com núcleo central assente na rocha sã e maciços estabilizadores de enrocamento com filtros zonados espessos, a montante e a jusante, para fazerem a transição de deformabilidades e de tensões entre o núcleo e os maciços estabilizadores, além de terem de preencher as restantes funções que competem aos filtros.

Previa-se que os maciços estabilizadores seriam construídos com material de elevada uniformidade dada a natureza da rocha a desmontar, que era um gneisse quartzo-feldspático são, com alguma fissuração, mas de média a boa qualidade. Assim a produção de finos e granulometrias intermédias seria, em princípio, reduzida, havendo preocupações de deformabilidade. Na ausência de quaisquer outras investigações preliminares, limitados praticamente às sondagens para o estudo dos terrenos rochosos e silto-arenosos da cobertura residual e do aluvião do rio e à observação táctil-visual dos terrenos de empréstimo para o núcleo, decidiu-se que a melhor opção para evitar o acentuado contraste de deformabilidades núcleo/macíços estabilizadores seria a admissão ou mesmo a inclusão de finos, intencional nos filtros zonados, obedecendo às condições de Terzaghi, com aproximadamente 3 a 4 m de espessura, colocados numa ordem e granulometria adequadas às finalidades de evitar o arrastamento de finos e à colmatação de eventuais fendilhações do núcleo, não fazendo restrições severas quanto à contaminação por finos do próprio enrocamento não seleccionado dos maciços. Estimou-se que este, depois de colocado, não ofereceria porosidade inferior a 30%, suposto limpo. E admitiu-se, em face das directrizes e considerações que expusemos, que se poderia aceitar uma inclusão de material terroso até 25%. Este facto, por si só, demonstra as preocupações que havia com os aspectos da deformabilidade determinados por aquele tipo de enrocamento. Admitiu-se ainda que esta percentagem de finos não desfavorecia seriamente o interesse da compactação sobre os parâmetros de resistência.

Previa-se que este limite, um tanto arbitrariamente consentido viesse a ser estimado no transporte e lançamento por simples avaliação visual. Havia vagas referências ao problema e recomendações do US Corps of Engineers, que se seguiram. Apesar de se ter diminuído o ângulo de atrito “convencional” dos enrocamentos de 45° para 40° nas análises de estabilidade (considerou-se que a situação mais desfavorável seria a correspondente à situação de submersão de montante com água na cota máxima de 41 metros), com os taludes de projecto de 1: 1,7 chegou-se a um factor de segurança pelo método mais conservador (Fellenius) da ordem de 1,5, satisfazendo amplamente as exigências de segurança ao escorregamento. É certo que não havia necessidade de maior refinamento tendo em mente uma eventual economia, porque todo o material de enrocamento seria, como se disse, fornecido pelos desmontes necessários à instalação da obra, e o volume dos diversos tipos de materiais mobilizado na construção deste barramento rondava apenas os 600 000 m<sup>3</sup>.



N – Núcleo argiloso

F – Filtros

ENS – Enrocamento não seleccionado

R – Protecções de montante e jusante em "Rip-Rap"; enrocamento seleccionado e respectivas transições

S – Enrocamento segregado

E – Enseadeira a incorporar na barragem com estrutura a detalhar no projecto executivo (construída também principalmente em ENS)

a – Aluviões

f – Firme rochoso

T – Enrocamento de transição com bastantes finos (> 25%)

### CONCEPÇÃO PRELIMINAR

Fig. 5

Fig. 5

Considerou-se que aquele valor máximo de 25% de terra no enrocamento não afectava seriamente a desejada dissipação imediata de tensões neutras e o seu generalizado alívio através dos corpos do enrocamento. Todavia, tão elevado factor de segurança para um aterro de enrocamento era uma garantia adicional.

Também para evitar eventuais migrações de finos para o exterior, se colocaram filtros sob as protecções dos taludes e como é de norma, se zonaram cuidadosamente todas as transições. Dado o zonamento projectado para a barragem, dum tipo que V. de Mello considera necessitar de importante esforço de optimização, previam-se dificuldades na compatibilização das deformabilidades dos principais órgãos da barragem sem a inclusão de finos\*.

Na mesma oportunidade (1981) lamentou-se haver tão poucos antecedentes sobre o assunto. Tratava-se, é certo, de uma obra de pequenas dimensões. Mas, como muitas outras, ficou longe da solução ideal principalmente por falta de elementos e valores insuspeitos sobre tópicos como os abordados nesta nota. Atendendo à responsabilidade deste tipo de empreendimentos decerto acabou sobredimensionada. As reais exigências de segurança seriam provavelmente mais módicas, embora fosse extremamente difícil e temerário estimar em que medida.

## 5 — CONCLUSÕES

A exploração sucinta feita nestas páginas aponta aspectos muito complexos cujo estudo, apenas feito caso a caso talvez não ponha custos inviáveis em face dos benefícios à colher. O problema da consideração dos finos não será talvez dos mais importantes quando as alturas dos aterros (que já ultrapassam os 300 metros) é elevada. Outros aspectos têm decerto implicações técnicas e económicas mais graves. Mas para as vulgares barragens de baixa altura que, todavia, por vezes mobilizam muitos milhões de metros cúbicos de enrocamento, atingindo custos muito elevados, ele parece assumir um papel de certa importância, embora frequentemente considerado mais como um imponderável, ou a resolver com “receitas” expeditas, do que como um factor a observar com algum pormenor, que talvez o assunto mereça.

---

\* É discutível se o núcleo na geometria e posição indicadas seria o mais conveniente, mas a título preliminar julgou-se mais prudente e económico optar por um núcleo espesso que embora pusesse problemas de deformabilidade dava uma garantia adicional contra o desenvolvimento de canais preferenciais de percolação. A posição do órgão impermeabilizador da enscadeira é meramente indicativa mas, dado que a cota das descargas de fundo está situada acima do seu coroamento, não põe problemas de estabilidade em caso de rebaixamento rápido. O filtro de base de jusante destina-se também a prevenir o arrastamento de finos através do corpo de enrocamento.

## BIBLIOGRAFIA

- LNEC — *Enrocamentos*. Seminário n.º 235, LNEC, Lisboa, 1978.
- MARANHA DAS NEVES — *Obras de Terra*. Universidade Nova de Lisboa.
- MARANHA DAS NEVES e VEIGA PINTO — *Controlo de Compactação de Aterros de Barragens Constituídas por Materiais Naturais TOT*. "Geotecnia" 41, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 1984.
- VEIGA PINTO, A. — *Modelação de Enrocamentos*. "Geotecnia" 37, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 1983.
- VEIGA PINTO, A. — *Considerações sobre Barragens de Enrocamento com Cortina de Impermeabilização*. "Geotecnia" 40, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 1984.
- TECNOSAN S/A — *Barragem do Boacica — Relatório Final de Anteprojecto — Versão Preliminar*, São Paulo, 1981.
- MELLO, VICTOR F. B. de — *Reflections on Design Decisions of Practical Significance to Embankment Dams*. "Geotechnique" 27, No. 3, 279-355, 1977.
- MELLO, VICTOR F. B. de — *Comportamento de Materiais Compactados à luz de Experiência em Grandes Barragens*. "Geotecnia" 34, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 1982.
- MELLO, VICTOR F. B. de — *Instabilização de Taludes de Enrocamentos. Reapreciações Conceituais*. "Geotecnia" 47, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 1986.
- CORPS OF ENGINEERS, DEPARTMENT OF THE ARMY — *Earth and Rockfill Dams — General Design and Construction Considerations*, USA.