

COLAPSO DE ENROCAMENTOS*

Collapse of rockfills

por

E. MARANHA DAS NEVES**

A. VEIGA PINTO***

RESUMO — Os materiais de enrocamento exibem deformações devidas à molhagem ou saturação. Nesta comunicação são apresentados resultados de enrocamentos de baixa e elevada resistência ensaiados em câmaras de compressão unidimensional e compressão triaxial com vista à quantificação do fenómeno.

Os resultados indicaram que o colapso é mais importante nos enrocamentos de baixa resistência e que se obtêm assentamentos finais iguais se as amostras são saturadas antes da aplicação de cargas ou se são ensaiadas secas e só depois saturadas. Verificou-se ainda variação do coeficiente de Poisson devido à saturação dos provetes.

SYNOPSIS — The rockfill materials display collapse deformations due to wetting or saturation. In this paper the quantification of this phenomenon is shown for soft and hard rockfills tested in 1-D compression and triaxial apparatus. The results pointed to more important collapse in soft rockfill, to equal final settlements obtained after saturation of dry samples or if the specimens are saturated prior to tests, and to some variation of Poisson's ratio due to saturation.

1 — INTRODUÇÃO

Embora o fenómeno do colapso tenha sido largamente reconhecido em enrocamentos — principalmente devido à molhagem, saturação ou submersão — o seu significado prático é muitas vezes descuidado.

Neste trabalho é apresentada a caracterização do colapso de materiais de enrocamento utilizados em barragens de aterro portuguesas. Como será referido as deformações de colapso podem ser muito elevadas e afectar a funcionalidade ou mesmo a segurança de um determinado tipo de barragens de aterro.

* Versão em português de uma comunicação apresentada na 12.^a Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro, Agosto de 1989.

** Engenheiro Civil, Investigador-Coordenador e Chefe do Departamento de Geotecnia do LNEC.

*** Engenheiro Civil, Investigador Principal do LNEC

2 — MECANISMOS DO COLAPSO EM MATERIAIS GRANULARES

O colapso pode ser particularmente importante em materiais granulares, nomeadamente em materiais de enrocamento. Consiste numa variação volumétrica sobre tensão total constante devido a um aumento do teor em água do material.

Tem-se desenvolvido importante trabalho no domínio do colapso de solos argilosos e arenosos, sendo evidente o papel da estrutura neste fenómeno.

Este artigo refere-se às deformações de colapso exibidas pelos materiais de enrocamento e devidas à molhagem, submersão ou saturação.

As razões físicas que levam ao colapso dos materiais de enrocamento não são as mesmas das dos solos argilosos e arenosos. Nestes últimos tipos de materiais o colapso é devido a uma estrutura metaestável com unidades (partículas ou agregados de partículas) cujos contactos e ligações são de natureza muito diversa: tensões capilares, ligações de natureza química, “pontos” argilosos entre partículas de areia, etc. Mas a característica mais importante dos solos colapsíveis é que todas as ligações entre as unidades, quaisquer que sejam, são enfraquecidas pela adição de água.

Já no caso dos enrocamentos os factores principais que afectam o colapso são o estado de tensão, o tipo de rocha, o índice de vazios e a granulometria. Para além destes factores são importantes os mecanismos associados com variações do teor em água os quais são muito diferentes dos exibidos pelos solos.

As forças interparticulares têm de ser consideradas e os valores destas forças dependem sobretudo do número de contactos entre os elementos do meio granular e as tensões instaladas. Sabe-se que as forças entre os elementos rochosos dos enrocamentos são muito elevadas. Deste modo os estados de tensão nos “pontos” de contacto são também apreciáveis, o que conduz muitas vezes a importantes cedências (deformações com importante componente plástica) locais.

A tensão de rotura depende do tipo de rocha mas a presença de água pode aumentar a microfissuração dos cristais de rocha e modificar a sua energia superficial, sendo assim um factor importante no comportamento mecânico das zonas de contacto.

A adição de água produzirá pois rápidas cedências nas áreas de contacto, com as consequentes deformações nos maciços de enrocamento.

Estas deformações podem mesmo aumentar se as referidas cedências locais induzirem deslocamentos relativos entre elementos originando uma estrutura mais densa.

Dentro dos procedimentos utilizados para prever as deformações dos enrocamentos devidas ao colapso, as determinações experimentais dos parâmetros das equações constitutivas podem levantar algumas dificuldades típicas dos materiais deste tipo. É o caso dos ensaios laboratoriais que devem ser conduzidos em provetes com curvas granulométricas modeladas das de campo, já que estas contêm um grande número de elementos de elevada dimensão. Por tal motivo foram efectuados diversos estudos de modelação física de enrocamentos dos quais resultam importantes contribuições neste domínio, os quais foram tidos em linha de conta no presente trabalho.

3 — EQUIPAMENTO LABORATORIAL PARA QUANTIFICAR O COLAPSO

Na caracterização mecânica laboratorial de enrocamentos, ainda que recorrendo a granulometrias modeladas, tem de operar-se com equipamentos de elevada dimensão. Deste modo, quer os ensaios de corte triaxial quer os de compressão unidimensional foram conduzidos com equipamentos de grande dimensão projectados e construídos no LNEC. O diâmetro das amostras é de 0,30 m nos provetes triaxiais e de 0,50 m nos ensaios de compressão unidimensional (1-D). No caso deste último equipamento, deve-se referir que consiste numa câmara cuja parede lateral é constituída por anéis alternados de alumínio e borracha. Assim, durante a realização do ensaio as deformações radiais são praticamente nulas (como aliás seria de exigir em ensaios de compressão unidimensional); contudo, a deformabilidade axial do sistema é tão elevada que, apesar da considerável altura do provete, não se desenvolvem tensões de corte junto à parede da câmara.

Utilizando o procedimento acima descrito consegue obter-se uma distribuição homogênea de tensões. Por meio de extensómetros colados nos anéis de alumínio é possível medir as tensões radiais durante o ensaio, e desse modo obter o valor do coeficiente de impulso lateral (K).

Quando se provoca a submersão do material de enrocamento introduzindo água na célula, verifica-se normalmente variações da temperatura nos anéis de alumínio, pelo que os correspondentes efeitos têm de ser tidos em conta.

A Fig. 1 mostra um corte esquemático da câmara de compressão 1-D e a Fig. 2 apresenta uma vista do equipamento durante o ensaio.

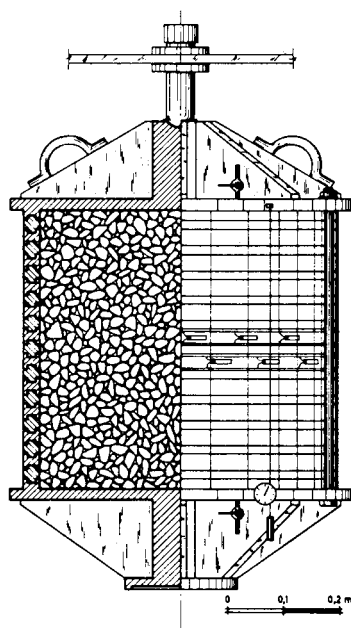


Fig. 1 — Ensaio de compressão 1-D

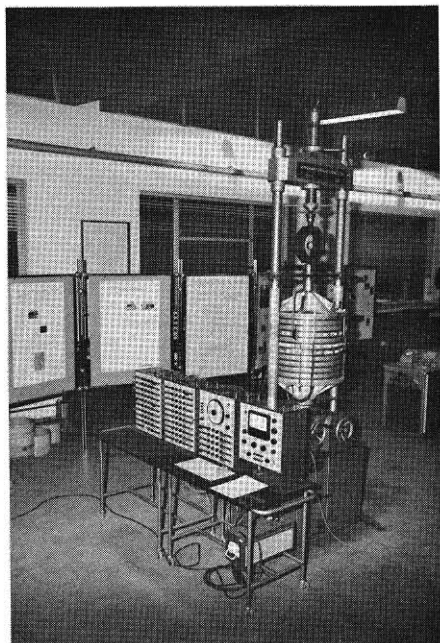


Fig. 2 — Equipamento de compressão 1-D durante a realização de um ensaio

4 — MODELAÇÃO DA GRANULOMETRIA

Na Fig. 3 apresentam-se as envolventes das curvas granulométricas dos materiais. Estes foram obtidos em aterros compactados. A mesma figura evidencia as alterações introduzidas para realização dos ensaios laboratoriais.

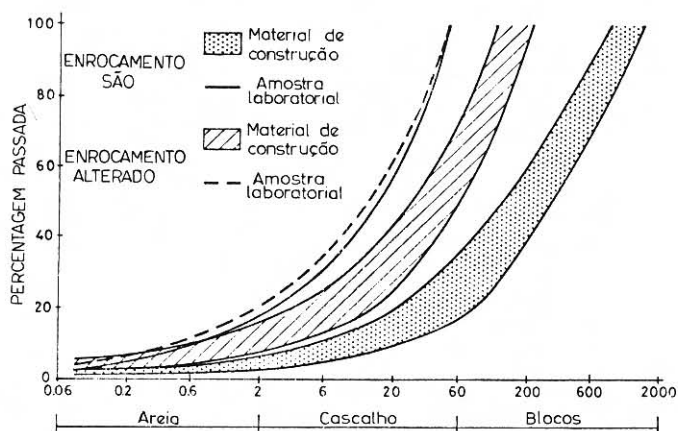


Fig. 3 — Curvas granulométricas dos materiais do aterro e amostras laboratoriais

Trata-se de materiais de enrocamento de mistura de xistos e grauvaques, tendo sido extraídas separadamente amostras de baixa resistência e elevada resistência, correspondentes a materiais alterado e são, respectivamente.

Como se deduz da Fig. 3, na preparação das amostras laboratoriais dos materiais do aterro não se efectuou apenas a eliminação do material mais grosseiro. Na realidade, se se utilizasse tal procedimento aumentar-se-ia a percentagem de finos (fracção inferior a 0,074 mm), o que se traduziria numa alteração do comportamento mecânico pelo que a modelação da granulometria não se poderia considerar adequada.

5 — ENSAIOS LABORATORIAIS

Em seguida descrevem-se resultados de ensaios de compressão unidimensional 1-D, especialmente conduzidos para quantificar o colapso devido à submersão.

5.1 — Ensaios de compressão unidimensional

Foram inicialmente ensaiadas duas amostras secas ao ar. Após se atingir a tensão axial de 0,2 e 1,0 MN/m² numa e noutra amostra respectivamente, passou-se à fase de saturação dos provetes. Outra amostra com o mesmo índice de vazios inicial (e_o) foi ensaiada após a sua saturação e antes de aplicação de cargas.

As curvas tensão-deformação são apresentadas na Fig. 4. Como se pode ver, as trajectórias das curvas das amostras secas após a saturação são aproximadamente iguais às das amostras inicialmente saturadas.

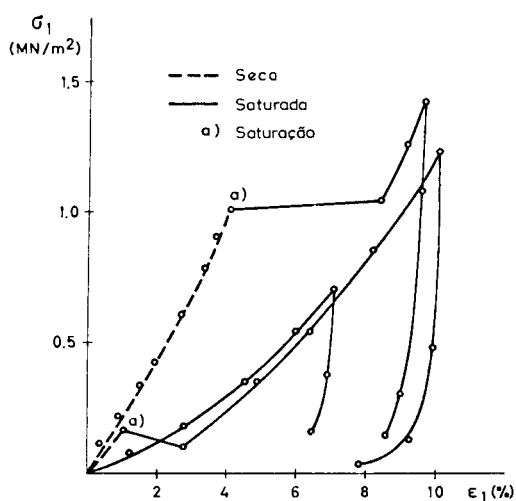


Fig. 4 — Ensaios de compressão (1-D). Enrocamento alterado

Comportamento semelhante foi obtido nos ensaios de enrocamento são, os quais se apresentam na Fig. 5. Esta conclusão experimental respeitante aos materiais de enrocamento, que tem sido apontada por alguns autores, é muito importante na modelação matemática do fenómeno do colapso.

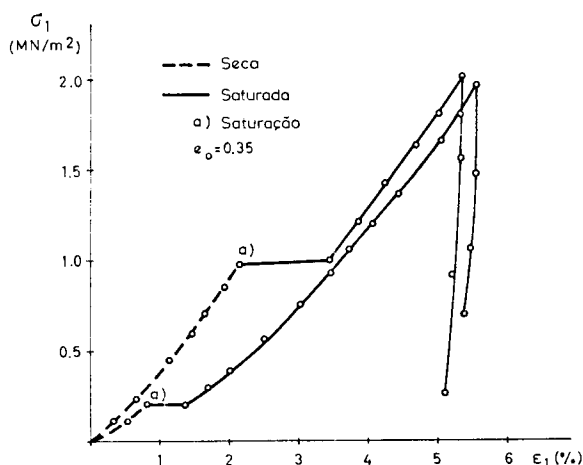


Fig. 5 — Ensaio de compressão (1-D). Enrocamento são

Da comparação dos resultados dos ensaios dos enrocamentos alterado e são conclui-se que o fenómeno do colapso é mais importante para os primeiros materiais. Por exemplo, as deformações volumétricas devidas ao colapso em enrocamentos alterados e para uma tensão axial de $1,0 \text{ MN/m}^2$ é cerca de 4,7%. Sob a mesma tensão axial o enrocamento são apresentou uma deformação de colapso de apenas 1,3%, ou seja um valor cerca de 3,6 vezes inferior.

Como seria de esperar o enrocamento são não é tão deformável como o do material alterado. O valor do módulo edométrico secante (E_{oed}) é de 38 MN/m^2 para o primeiro material, apresentando-se três vezes inferior no caso do enrocamento alterado.

Mediu-se ainda durante os ensaios o valor do $K (= \sigma_3/\sigma_1)$. Na Fig. 6 apresenta-se a variação do K medida durante o colapso do enrocamento alterado. Tanto quanto os autores conhecem é a primeira vez que são publicados resultados deste tipo que mostram variação de K durante o colapso contrariamente ao que normalmente se considera, isto é, que tal grandeza se mantém constante. Necessariamente estes resultados são muito importantes para uma correcta simulação do fenómeno em análises tensão-deformação de materiais de enrocamento.

5.2 — Ensaio triaxiais

Nas Figs. 7 e 8 apresentam-se os resultados dos ensaios triaxiais para os enrocamentos alterado e são, respectivamente. As amostras foram saturadas durante a fase de corte, excepto para duas amostras de enrocamento alterado que foram saturadas previamente.

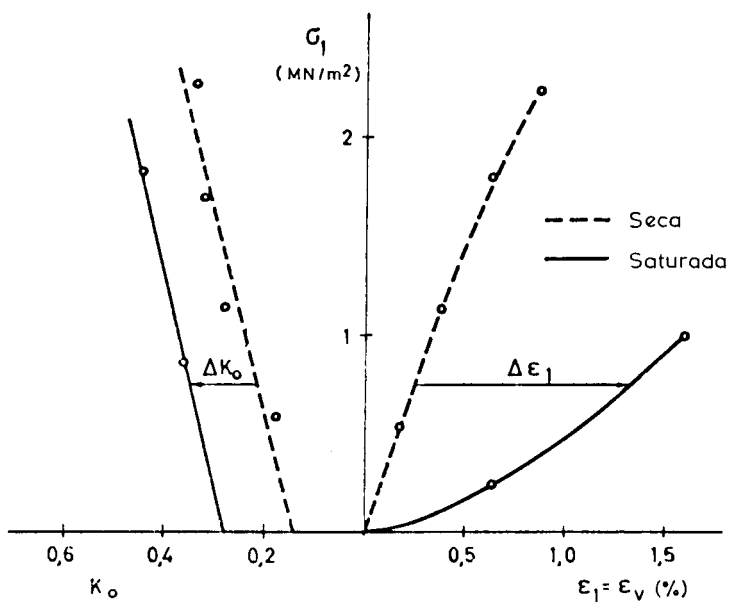


Fig. 6 — Ensaio de compressão 1-D. Enrocamento alterado (seco e saturado)

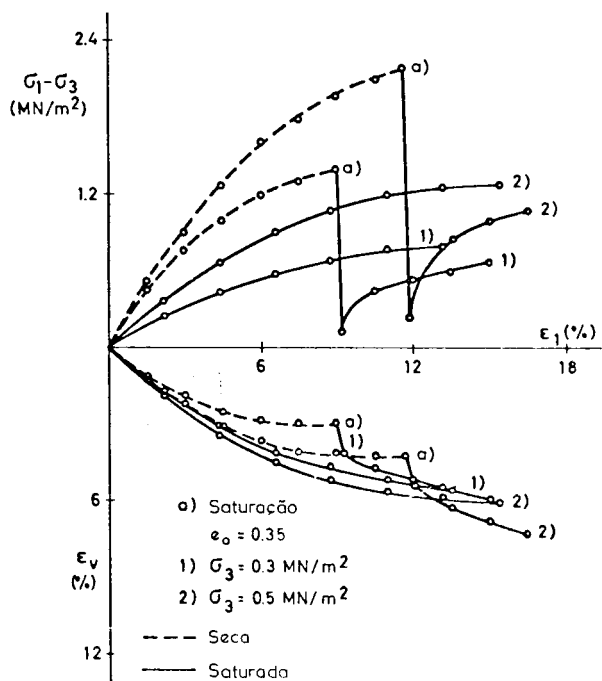


Fig. 7 — Ensaio de compressão triaxial. Enrocamento alterado

De modo análogo ao observado nos ensaios de compressão unidimensional, obteve-se nestes ensaios um colapso mais significativo nos enrocamentos alterados, para idênticos estados de tensão. Para tensões de confinamento crescentes aumentam a variação (decréscimo) da resistência ao corte e do colapso (deformação volumétrica).

Relativamente ao enrocamento alterado (Fig. 7), ensaiaram-se para a mesma tensão de confinamento duas amostras: uma previamente saturada e outra saturada apenas durante a fase de corte. Como se pode ver, para este tipo de trajetórias de tensão, as curvas tensão-deformação após a saturação (colapso) desenvolvem-se de tal modo que se sobrepõem às curvas tensão-deformação do material inicialmente saturado, fenómeno este de bastante interesse para a modelação do colapso de enrocamentos.

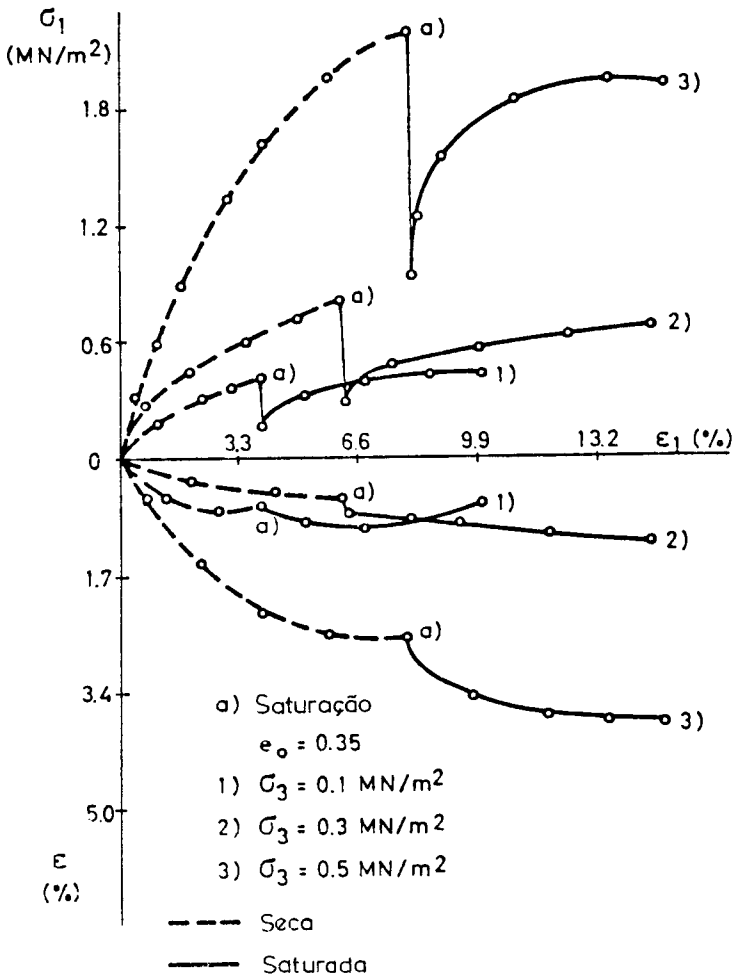


Fig. 8 — Ensaios de compressão triaxial. Enrocamento são

6 — FIABILIDADE DA MODELAÇÃO DA GRANULOMETRIA

Dado que as amostras laboratoriais dos materiais de enrocamento são ensaiadas com curvas granulométricas modeladas ter-se-á de questionar sobre a fiabilidade dessa modelação. Por outras palavras, serão os valores dos parâmetros quantificados por aqueles ensaios representativos para prever o colapso de enrocamentos por meio de adequadas equações constitutivas? Em trabalho efectuado anteriormente (Maranha das Neves e Veiga Pinto, 1988) conclui-se que as técnicas adoptadas na modelação da granulometria parecem de facto adequadas.

7 — CONCLUSÕES

De acordo com os resultados dos ensaios anteriormente expostos, conclui-se que o fenómeno do colapso dos enrocamentos pode ser significativo, dependendo no entanto do tipo de rocha e do grau de alteração.

Para trajectórias de tensão semelhantes, conclui-se que as deformações nos materiais de enrocamento saturados na fase de corte são bastante idênticas às dos materiais saturados na fase inicial de ensaio.

Foram apenas analisadas trajectórias de tensão no plano triaxial (ensaio triaxiais e de compressão unidimensional).

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer ao LNEC por permitir a publicação deste artigo. São ainda devidos agradecimentos à Eng.^a Ana Quintela, Assistente de Investigação do LNEC, a qual foi responsável pela condução dos ensaios laboratoriais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARANHA DAS NEVES, E.; VEIGA PINTO, A. (1988) — *Modelling collapse on rockfill dams*. "Computers and Geotechnics", 6, pp. 131–153.