

LIÇÃO MANUEL ROCHA, 1986

A 3.^a Lição Manuel Rocha intitulada "Investigação em Mecânica dos Solos" foi proferida pelo Eng. José Folque, na Fundação Calouste Gulbenkian, em 20 de Outubro de 1986. A apresentação do Eng. José Folque foi feita pelo Eng. Maranha das Neves.

"Tendo a investigação da Mecânica dos Solos em Portugal sido iniciada no já distante ano de 1946 pelos Engenheiros Manuel Rocha e José Folque, compreende-se como o tema que aqui vai ser tratado — a investigação em Mecânica dos Solos — e o investigador que sobre ele dissertará — o Engenheiro José Folque — podem evocar numa forma tão nítida o cientista que estas lições pretendem recordar e homenagear.

Na verdade, quando em 1945 regressa a Portugal após um estágio na Escola Politécnica Federal de Zurique, vinha Manuel Rocha na disposição de abrir, no Centro de Estudos de Engenharia Civil, uma nova área de investigação relativa àquela recém-aparecida disciplina. Como era seu timbre a componente experimental não tinha sido esquecida e Manuel Rocha trazia consigo projectos para a construção de equipamentos para diversos ensaios. E foi ao seu colaborador José Folque que, de imediato, veio a caber essa importante tarefa que foi a implementação da pesquisa teórica e experimental no domínio em questão.

Licenciado em Engenharia Civil pela Universidade do Porto, o Engenheiro José Folque iniciou a sua carreira profissional em 1946 no Centro de Estudos de Engenharia Civil e foi depois chefe da Secção de Mecânica dos Solos do Laboratório de Engenharia Civil (mais tarde Divisão de Fundações) e do Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Neste organismo orientou mais de uma centena de investigações experimentais relacionadas com fundações de edifícios, obras subterrâneas e obras de suporte e supervisou os trabalhos de caracterização de materiais e controle de construção de algumas importantes barragens de terra portuguesas, nomeadamente as de Silves, Maranhão, Montargil, Roxo, Caia, Mira, Monte da Rocha e Alvito.

No desempenho de missões oficiais participou em diversas comissões e grupos de trabalho.

Designadamente, pertenceu ao grupo de estudos que planeou e orientou o reconhecimento geotécnico preliminar e efectuou os estudos de viabilidade para uma obra de atravessamento do rio Tejo, em frente a Lisboa, e preparou os elementos para pôr a concurso a mencionada obra — a actual ponte 25 de Abril. Foi membro do Conselho Consultivo que deu assessoria ao Estado durante a construção desta ponte.

Foi consultor para os estudos geotécnicos relativos às obras portuárias de Mormugão (Índia) e para construção de barragens incluídas no esquema de abastecimento de água a Macau.

Consultor para o reconhecimento geotécnico, deu depois assessoria ao projecto, construção e observação das barragens da Quimigal (Angola) e Massingir (Moçambique). Foi também consultor para os problemas referentes à construção da barragem do Gove (Angola).

Foi um activo colaborador na elaboração do Regulamento das Pequenas Barragens de Terra.

Efectuou cerca de trinta missões e estágios em organismos estrangeiros e participou em numerosos congressos onde apresentou cerca de duas dezenas de comunicações.

Nos Congressos Internacionais de Mecânica dos Solos de Paris (1961), Montreal (1965) e México (1969) participou em discussões painel sobre "Determinações in situ", "Barragens de Terra" e "Amostragem". Integrou a organização do Congresso de Tóquio (1977) em particular no que se refere à sessão especial sobre "Determinações in situ".

Representou Portugal no Simpósio sobre ensaios de penetração realizado em Estocolmo em 1974, na sequência do que foi designado para a Comissão de redacção duma norma de âmbito internacional para o ensaio de penetração dinâmica (SPT).

Tem realizado diversos ciclos de lições e conferências, designadamente um curso na Universidade de Cambridge (1964) e na Universidade Federal do Rio de Janeiro (1967). Nesta última Universidade e na Universidade de S. Paulo ministrou, em 1973, um curso de pós-graduação sobre Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.

Na Universidade Nova de Lisboa leccionou disciplinas do âmbito da Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações nos primeiros anos em que foram ministrados os cursos de pós-graduação de Mecânica dos Solos e Geologia de Engenharia.

Foi vogal no Conselho Superior de Obras Públicas.

Foi presidente da Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

É membro da Comissão de Redacção e Revisão dos Regulamentos Técnicos da Comissão Nacional de Irrigação e Drenagem e ainda da Comissão Nacional das Grandes Barragens.

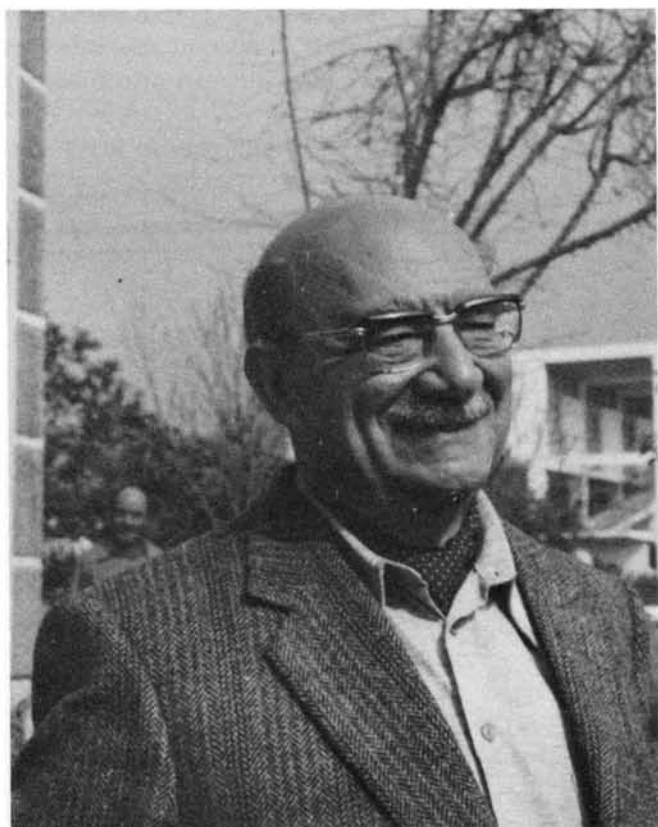
Como projectista e consultor interveio em numerosas obras geotécnicas. Citarei, entre as mais importantes, a consultoria aos projectos e construção dos estaleiros navais da Margueira, de Setúbal e de Cádiz (Espanha), bem como às barragens de Morgavel, Fonte Serne, Marlés (Espanha), Umbeluzi (Moçambique) e açude-ponte de Coimbra.

Como pode verificar-se não houve praticamente nenhuma área teórica ou prática da Mecânica dos Solos em que o Engenheiro José Folque não tenha tido intervenção. No entanto alguns aspectos houve que, quer pelo valor intrínseco do trabalho realizado, quer pela sua repercussão na engenharia portuguesa e estrangeira, não poderei deixar de salientar: a amostragem indeformada, as estacas, a medição in situ das características resistentes de solos, a caracterização mecânica em laboratório e in situ de materiais para

a construção de barragens de terra, o controle de construção e a observação de barragens de terra, a reologia dos solos — notável trabalho relatado na sua tese para Investigador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil —, o comportamento dos solos, os filtros e os drenos.

Mas este brilhante currículo, não obstante a diversidade dos aspectos nele focados, é incompleto para retratar a personalidade do Engenheiro José Folque. É pois indispensável lembrar aqui as suas grandes qualidades pedagógicas, o ânimo sempre transmitido aos que procuram iniciar-se na investigação, o respeito pela individualidade e a sua grande cultura que, de uma ou outra forma, acabou por marcar todos os que com ele trabalharam.

É pois com a maior satisfação que solicito ao Engenheiro José Folque que profira a 3.ª Lição Manuel Rocha.”



INVESTIGAÇÃO EM MECÂNICA DOS SOLOS

Soil Mechanics Research

por
JOSÉ FOLQUE*

RESUMO: Passa-se em revista a situação actual de diversas questões de Mecânica dos Solos com o objectivo de avaliar sumariamente as perspectivas de investigação que irão ser lançadas para desenvolvimento futuro.

SYNOPSIS: The state of development of various Soil Mechanics problems is passed in review. A prediction is tried concerning researchs to be performed in the near future in connection with the present development.

1 — ANTECEDENTES

São peculiares a cada actividade científica e técnica os processos de estudo que possibilitaram a sua criação e promoveram o seu desenvolvimento. Os processos de estudo que são próprios da Mecânica dos Solos constituem o objecto desta exposição.

Têm muito interesse os aspectos históricos relacionados com o tema mas, por razões óbvias, afigura-se que eles aqui devem ser tratados com brevidade.

As decisões que tiveram de ser tomadas pelos construtores das primeiras obras com repercussões geotécnicas — fundações em lodos deltaicos, drenagens, canais, barragens — foram decerto baseadas em tentativas e constatação de êxitos e inêxitos. Foram pois estes os primeiros estudos de Mecânica dos Solos: métodos baseados sobretudo naquilo que hoje constitui um importante capítulo da Mecânica dos Solos — a Observação de Obras. Mesmo para as primeiras construções de grande porte, templos, zigurates, pirâmides tumulares, certamente que ainda as decisões foram tomadas pela mesma via: a observação das tentativas com constatação do êxito ou inêxito. Como se deixou dito, a observação de obras é ainda hoje um importante ramo de investigação em Mecânica dos Solos, obviamente apoiada em outros, e mais requintados, recursos teóricos e instrumentais.

* Investigador-Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

É de presumir que se tenha prolongado por muitos séculos a metodologia que atrás ficou apontada, embora seja de aceitar que se tenham ido aperfeiçoando as técnicas de verificação dos "observáveis" e os métodos para deles extrair conclusões.

Só tardiamente aparecem investigações que começam a apresentar conformação que se assemelha à que actualmente predomina.

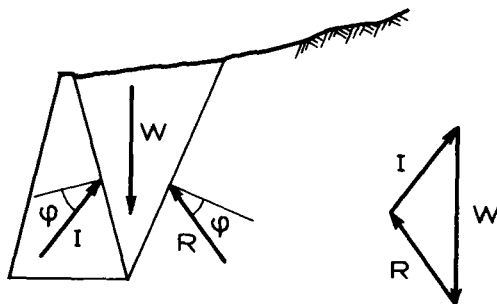


Fig. 1 — Método de Coulomb

Poder-se-á começar, nesta segunda fase, por citar os notáveis trabalhos de Coulomb. Como é sabido Coulomb procurou solução para o problema dos impulsos causados sobre suportes por meios granulares. Para o caso mais frequente, o de muros de suporte, o impulso era calculado determinando o equilíbrio entre o peso do muro, o peso de uma cunha de terras compreendida entre a superfície do terreno e a superfície de escorregamento e a reacção ao longo dessa superfície, na qual era completamente mobilizada a resistência ao corte (Fig. 1). Este requisito de completa mobilização da resistência ao corte implica que o estudo seja feito em equilíbrio-limite. O trabalho de Coulomb pode dizer-se que iniciou uma das vias fundamentais da investigação em Mecânica dos Solos: os estudos paramétricos de equilíbrio de maciços terrosos, que compreendem capacidade de carga de fundações, estabilidade de taludes naturais e artificiais, impulsos sobre obras de suporte (muros, túneis).

Estas investigações depressa vieram mostrar a necessidade de desenvolver a segunda importante via de investigação em Mecânica dos Solos: os estudos das características mecânicas dos maciços terrosos, quer dizer, os parâmetros de cálculo para aplicar os métodos que acima ficaram mencionados.

É óbvio que a solução de um qualquer problema concreto implica uma síntese de matérias trazidas de cada uma das duas vias: a aplicação de um *método de cálculo* ao estudo do equilíbrio de um maciço terroso cujas *características mecânicas* são conhecidas. E será interessante constatar, como se verá, como as duas vias de investigação interagem e se entrecrocaram.

Os estudos de maciços em equilíbrio-limite exigem que no maciço se desenvolvam superfícies de escorregamento ao longo das quais o material se encontra plastificado, isto é, para usar palavras já acima ditas, em que a resistência ao corte se encontra completamente mobilizada. São estudos inseridos na Teoria da Plasticidade (embora esta circunstância quase sempre fique na sombra) e assim se desenvolveram numerosos métodos analíticos para estudo de maciços com geometria e distribuição de solicitações exteriores relativamente simples. Correlativamente se desenvolveram os primeiros métodos experimentais para determinação de características mecânicas. Aparece o aparelho de corte directo, o edômetro e outros aparelhos sem grande requinte. Foram numerosos, e atingiram complexidade elevada, os métodos analíticos desenvolvidos para resolver problemas em equilíbrio-limite: é disso exemplo o método de Résal-Caquot para calcular impulsos sobre muros de suporte, ou o método de Frontard para cálculo de deslizamentos de taludes. Até que uma sensata ponderação sobre a relativa crueza com que se podia determinar parâmetros de cálculo travou os esforços de pesquisa nesse sentido e veio mesmo relegar esses métodos para o esquecimento.

Mais tarde, as grandes possibilidades dos métodos numéricos vieram alargar os casos de equilíbrios que têm soluções propostas. Especialmente começou-se a abordar problemas em que o equilíbrio não está em solução limite. Isto porém implica muito maiores exigências no que se refere à determinação de parâmetros de cálculo. Esta circunstância determinou assim um novo impulso e novos rumos nas averiguações de características mecânicas, com equipamentos e técnicas de ensaio mais refinadas. Antes mesmo de estas necessidades se tornarem prementes já as determinações de características mecânicas tinham beneficiado de substanciais melhorias (ensaio triaxiais com trajectórias de tensões impostas, ensaios de corte simples, etc.).

Como se vê há entrelaçamentos fortíssimos entre as duas vias de investigação fundamental em Mecânica dos Solos. No desenvolvimento da exposição haverá ocasião de voltar a estes temas.

Há interesse em pormenorizar em seguida um pouco mais o desenvolvimento da via de investigação referente à pesquisa de características mecânicas.

Devem ter sido os penetrómetros primitivos os primeiros instrumentos utilizados para avaliação quantitativa das características mecânicas dos terrenos. Varas, barras, carris foram utilizados como penetrómetros, deduzindo-se do esforço necessário para a sua cravação, obviamente por via puramente empírica, a "resistência do terreno". A "resistência do terreno" era, claro está, uma característica muito complexa, integrando a compressibilidade volumétrica, a deformabilidade transversal, a resistência ao corte. Mas era indicação eminentemente útil e apta para fundamentar decisões práticas.

Existe uma interessante informação sobre uma prospecção penetrométrica efectuada no banco do Bugio nos finais do século XVI. O penetrómetro usado foi "um pau com ponta de ferro grosso um pé em quadrado". Com este penetrómetro se ajuizou da fraca compacidade das areias superficiais e reconheceu-se a profundidade das formações resistentes. Estas informações constam de uma carta de Frei Vicêncio Casela a Filipe II, datada de 3 de Fevereiro de 1590.

Os primeiros ensaios de laboratório especificamente de Mecânica dos Solos foram os "limites de consistência". Merecerá a pena mencionar aqui só o "limite de liquidez". É extraordinária a riqueza informativa do "limite de liquidez" e talvez até seja estranho que os tratadistas, em geral, não insistam marcadamente nesse facto (abra-se excepção para os investigadores da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos).

O limite de liquidez mede, conjuntamente, características granulométricas e actividade dos solos finos, fundamentalmente de argilas. Por essa via informa sobre a composição química dos solos (por exemplo, solos com limite de liquidez muito acima dos 100% são solos muito activos e portanto muito provavelmente montmorilonites; solos com limite de liquidez da ordem de 50% ou menos são provavelmente caulinites, as menos activas das argilas entre as que é frequente encontrar nas formações superficiais que interessam à engenharia civil). Assim, o conhecimento do limite de liquidez, só por si, informa sobre se um dado terreno poderá apresentar ou não problemas de expansibilidade; sobre a sua provável coesão, e portanto resistência ao corte em estado consolidado; sobre se a sua compressibilidade será alta ou baixa; sobre a boa ou má aptidão para com ele construir aterros; sobre a sua susceptibilidade a originar escorregamento quando ocorrendo num maciço terroso natural. Tem de se concordar que é realmente um bom acervo de informações aquele que se pode obter com ensaio de realização tão fácil.

Para além destes ensaios simples poder-se-á dizer que as investigações sobre características mecânicas de terrenos correspondentes às grandezas físicas com tradições na Resistência de Materiais, isto é, resistência à compressão simples, coesão, resistência ao corte, compressibilidade, só começaram mais tarde; e sobretudo só ganharam expressão actualizada e própria da Mecânica dos Solos moderna, depois do estabelecimento do *princípio da tensão efectiva*.

Deve-se a Terzaghi a explicitação deste princípio. Nasce ele da constatação que nos meios polifásicos, como os solos, constituídos por partículas sólidas que entre si contactam (por exemplo, solos arenosos) e por um fluido de preenchimento dos poros, há lugar para distinguir duas categorias de forças: as que se transmitem nos contactos entre partículas e as que se instalam como pressão no fluido intersticial. As primeiras são *efectivas* no condicionamento do comportamento do corpo, pois, visto que determinam as tensões na fase sólida, governam a sua compressibilidade e resistência. As segundas são *neutras* pois a sua existência em nada condiciona o mencionado comportamento mecânico.

Nos solos argilosos não há contacto directo entre partículas (existe sempre água adsorvida nas interfaces) mas o princípio da tensão efectiva continua a ser válido: a tensão efectiva é a diferença entre a tensão total e a tensão neutra.

Para tratamento quantitativo da questão Terzaghi admitiu que, para pequenos acréscimos de solicitação, a fase sólida poderia ser assimilada a um sólido de Hooke (H); e a fase fluida a um líquido newtoniano (N). Um solo seria deste ponto de vista um corpo que em Reologia se designa por corpo de Kelvin — associação em paralelo H|N (Fig. 2).

Modelo Terzaghi Corpo de Kelvin

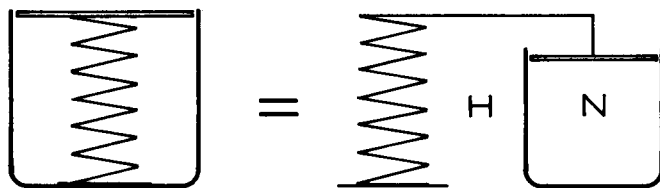


Fig. 2 — Modelos reológicos de consolidação (Terzaghi)

Sendo a deformabilidade de H muito superior à compressibilidade de N daqui resulta que um dado acréscimo de solicitação aplicado subitamente é integralmente suportado por N. Transmite-se portanto ao corpo, no instante inicial de aplicação, como *pressão neutra*. Mas porque essa pressão está em excesso sobre a pressão preexistente no líquido intersticial e ainda porque o solo — corpo poroso — é permeável, o líquido intersticial entra em drenagem, transferindo-se gradualmente a pressão neutra para o “esqueleto” de partículas sólidas, isto é, transformando-se gradualmente as pressões neutras em pressões efectivas. O estágio final da transferência será a total tomada do acréscimo de solicitação pelo “esqueleto” sólido. O processo de consolidação será assim a “história” dessa transferência: desde a total absorção do acréscimo de solicitação pela fase líquida até à total entrega da solicitação ao “esqueleto” sólido.

O tratamento analítico deste problema foi feito por Terzaghi e Frölich. Recapitulando, a sua “Teoria da consolidação” é a descrição, no espaço e no tempo, da transferência de uma força aplicada à fase N para a fase H, com as consequentes variações de volume (medidas em variações de porosidade ou de índice de vazios).

Modelos reológicos mais complexos foram estabelecidos procurando-se cingir mais de perto o fenómeno "consolidação" (Fig. 3). Comportam esses modelos, como o de Taylor, Goldstein, Tan-Tjong-Kie e outros, diversos elementos H e N e ainda elementos de St. Venant (StV — corpo plástico), associados em série e em paralelo, constituindo, alguns deles, estruturas muito complexas. Talvez que o mais elaborado dos estudos de consolidação tenha sido o de Tan-Tjong-Kie. Mas este, tal como outros estudos baseados em modelos complexos, acabou por ter pouca difusão pela extrema dificuldade de fazer a sua aplicação a casos concretos.

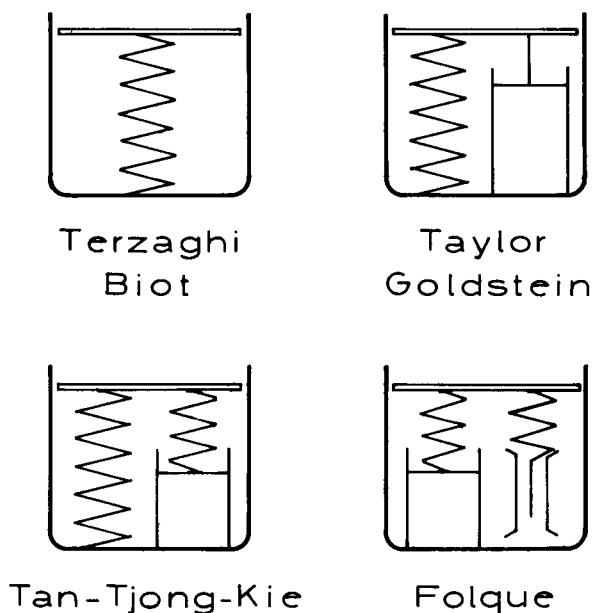


Fig. 3 — Modelos reológicos para a consolidação

As investigações em torno das teorias de consolidação levaram ao estabelecimento do conceito de "pré-consolidação". Constatou-se que um maciço argiloso consolidado sob uma certa tensão, posteriormente removida, se voltasse a ser solicitado, exhibiria, na curva que traduz os assentamentos finais em função das tensões efectivas aplicadas, uma singularidade no ponto que corresponde à tensão que inicialmente consolidara o maciço. Foi uma via muito usada para tentar determinar, em maciços terrosos modernos (na escala de tempos geológica), a tensão correspondente à cobertura de

terrenos máxima que já teria existido sobre certa formação e que posteriormente teria sido erodida. Bjerrum estudou aprofundadamente este problema e introduziu o conceito de "quasi-consolidation". Mostrou Bjerrum que aos efeitos de tensão se somam efeitos pré-diagénéticos, de forma que, salvo em maciços muito modernos, a aparente tensão de pré-consolidação traduz efeitos não só devidos à tensão actuante mas também a fenómenos de envelhecimento (Fig. 4).

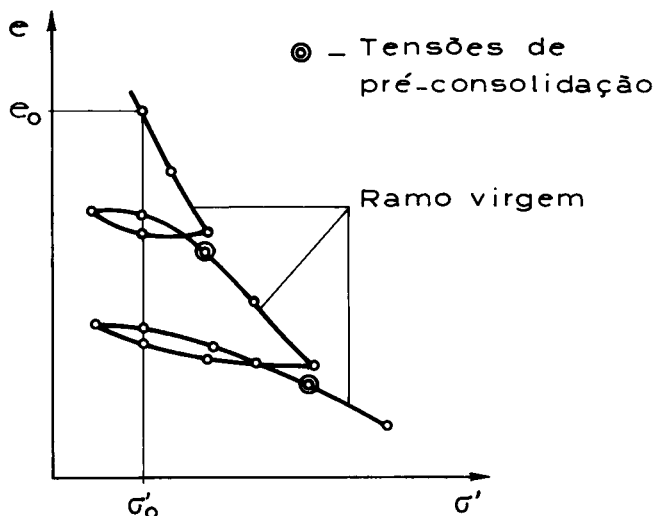


Fig. 4 — Consolidação e re-consolidação (solo argiloso)

O princípio da tensão efectiva foi também decisivo para informar as investigações no domínio dos estudos relativos à resistência ao corte, sobretudo de solos argilosos. Ficou com este princípio bem assente que a resistência ao corte de um solo com uma dada compacidade não é uma característica intrínseca desse solo em termos de tensões totais. Com efeito a resistência ao corte é de facto uma característica intrínseca mas em termos de tensões efectivas e portanto um número infinito de resistências ao corte, entre um limite inferior e um limite superior, pode corresponder a uma dada tensão total incidente nas facetas de escorregamento. Definiram-se então situações típicas correspondentes a casos extremos de relação tensão total/tensão efectiva. São elas as situações "não-drenada", "consolidada - não drenada" e "consolidada".

Para melhor compreensão das condições a que correspondem estas situações típicas extremas é necessário recordar que os meios particulados exibem "dilatância". A dilatância consiste no facto de nestes meios, ao contrário do que se postula nos meios contínuos, a aplicação de uma solicitação distorcional pura determinar deformações com componente volumétrica. Quer dizer, sob a acção de um distorçor um corpo particulado pode expandir-se ou contrair-se. Dir-se-á então que exhibe dilatância positiva, no primeiro caso, ou negativa, no segundo.

Retomando a questão das situações típicas extremas de resistência ao corte virá que, na situação "não-drenada", provetes do solo em ensaio serão sujeitos a corte sem que se consinta que sofram consolidação para a solicitação isotrópica aplicada nem que sofram drenagem as pressões nos poros gerados pela dilatância. Assim o corpo responderá com a resistência ao corte que corresponde ao estado de tensão efectiva existente em anterioridade à aplicação das tensões adicionais que foram aplicadas para realizar o ensaio. Ao conduzir um ensaio nesta modalidade pretendia-se fazer face, em relação a casos concretos, àquelas situações em que acréscimos de solicitação são aplicados com muita rapidez, sem haver tempo para se processarem drenagens do maciço para o exterior (Fig. 5).

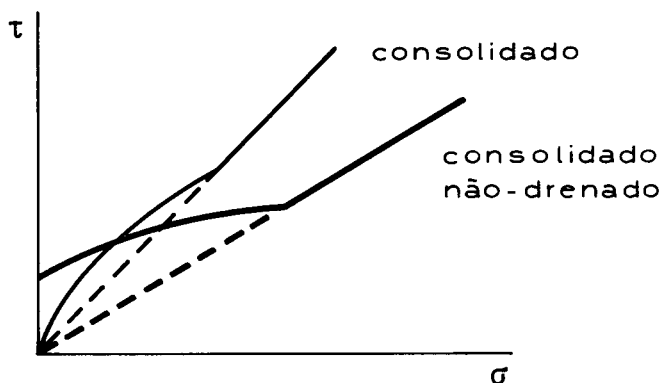


Fig. 5 — Envolturas dos estados de ruptura (tensões totais)

Na situação "consolidada-não drenada" aos corpos de prova é consentida a consolidação por acréscimo da tensão isotrópica aplicada, mas não se consente a drenagem das pressões nos poros associadas à dilatância. Pretendia-se assim fazer face à resposta de maciços que, estando consolidados sob a acção de tensões predominantemente isotrópicas há muito aplicadas, são subitamente solicitados por tensões preponderantemente tangenciais.

Por fim, na situação "consolidada", consente-se a consolidação dos provetes para as tensões isotrópicas e a drenagem das pressões de poros. É óbvio que esta situação é a que fornece a resistência ao corte *intrínseca* do solo em estudo para uma dada pressão confinante.

Evidentemente que as situações descritas, porque são extremas, podem ser padronizadas, mas não são adaptáveis a casos concretos a não ser em situações também extremas. Por isso, na prática de condução de ensaios para averiguação de características de corte, sobretudo utilizando o ensaio de compressão triaxial (que tem maior versatilidade) evoluiu-se para técnicas que se denominaram de *trajectórias de tensões impostas*. Como o nome indica, nestes ensaios procura-se reproduzir em cada provete a situação de tensão e sua evolução que são de antecipar para um dado ponto de um maciço em estudo (Fig. 6).

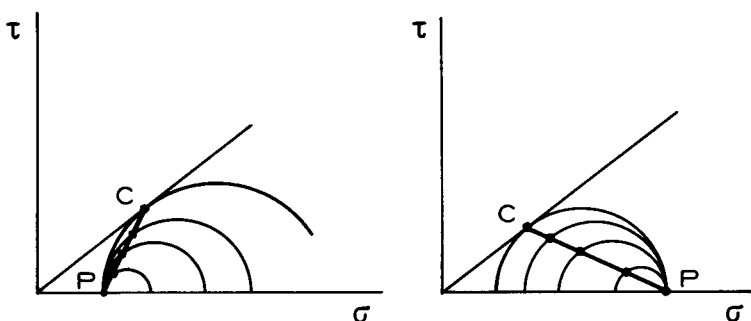


Fig. 6 — Trajectória de tensões imposta

Será de apontar que as diversas modalidades de ensaio mencionadas foram imaginadas para criar em amostras situações imitativas do que se passa no maciço em *tensões totais*, e correspondentes tensões efectivas, fazendo aparecer na amostra as tensões neutras que correspondem ao carregamento, sua velocidade de processamento e condições de fronteira no que respeita a drenagem. Uma alternativa consiste em calcular as pressões neutras que se desenvolverão no maciço, obter as tensões efectivas

subtraindo-as das tensões totais e prosseguir depois o cálculo tomando resistências intrínsecas de corte. Isto foi facilitado pelos estudos de Skempton que propôs a utilização de coeficientes de pressão neutra, A e B . Eles relacionam a pressão neutra induzida, quer pela componente isotrópica, quer pela componente distorcional, dos acréscimos dados às tensões totais anteriormente existentes.

Esta alternativa veio criar duas modalidades de cálculo — em tensões totais e em tensões efectivas — que quase chegaram a constituir duas escolas. A Conferência de Boulder de 1960 sobre "Resistência ao corte" veio mostrar a compatibilidade entre os dois procedimentos, desde que se atenda à fenomenologia correspondente. Dá-se hoje porém como definitivamente adquirido que os cálculos em tensões efectivas são mais precisos do que os cálculos em tensões totais. Isto porque é *mais fácil* prever correctamente tensões neutras do que conduzir ensaios de corte em tensões totais que reproduzam correctamente as trajetórias de tensão e outras condições reinantes no maciço real.

As investigações realizadas no domínio da averiguação das características de corte são certamente das mais numerosas que se efectuaram em Mecânica dos Solos. Estudou-se a influência de numerosos parâmetros, grandeza das tensões normais, velocidades de deformação tangencial (onde se revelaram obviamente efeitos de viscosidade), diversidade de composições granulométricas e de actividades, compacidade inicial. Os estudos citados em último lugar levaram Casagrande à definição de "densidade crítica" para as areias. Dependendo a dilatância das areias muito fortemente do índice de vazios, define-se "densidade crítica" como a fronteira que separa a dilatância positiva da dilatância negativa.

O conceito de coesão recebeu esclarecimento muito útil nas investigações de resistência ao corte tendo em atenção as tensões efectivas. A coesão, que já se sabia ser praticamente nula para solos arenosos, averiguou-se que, em termos de tensões efectivas, assume também valores diminutos para solos argilosos. É a coesão dos solos argilosos consolidados que apresenta valores elevados, mas obviamente isso passa-se porque estão instaladas, e "congeladas" por efeito de pré-consolidação, tensões efectivas residuais. São tensões neutras negativas que podem corresponder a altas tensões de tracção na água intersticial.

É importante, a respeito de coesão, lembrar os conceitos explicitados por Hvorslev que põe a questão em termos de definir, para qualquer situação, uma "coesão aparente" dependendo univocamente, para um dado solo saturado, do índice de vazios exibido pelo solo no estado em que a ruptura se instala.

Uma melhor compreensão dos comportamentos observados, quer em tensões-deformações volumétricas, quer em tensões-deformações distorcionais, foi tentada aplicando conceitos e formulações da Reologia à Mecânica dos Solos. Foi um trabalho de aprofundamento de conhecimentos mas sem repercussões práticas, excepto ao nível didáctico. Uma investigação realizada pelo autor em 1961/62 trata este assunto em pormenor.

Há um capítulo de investigações, importante não tanto pelas suas informações práticas, que até ao presente têm tido severas restrições, mas pelo seu conteúdo epistemológico: os estudos em modelo reduzido respeitando rigorosamente as condições de semelhança. Foi Manuel Rocha quem em primeiro lugar enunciou, para o material "solo", as condições de semelhança entre material de protótipo e material de modelo. Tenha-se em atenção que um estudo deste tipo satisfaz automaticamente a condição de síntese que se apontou como necessária para a solução de casos concretos, pois se estuda o equilíbrio do maciço utilizando materiais que respeitam, à escala, as características mecânicas do material que constitui o maciço. É exactamente nesta questão de "características à escala" que reside a dificuldade do problema. Estes estudos de semelhança constituem problema difícil mas de grande interesse e por isso a eles se voltará em pormenor na segunda parte desta exposição.

Para terminar esta primeira parte tem cabimento apresentar algumas considerações sobre aspectos específicos que as matérias tratadas assumem em Portugal.

Razões históricas, alhures desmontadas e que aqui não é necessário retomar, levaram a que os portugueses (bem como outros povos do mundo mediterrânico) criassem profundo desafecto pelo trabalho manual e, por extensão, pela experimentação. Em contrapartida apresenta para nós grande interesse, e tem elevado prestígio, o trabalho puramente especulativo, de lucubração intelectual. Limitando a análise à Mecânica dos Solos — para que não vá o sapateiro além da sandália — julga-se que isto explica o facto de em 1942, o que não é tarde no calendário mundial, já entre nós se ter publicado um magnífico trabalho de cálculos paramétricos de Mecânica dos Solos, o excelente tratado sobre cálculo de muros de suporte do Professor Correia de Araújo, enquanto que para a realização das primeiras determinações experimentais de características mecânicas de terrenos se havia de esperar ainda cerca de uma dezena de anos; vieram elas a ser realizadas, no fim da década de 40, no Centro de Estudos de Engenharia Civil, sob o impulso de Manuel Rocha.

Ora estas coisas não se curam por milagre. E por outro lado, na sociedade portuguesa, no que respeita a características sócio-económicas, nada mudou no último século. Ou melhor, muitas coisas mudaram; mas, como diria o Príncipe Salina, tudo o que mudou foi o que era necessário mudar para que tudo ficasse na mesma. Posto isto urge evitar que o surto de experimentalismo que constituiu a bela aventura do Laboratório de Engenharia Civil comece agora a andar para trás e rapidamente venha a cair em letargia.

Em Geotecnia (e será só em Geotecnia?) este retrocesso do experimentalismo físico muito pode ser ajudado pelas facilidades que o cálculo numérico propicia de efectuar "brilhantes" trabalhos sem ter de sujar as mãos. Muito haverá que lutar se se quiser evitar o aparecimento de uma nova geração de "geotécnicos" capazes de resolver, por elementos finitos, os mais intrincados problemas, mas que nunca visitaram um local de obra, nunca fizeram um ensaio, nunca montaram um aparelho, nunca seguraram nas mãos um pedaço de argila.

2 — ASPECTOS ACTUAIS E PERSPECTIVAS

2.1 — O problema geral do equilíbrio de maciços terrosos

Dispõe-se de soluções analíticas para numerosos casos de equilíbrios-tipo, contanto que a geometria não seja muito complicada e seja também relativamente simples a distribuição de solicitações exteriores. É requisito destas soluções que o solo seja homogéneo. No que se refere a isotropia há, evidentemente, soluções para solos isotropos e também para casos particulares de anisotropia, nomeadamente a ortotropia. Já os terrenos heterogéneos não podem, pelo menos em princípio, ser dominados por análises teóricas, salvo no caso em que a heterogeneidade, por efeito de escala, passe a poder considerar-se como homogeneidade, isto é, em que se possa considerar o terreno homogéneo por ser possível a sua análise tomando um elemento de volume de dimensão tal que nele estejam estabilizados os efeitos de heterogeneidade. Procurando tornar mais clara a afirmação, atente-se a que numa certa escala todos os solos são heterogéneos: como corpos polifásicos que são, tomando um elemento de volume muito reduzido, contendo um número muito pequeno de partículas, é muito provável que este não tenha o mesmo comportamento dos elementos de volume vizinhos. Mas considerando um elemento de volume de maior dimensão, que abranja as diversidades, em número relativamente pequeno, de possíveis arranjos entre partículas, ter-se-á caído num material homogéneo. A homogeneidade pode ser assim, *em certos meios*, um fenómeno de escala. Mas tem de se ter em atenção que essa escala tem de ser compatível com as dimensões gerais do maciço que se pretende estudar, bem como com as dimensões de um eventual elemento que transmita solicitações, por exemplo, uma sapata de fundação.

Outras soluções analíticas existentes são baseadas na Teoria da Plasticidade e estabelecidas para solicitações de equilíbrio-limite.

Para geometrias mais complexas e solicitações com distribuição não uniforme, em que os métodos analíticos são de aplicação praticamente impossível, dispõe-se hoje de soluções obtidas por métodos numéricos. Estas soluções, por outro lado, não requerem que os equilíbrios estudados se encontrem em situação de equilíbrio-limite.

Quer para as soluções analíticas, quer para as soluções baseadas em métodos numéricos, as maiores dificuldades actualmente existentes derivam da necessidade de determinação adequada das equações constitutivas e correspondentes parâmetros de cálculo que devem ser adaptados. Certos meios comportam amostragem representativa, isto é, neles se pode colher amostras de boa qualidade que, ensaiadas em laboratório, fornecerão as informações requeridas. Mas a amostragem é impossível em certos maciços, e em todos, mesmo nos mais favoráveis, há dificuldades. Há por isso terrenos que obrigam a que as características mecânicas tenham de ser determinadas a partir de ensaios "in situ". Mas esta via, evidentemente, também apresenta as suas dificuldades. A este problema adiante se voltará com mais pormenor.

O estudo do comportamento dos maciços terrosos recebeu, nos últimos anos, os contributos esclarecedores que foram dados pelas investigações que levaram à criação da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. É assunto que merece que dele se trate aqui com algum desenvolvimento, embora necessariamente abreviado e sincopado.

Tirando o seu nome do conceito de "índice de vazios crítico", índice para o qual se processam, a volume constante, as deformações plásticas dos corpos em cedência, a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos é também uma *explicitação* da aplicação da Teoria da Plasticidade à Mecânica dos Solos. De facto, é sabido que certas soluções clássicas da Mecânica dos Solos são soluções que podem ser inseridas na Teoria da Plasticidade. Seja, por exemplo, o método de Coulomb para cálculo de impulsos: ele implica a "plastificação" do maciço ao longo de duas superfícies de escorregamento, uma interior ao maciço e outra correspondendo ao contacto maciço-muro, condição necessária para determinar a direcção de duas das forças intervenientes no equilíbrio e possibilitar assim o seu estudo. Outros exemplos poderiam ser dados. Mas antes da formulação da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos não se dava o devido relevo à intervenção de conceitos próprios da Teoria da Plasticidade à resolução dos problemas. Talvez que o mais importante contributo desta nova visão tenha sido a clara distinção entre cedência e ruptura que existe nos corpos plásticos que não são plásticos perfeitos, como é o caso dos solos. É-se assim conduzido ao estabelecimento, num espaço p' - q (tensor hidrostático efectivo — tensor distorcional) de uma curva de cedência (Fig. 7). Deformações para além da superfície de cedência, comportando componentes elásticas e plásticas, conduzem a que, num processo de descarga, se recuperem as deformações

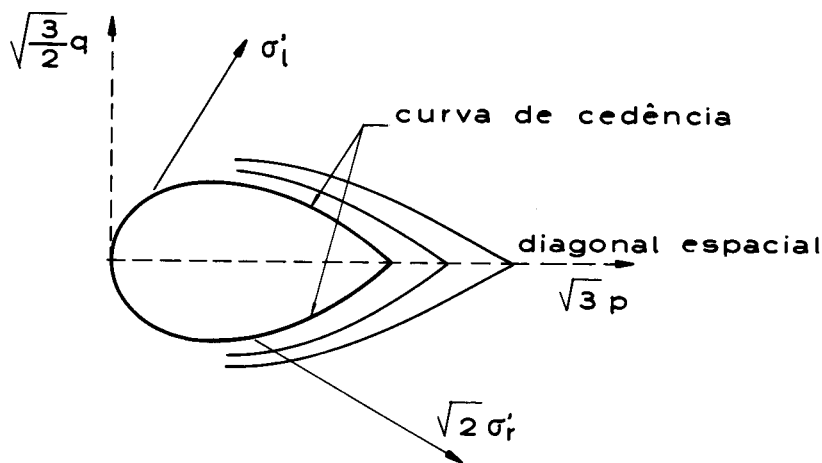


Fig. 7 — Curvas de cedência num corpo com endurecimento

elásticas, enquanto que, como consequência das deformações plásticas processadas com energia não recuperável, há deslocação da superfície de cedência, com "endurecimento" do material. O princípio da normalidade, aquisição básica da Teoria da Plasticidade, permite determinar a direcção dos vectores meramente de deformação plástica, normais à curva de cedência.

Numa palavra, a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos tornou explícita a inserção da Mecânica dos Solos na Teoria da Plasticidade, como se disse, e ao fazê-lo veio explicar o comportamento dos solos, como é o caso, por exemplo, da descrição unificada da "consolidação" e do "corte". Por isso, pela compreensão da fenomenologia dos solos, teve repercussões de muito interesse no estabelecimento de modelos matemáticos para aplicar em cálculos numéricos. Também no domínio dos modelos físicos, estudos em modelos (que não são estudos de semelhança, com modelos à escala) têm sido intensamente explorados dentro do enfoque próprio desta visão da Mecânica dos Solos. O esclarecimento do comportamento de diversos tipos de obra (muros de suporte, túneis, etc.) tem recebido por esta via notáveis contributos.

Mas parece que a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos ainda não teve o impacto, ao nível de concretizações práticas, que é de esperar do importante passo que constitui como aprofundamento do conhecimento do material "solo". Muito há ainda a esperar de futuras investigações em que se utilize este potente instrumento que é a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.

Há outros estudos baseados na Teoria da Plasticidade que merecem também especial menção. Abrangido pelo "teorema da região inferior" que diz que "um maciço é estável se um qualquer campo de tensões puder ser atribuído ao maciço que equilibre as solicitações exteriores de tal forma que em ponto algum do maciço seja excedida a tensão de plastificação", deve destacar-se o método de Sokolovski. Neste método, respeitando as condições de equilíbrio estático e postulando para a plastificação a teoria de ruptura de Mohr-Coulomb (com a tensão de ruptura considerada igual à tensão de plastificação) resolvem-se, por diferenças finitas, numerosos problemas em situação de equilíbrio-limite.

Uma notável proposta de estudo de equilíbrios sem ser em situação limite nasceu, em certa medida, de uma extensão do método de Sokolovski. Deve-se o método a Serrano e designou-o o seu autor por "método dos campos associados". Fundamentalmente consiste o método no seguinte: se se dispuser do conhecimento do ângulo ν cujo seno é a relação entre o incremento de deformação volumétrica e o incremento de deformação distorcional, usando um método matematicamente análogo ao de Sokolovski pode-se determinar campos de deformação, representando nos cálculos o ângulo ν o mesmo papel que no método de Sokolovski representa o ângulo ϕ (ângulo de atrito interno). Se se dispuser também de uma função que relacione tensões com deformações, poderá procurar-se, por métodos iterativos, a compatibilização dos dois campos, o de deformações e o de tensões. Daqui o nome de método "dos campos associados". É evidente que não se pretendeu, com o que fica dito, expor o método, o que requeria tempo e espaço

incompatíveis com esta exposição, mas tão-só chamar para ele a atenção. O estudo do método poderá ser feito na comunicação que Serrano apresentou ao 5.º Congresso Europeu de Mecânica dos Solos — Madrid, 1972.

Indo agora para outro aspecto, um ponto de muito interesse que importa considerar é o de, actualmente, em relação a todos os problemas de Mecânica dos Solos em que intervém um elemento que *actua* ou *suporta* o maciço (uma fundação, um muro de suporte) se sentir que os conhecimentos estão maduros (ou pelo menos deviam estar) para que não se possa aceitar mais soluções que não levem em linha de conta a *interacção* do maciço terroso e do elemento actuante ou actuado. Os métodos analíticos prestam-se mal ao estudo destes problemas pois conduzem a soluções que, em regra, necessitam de passar por desenvolvimentos muito complexos. Mas os métodos numéricos — elementos finitos, diferenças finitas, elementos de fronteira — vieram facilitar extremamente a pesquisa de soluções. Para isso há que, obviamente, “modelar” o meio terroso, isto é, há que estabelecer adequadas equações constitutivas (ou admitidas como tal). Existem soluções para “modelos” elásticos lineares, elásticos não-lineares, rígido-plásticos, elastoplásticos, etc. Mesmo assim não se considera, e de facto não é de considerar, que os ditos problemas tenham já encontrado solução satisfatória, pois a complexidade reológica dos solos não fica exaurida com esses modelos. E atente-se na complexidade de um modelo como, por exemplo, o “Cam-clay” nascido da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos: ele é “elastoplástico com endurecimento”!

Não julga o autor que a Mecânica dos Solos seja uma “religião revelada” e Terzaghi o seu Profeta. Mas também não se caia no extremo oposto de, lá de quando em quando, não atentar nos ensinamentos de Terzaghi. Ora Terzaghi ensinava que, em Mecânica dos Solos, a solução de um problema, para ser válida e realista, tem de ser simples. Isto porque a variabilidade de propriedades do material “solo”, mesmo do “fabricado” (aterros) põe na sombra, sobrepõe-se, aos requintes de métodos que só teriam sentido para um material muito mais uniforme.

Não estarão esses factos a indicar que um rumo, talvez mais certo, estará na pesquisa de *métodos empíricos de correlação* entre, por um lado, propriedades de um maciço e sua distribuição estatística e, por outro, parâmetros de cálculo “aparentes” que correspondam a modelos simples?

2.2 — Problemas particulares de engenharia de solos

2.2.1 — Reconhecimento

Deduz-se de certas passagens do que atrás ficou dito que os problemas centrais que neste momento se põem ao reconhecimento são:

- a obtenção de amostras verdadeiramente representativas dos solos a estudar;
- a determinação “in situ” das propriedades que interessam ao estudo dos maciços terrosos.

No que se refere à amostragem um notável progresso realizado nos últimos tempos é simplesmente uma realização no campo da classificação. Às clássicas e vagas designações de "amostra remexida" e "amostra inalterada" substituíram-se cinco classes de amostras. A cada classe fez-se corresponder quais as características mecânicas que estão preservadas, quais as formações em que podem ser colhidas e quais os amostradores para isso requeridos.

A classe 1, por exemplo, corresponde a amostras que não sofreram distorção nem alteração de volume e que portanto apresentam características de corte e compressibilidade tão próximas quanto possível do real (levando em atenção que houve libertação da tensão confinante). As amostras da classe 4 são amostras em que apenas a composição granulométrica foi conservada. À classe 5 pertencem amostras em que nem sequer a composição granulométrica foi preservada e que portanto só servem para dar indicações sobre a espessura e a sequência dos estratos. Às classes 2 e 3 pertencem, evidentemente, amostras em que algumas características originais estão preservadas, mas não a totalidade delas.

O que é extremamente importante ter em mente é que só de alguns tipos de formação, não muito numerosos, e utilizando amostradores e técnicas de amostragem muito aperfeiçoadas, e que é possível obter amostras da classe 1.

Será de esperar que aperfeiçoamentos introduzidos nos amostradores venham a alterar este estado de coisas? Na opinião do autor não é esta a perspectiva. Os amostradores já contêm requintes mecânicos que tornam difícil conceber que venham a ser aperfeiçoados (Fig. 8); e por outro lado as formações donde não é possível colher amostras da classe 1 apresentam de facto reais dificuldades para serem amostradas: ou muito alta sensibilidade, ou compacidade extremamente baixa, ou a presença de elementos com grandes dimensões. Isto faz com que se seja conduzido a pensar que as investigações neste domínio se devem concentrar nas determinações "in situ".

Embora, sobretudo nos países escandinavos, se utilizem outros tipos de penetrómetros, os penetrómetros de uso mais generalizado são o SPT e o CPT, este último ainda muitas vezes designado por "penetrómetro holandês". As correlações com características mecânicas, nomeadamente com a compressibilidade e o ângulo de atrito interno, que com estes penetrómetros se têm obtido, são bastante satisfatórias. Embora estes aparelhos já apresentem muitos aperfeiçoamentos, mecânicos e no sistema de registo, sobretudo o CPT, é de esperar que ainda mais aperfeiçoamentos venham a ser introduzidos. E que o prosseguimento de investigações sistemáticas venha a aumentar a fiabilidade das correlações. Particular importância assume a incorporação no cone de uma célula para leitura contínua de pressões neutras.

O aparelho rotativo de corte "in situ" (*vane tester*) tem fornecido boas indicações sobre a resistência ao corte de solos argilosos moles. É um tipo de aparelho em relação ao qual podem vaticinar-se importantes aperfeiçoamentos: nas dimensões, no sistema de aplicação de cargas, na automatização do registo das indicações.

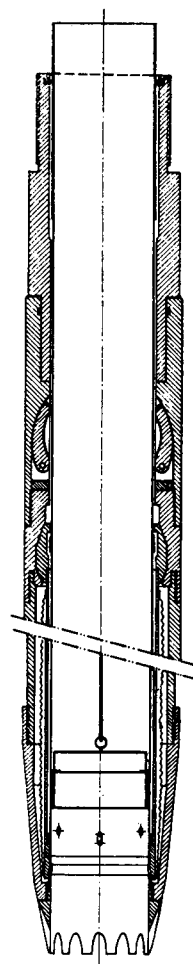


Fig. 8 — Amostrador de Begemann

O pressiómetro é um aparelho para determinações "in situ" que tem fornecido indicações muito valiosas no que respeita à compressibilidade, à resistência ao corte e às tensões "in situ". A sua última versão de "pressiómetro autoperfurador" muito melhorou a qualidade das informações obtidas. É de esperar que pesquisas sistemáticas venham a ser efectuadas utilizando pressiómetros e melhorando assim as perspectivas de determinação "in situ" de características mecânicas.

Outro aparelho com importância é o dilatômetro plano (espátula dilatométrica) introduzido por Marchetti.

2.2.2 — Características de identificação

Já ficou apontado o grande potencial de informação que possuem as características de identificação. É por isso de esperar que, recorrendo ao seu uso, valiosas investigações venham no futuro a ser conduzidas. Tal será o caso, por exemplo, do estudo de argilas expansivas ou, noutro domínio, do estudo de filtros para materiais incoerentes. Nestes filtros haverá vantagem em pôr em confronto a *granulometria* do material a filtrar com a *porometria* do material do filtro (Fig. 9). Quer isto dizer que haverá interesse em introduzir na sistemática dos ensaios de identificação a realização de ensaios de determinação da porometria.

No domínio dos aperfeiçoamentos que parecem preconizáveis nas próprias técnicas de ensaio ocorre sublinhar a melhoria da *dispersão* na preparação de amostras para análise granulométrica de solos finos. Já se tem recorrido à utilização de ultra-sons para melhorar a dispersão. Parece que esforços neste domínio devem ser continuados. Recorda-se, para dar ideia da urgência destes estudos, a importância de determinações granulométricas precisas no estudo de argilas *dispersíveis* ⁽¹⁾.

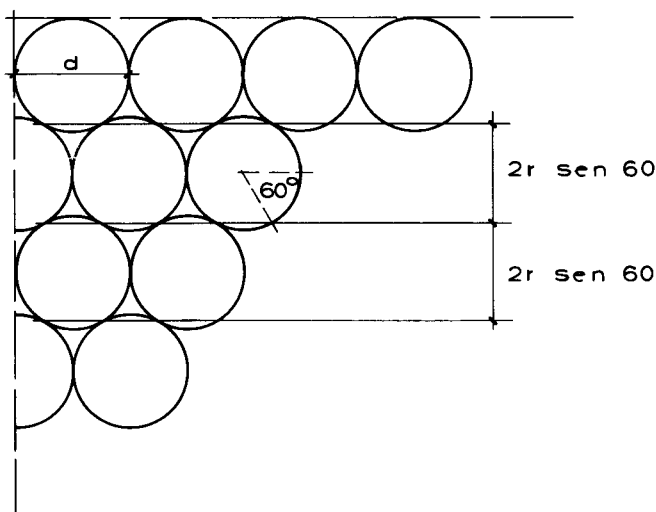


Fig. 9 — Modelo porométrico para estudos de filtros

⁽¹⁾ E não "dispersivas" como, erradamente, tende a generalizar-se.

2.2.3 — Resistência a esforços tangenciais; ruptura por corte

A resposta dos solos à aplicação de forças tangenciais tem sido, como é sabido, muito estudada em termos de resistência final: a resistência ao corte. Mas só há pouco começou a não ser negligenciada a averiguação da resposta em termos de $\tau - \gamma$ (tensões tangenciais — extensões distorcionais). Actualmente esta questão, a do estabelecimento de equações constitutivas adequadas, está a ser estudada afincadamente e os estudos vão certamente aprofundar-se, pois assim o exigem os potentes métodos de cálculo que foram tornados possíveis pelos computadores.

Os efeitos da tensão intermédia, σ_2 e da anisotropia (especialmente da anisotropia "inerente" — própria dos solos sedimentares) serão certamente estudados com maior profundidade.

A ruptura, que tradicionalmente tem sido descrita como obedecendo à lei de Coulomb, afigura-se, pelo menos para as necessidades práticas, não necessitar urgentemente de investigações adicionais. Haverá em todo o caso lugar para aprofundar as teorias de ruptura, isto é, as teorias explicativas dos valores que a resistência ao corte assume em função das outras características do maciço: composição química, distância média entre partículas, tensão média (Fig. 10).

Também assume grande importância efectuar estudos relacionados com a problemática da "tensão residual".

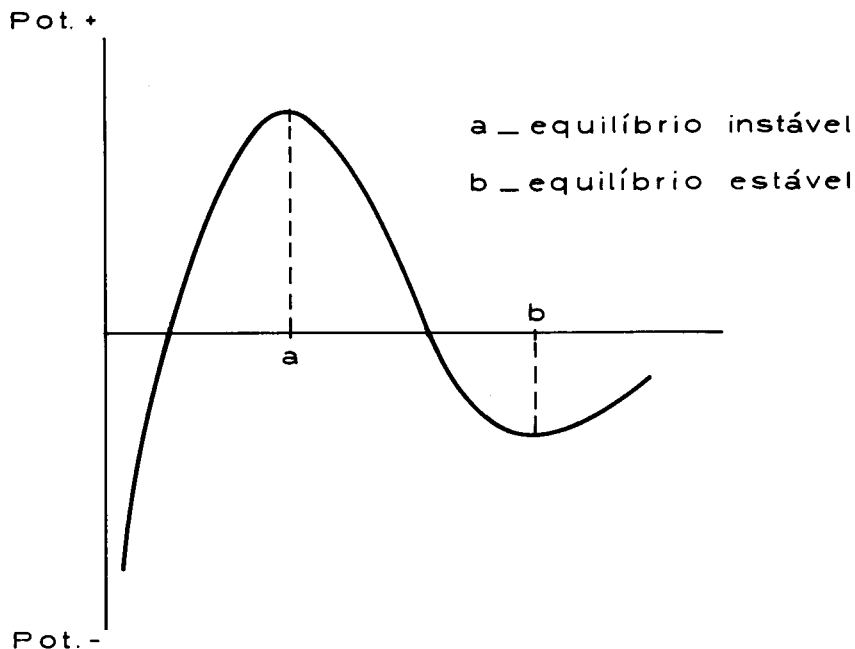


Fig. 10 — Balanço do potencial das forças atractivas e repulsivas na vizinhança de uma interface

2.2.4 — Compressibilidade. Consolidação

Nas formações em que é possível colher amostras da classe 1 a compressibilidade determina-se em laboratório com bom rigor. Quando a formação tem fácil acesso, por poço ou galeria, a compressibilidade também pode ser determinada por meio de ensaios de carga; haverá contudo que tomar precauções em relação a eventuais remeximentos superficiais. Em todos os outros casos, que são os mais numerosos, a compressibilidade terá de ser determinada à custa de ensaios "in situ" diferentes do ensaio de carga. Embora sejam esperanças correlações com penetrómetros, em especial com o CPT, parece que aqui o pressiómetro encontrará o seu campo de eleição.

Outro tipo de investigação apresenta interesse no domínio da compressibilidade. Relaciona-se com o facto de ser passível de aperfeiçoamento a teorização hoje disponível para explicar a compressibilidade. Com efeito, pode-se fazer progressos na relação das distâncias médias entre partículas com as forças exteriores, as forças atractivas e as forças repulsivas entre partículas.

No que se refere à consolidação acontece que as previsões do tempo de ocorrência calculados tomando por base os ensaios de laboratório apresentam em regra notáveis discrepâncias com os tempos observados em obra. A questão apresenta particular importância para estudos, por exemplo, de melhoria de terreno utilizando pré-cargas (cálculo do tempo de consolidação da camada a melhorar, necessidade e cálculo do espaçamento de drenos verticais para aceleração da consolidação). Um cálculo errado em 10 e até 100 ordens de grandeza, como chega a acontecer, pode indicar como inviável uma solução que afinal era exequível. Pensa o autor que será necessário procurar aperfeiçoar a teoria da consolidação. Para isso não se afigura necessário estabelecer novos modelos reológicos, pois os já propostos atingiram grande complexidade. Os aperfeiçoamentos terão de ser procurados noutros caminhos. Impõe-se, por exemplo, ter em consideração que a compressibilidade e a permeabilidade não são constantes ao longo de um processo de consolidação. Também é possível que outro modelo dentre os propostos, mas menos simples que o de Terzaghi, tenha de ser adoptado.

Jamiokolvski *et al.*, na Conferência sobre parâmetros de cálculo que se realizou em Brighton em 1979, apontam para a conveniência de determinar a compressibilidade e a permeabilidade por meio de ensaios "in situ". O pressiómetro autoperfurador parece ser um aparelho particularmente adequado para estas determinações (modalidade de ensaio "holding", que consiste em manter a expansão a volume constante e registar as correlatas pressões e tempos). De qualquer forma, este é certamente um tema que necessita ser ainda muito trabalhado.

Outra importante questão, a determinação da tensão de pré-consolidação, tem beneficiado recentemente de grandes aperfeiçoamentos na sua técnica de determinação. Os ensaios conduzidos por Janbu *et al.* (Congresso de Estocolmo, 1981) em que a tensão aplicada à amostra, σ , cresce continuamente, de tal forma que provoca o aparecimento

de tensões intersticiais, u , a uma taxa que conduz a ser constante a relação $\dot{\sigma}/\dot{u}$ parecem ter trazido um significativo contributo para o aperfeiçoamento da determinação da tensão de pré-consolidação (além de tornar todo o ensaio muito mais rápido). Mas, estranhamente, como se deduz do estudo dos mais recentes trabalhos sobre pré-consolidação, é o próprio conceito que ainda não se encontra bem clarificado: em que proporção participam na aparente pré-consolidação efeitos devidos a tensões aplicadas e efeitos diagenéticos, independentes da tensão, mas fortemente dependentes do tempo? É de notar que investigadores pronunciando-se recentemente sobre o assunto (Jamiolkowski *et al.* 1985) apresentam fortes críticas ao método preconizado por Janbu e prescrevem que é de continuar a usar o método tradicional de cargas por incrementos. E no que se refere ao sentido do conceito, pronunciam-se, parece que muito sensatamente, desta forma: há muitos factores que podem influir na grandeza do valor da tensão a que tradicionalmente se chama de pré-consolidação; não parece possível, por ensaios, destrinçar esses factores, cujos efeitos se sobrepõem; visto isso, encare-se a tensão de pré-consolidação, objectivamente, como uma singularidade reológica, cujo conhecimento é importante porque ela separa dois tipos de comportamento de solos: abaixo dessa tensão a deformabilidade é pequena e as deformações podem considerar-se elásticas; a tensão de consolidação marca um ponto da curva de cedência e, acima dela, processam-se deformações plásticas. Esta é, como se vê, uma visão do problema informada pela Teoria da Plasticidade.

Um outro problema relacionado com a consolidação que, talvez estranhamente, ainda levanta muitas dúvidas, relaciona-se com a consolidação secundária ou secular. Assim, constata-se que ainda no recente Congresso de S. Francisco (Jamiolkowski *et al.* 1985) se continuava a considerar os fenómenos de deformação a tensão constante como mal estudados e mal compreendidos. Não se afigurava ao autor, antes desta leitura, que neste domínio da micro-reologia de solos reinasse ainda tão confusa situação. Mas, ainda mais estranha se afigura a afirmação feita no mesmo trabalho que as deformações secundárias só se iniciam depois de ter cessado a consolidação hidrodinâmica, isto é, depois da completa dissipação das tensões neutras. O autor pensava que formar juízo sobre esta matéria não estava pendente de quaisquer estudos complementares. O problema parecia de lógica pura: se o "esqueleto" sólido começa a receber tensões (efectivas) logo no início da consolidação hidrodinâmica, necessariamente que as suas deformações secundárias (por "creep", condicionadas pela viscosidade das ligações, isto é, deformações processadas nas camadas de água mais próximas da face da partícula sólida, com maior adsorção à partícula) começarão simultaneamente com as hidrodinâmicas. Uma exploração estritamente lógica desta questão levaria a um estranho paradoxo, se se considerasse que assim não era. Com efeito, neste caso, atingindo-se os 100% de consolidação hidrodinâmica para tempo infinito (e não é costume ser invocado qualquer modelo reológico que o contradiga) a consolidação secundária... não chegaria a começar. Talvez não seja inútil esta desgraciosa graça. A moderna gnoseologia ensina que as análises de questões que levam a estes jogos verbais em regra indicam que se está

perante uma questão "sem sentido", isto é, uma questão que não é verdadeira nem falsa, mas "vazia" nalguma ou em todas as suas premissas.

O autor destas linhas, dada a importância de que se revestem afirmações como as que atrás foram comentadas, sobretudo quando contidas num Relato Geral de um Congresso Internacional de Mecânica dos Solos, vai, com a modéstia e humildade que sempre nestas questões se devem pôr, rever os seus estudos destas matérias e, provavelmente, re-arrumar as suas ideias que, pelo visto, tinha prematuramente deixado sedimentar.

2.2.5 — *Problemas de percolação*

Os problemas que se põem no estudo da percolação em maciços terrosos são fundamentalmente os que se prendem com a determinação do coeficiente de permeabilidade.

Também se relacionam com problemas de percolação as questões de filtros para defesa da erosão interna, questão que será tratada mais adiante.

A determinação do coeficiente de permeabilidade pode ser feita em laboratório se da formação a estudar for possível obter amostra da classe 1. Para solos de alta permeabilidade (entre 1 e 10^{-6} cm/s) a determinação é feita em permeâmetros por aplicação directa da lei de Darcy. Para solos de permeabilidade baixa (inferiores a 10^{-6} cm/s) a determinação laboratorial só pode ser feita usando um ensaio de consolidação: como é sabido a velocidade de consolidação depende da permeabilidade, donde, por via indirecta, se pode deduzir o coeficiente de permeabilidade da velocidade de consolidação observada em ensaio adequado.

Mas, como se deduz do que ficou dito em 2.2.4, toda esta problemática necessita revisão.

Acontece que a permeabilidade é extremamente sensível a variações, mesmo diminutas, da granulometria e da compacidade. Para atingir a "homogeneidade de escala" a que se fez referência em 2.1 torna-se assim, muitas vezes, necessário interessar na determinação da permeabilidade um volume de solo maior do que aquele de que se dispõe num ensaio de laboratório. Têm melhor fiabilidade os ensaios "in situ" feitos a partir de um furo de sondagem, por extracção ou injeção de água, sob a acção do peso próprio ou sob pressão. Mesmo assim ainda acontece que a sensibilidade extrema da permeabilidade a pequenas variações do meio, em granulometria e em compacidade, obrigue a ter de interessar um volume de solo ainda maior para poder dispor de um valor representativo da permeabilidade do maciço. Recorre-se então a ensaios de bombagem, com disposição de piezómetros em torno do poço de bombagem, para deduzir com precisão a superfície da freática rebaixada para um dado caudal bombado e daí deduzir o coeficiente de permeabilidade.

Num domínio tão problemático é fácil antecipar que intensas investigações têm de ser realizadas para tornar as determinações do coeficiente de permeabilidade mais expeditas. É possível até que se tenha de radicalmente mudar os dispositivos e os processos de ensaio. É a linha a que já se fez referência em 2.2.4 (determinações usando, por exemplo, o pressiómetro).

2.2.6 — *Problemas de capacidade de carga*

Assim se designam os problemas de equilíbrios de maciços terrosos sob a acção de solicitações exteriores. Dispõe-se de soluções teóricas, para uma dada superfície de imposição de solicitações, com forças normais à superfície ou inclinadas, centradas ou excêntricas, com distribuição uniforme ou distribuição irregular.

Este problema está incluído nos equilíbrios gerais que foram mencionados em 2.1. Aí se disse que perspectivas de investigação apresentam. Só interessará, talvez, acrescentar que, sendo os problemas de capacidade de carga os mais frequentes em Mecânica dos Solos, é de esperar que seja neste campo que as mais intensas e extensas investigações sejam efectuadas, sobretudo as relativas a determinações "in situ".

2.2.7 — *Estacas*

Estaca isolada com carga vertical

Antes de comentar as fórmulas teóricas que têm sido propostas para cálculos de capacidade de carga de estacas flutuantes, interessará comentar os fenómenos envolvidos na existência da "profundidade crítica". Se se cravar uma haste, uma barra, uma estaca, um qualquer elemento alongado, num meio granular com atrito, constata-se que, a partir de uma certa profundidade — "profundidade crítica" —, a resistência à cravação estaciona, deixa de crescer com a profundidade. Foi um fenómeno que, ao ser constatado, causou uma certa surpresa nos teorizadores da Mecânica dos Solos, pois crescendo a tensão média com a profundidade seria de esperar que a resistência à cravação crescesse também, pois depende da tensão média com mediação do ângulo de atrito interno. Foram propostas diversas explicações para os fenómenos envolvidos no efeito "profundidade crítica". Parece que a explicação que melhor colhe é a que atribui o facto ao aparecimento de efeitos de cúpula em torno da haste. Quer dizer, abaixo da "profundidade crítica" (Fig. 11) o solo adjacente à haste seria libertado das acções de peso próprio das camadas superiores, por estas acções se transferirem, por efeito cúpula, para zonas do maciço mais afastadas.

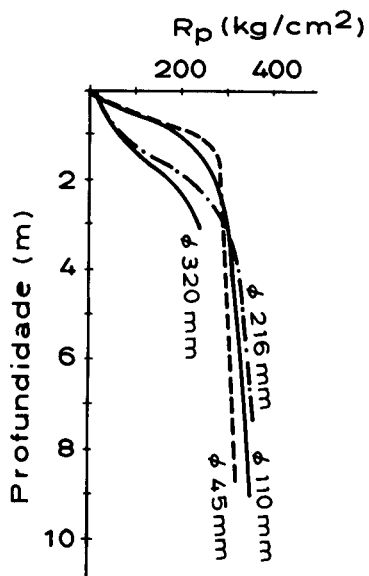


Fig. 11 — Variação de R_p com a profundidade

A quase totalidade das formulações teóricas para calcular a capacidade de carga de estacas flutuantes não entra em conta com o efeito "profundidade crítica". Isto mostra a sua pequena adequabilidade. Só em 1963 Meyerhof propôs uma formulação que leva em conta a "profundidade crítica". Parece portanto que será esta a formulação, hoje disponível, mais adequada para cálculos deste tipo. Vê-se porém, pela complexidade da questão, como ela é problemática e portanto aberta a intensa investigação.

Uma alternativa para calcular capacidades de carga de estacas flutuantes é usar métodos semiempíricos baseados nas indicações de ensaios penetrométricos CPT. Apesar do carácter de estudo em modelo que este ensaio comporta nem por isso se dispensa, nas obras em estacaria, uma frequente comprovação por meio de ensaios de carga.

Os ensaios de carga constituem outro domínio requerendo investigação. Com efeito, os ensaios de carga clássicos são dispendiosos e demorados. Já há anos que se exploram ensaios dinâmicos, medindo a velocidade de propagação de ondas de choque na estaca para avaliar a sua integridade e até da sua capacidade de carga. Mas esta é uma questão ainda cheia de incertezas, como facilmente se compreende.

Estaca isolada com carga horizontal

Dispõe-se de soluções, por elementos finitos, para calcular o comportamento de estacas sujeitas a solicitação horizontal. São soluções em que se tomou, para o solo envolvente da estaca, uma reologia bastante simplificada.

Poulos e Broms têm soluções publicadas em que, por métodos semiempíricos, contam com plastificação na zona superior do terreno envolvente da estaca.

Pode-se, obviamente, procurar por elementos finitos soluções para reologias mais complicadas, o que poderá porém trazer dificuldades operacionais.

Todas estas questões, como é evidente, são campos abertos para investigações adicionais.

Grupos de estacas

As fórmulas e regras de que se dispõe são baseadas em estudos elásticos, complementadas porém, para melhor as adequar à realidade, por correcções empíricas, obtidas em estudos em modelos e em observações de obras. São, por isso mesmo, merecedoras de confiança. Mas é evidente que se impõe efectuar investigação para empreender a sua teorização.

A menção que acima se fez de modelos de grupos de estacas torna oportuno um esclarecimento acerca de modelos reduzidos com observância das condições de semelhança. Os modelos de grupos de estacas são constituídos por conjuntos de varas de pequeno diâmetro e pequeno espaçamento, conjuntos que se cravam em solo igual ao solo do protótipo.

Admite-se que o comportamento do modelo é o mesmo que exibiria um grupo de estacas com diâmetros e espaçamentos usuais em obras. Como se vê este não é um estudo em modelo com condições de semelhança respeitadas. Claro que esta circunstância não retira validade ao estudo, mas coloca-o noutras coordenadas.

Há ainda outros problemas relacionados com estacas que vão certamente ser aprofundadamente estudados: o atrito negativo, o comportamento de estacas à tracção, o remeximento dos solos adjacentes durante a construção.

2.2.8 — *Impulsos sobre suportes*

Para suportes rígidos desde há cerca de dois séculos que se calculam impulsos sobre muros de suporte usando o método de Coulomb. E há mais de um século que se usa o método de Rankine. Com efeito estes são os métodos geralmente usados na prática de engenharia. Não há notícia que qualquer derrocada de muro de suporte tenha sido atribuída a insuficiência do método de cálculo dos impulsos. Parece pois que estes métodos apresentam suficiente adequabilidade. Com efeito, métodos aparecidos posteriormente, bastante mais elaborados, conduzem a resultados que muito pouco diferem

dos resultados dos métodos clássicos e por isso os novos métodos acabaram por não encontrar lugar na prática de cálculo de impulsos. Isto permite concluir que, neste domínio, não urge efectuar investigações adicionais. Mas falta averiguar, com melhor precisão do que a fornecida pelas regras empíricas actualmente disponíveis, quais os impulsos mobilizados, quer activos quer passivos, quando há constrangimentos aos deslocamentos dos suportes.

No que se refere a suportes flexíveis — cortinas ancoradas ou escoradas — intensas campanhas de observação levaram ao estabelecimento, por via empírica, de diagramas que cobrem as necessidades práticas.

No que respeita a túneis, a sua problemática actual poderá ser resumida como a seguir se aponta. Se bem que todos os problemas de Mecânica dos Solos em que há massas terrosas adjacentes a obras (activas ou passivas, sendo exemplo das primeiras um muro de suporte e das segundas uma sapata de fundação) sejam problemas de interacção, em nenhum este aspecto é tão marcado como no caso de túneis. Atente-se no seguinte: se se abrir rapidamente um túnel e, com muito curto tempo de espera, se instalar um revestimento muito rígido, as pressões no revestimento serão muito altas, da ordem de grandeza das pressões geostáticas (pressões que correspondem à totalidade do peso de terras sobre o túnel) (Fig. 12). Se, pelo contrário, se consentir, antes de instalar o revestimento, certos deslocamentos para o interior da cavidade, e se se adoptar um revestimento flexível, os deslocamentos e distorções processadas no maciço terroso darão origem à mobilização de esforços tangenciais que correspondem a forças que se subtraem às impulsões sobre o revestimento. E estes poderão mesmo ser nulos. Se os solos forem arenosos essas pressões reduzidas sobre o revestimento manter-se-ão. Mas

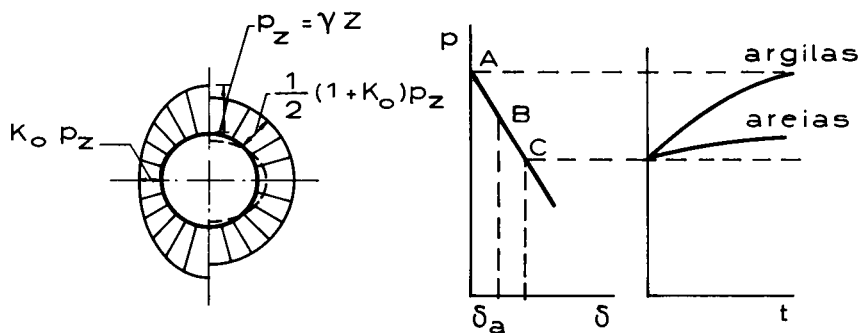


Fig. 12 — Impulsos em revestimentos de túneis

se os solos forem argilosos, as pressões, do valor reduzido inicial, evoluirão com o tempo para valores substancialmente elevados, que podem mesmo chegar ao valor da pressão geostática. Este efeito é tanto mais marcado quanto mais argiloso for o solo.

Outra circunstância peculiar do tipo do solo pode também dar-se: se o solo tiver uma reologia caracterizada por uma resistência tangencial com pico muito acentuado, seguido de descida para um valor residual bastante baixo, então acontece que certos deslocamentos da massa terrosa farão diminuir os impulsos no revestimento, mas o prosseguimento dos deslocamentos fará novamente crescer as pressões que tenderão outra vez para o valor geostático.

Como se depreende do exposto, a compreensão teórica, qualitativa, dos fenómenos envolvidos, parece dominada. Simplesmente acontece que actualmente não se sabe *quantificar*, com um mínimo de rigor aceitável, nada do que ficou qualitativamente descrito. Essa quantificação, em função da geometria dos túneis e dos diferentes tipos de terreno, é uma tarefa que se impõe.

2.2.9 — *Taludes naturais*

Há quem considere muito difícil o cálculo da estabilidade de taludes naturais. Peck, em "estado da questão" elaborado em 1966 — Encontro sobre "Stability and performance, of slopes and embankments", ASCE —, emite mesmo a este respeito opinião de muito cepticismo: os taludes naturais seriam, quase sempre, tão heterogéneos que seria impossível calcular a sua estabilidade.

Mesmo para maciços razoavelmente homogéneos surge a discrepância de que certos deslizamentos de talude analisados "depois do acontecimento" mostraram que não se pode explicar o fenómeno tomando para resistência ao corte do terreno o valor do "pico". Isto veio evidenciar que os escorregamentos de taludes naturais estariam sempre associados a fenómenos de ruptura progressiva, indo assim evoluindo a resistência "pico" para a resistência "residual". Bjerrum emitiu a opinião que estas rupturas progressivas seriam consequência de libertação de energias armazenadas nos solos consolidados que constituem os maciços naturais com taludes instáveis. Como se vê é esta uma questão aberta à investigação.

Depreende-se do que atrás ficou exposto que a observação dos taludes naturais desempenha um papel muito importante na previsão e prevenção de possíveis instabilizações.

Ter-Stepanian, que a propósito da possibilidade de estudo da estabilidade de taludes naturais tem ideias muito mais optimistas do que Peck (o que certamente deriva de um deles ter lidado mais com escorregamentos em terrenos heterogéneos, enquanto outro deparava com condições geológicas relativas a terrenos muito mais homogéneos), em Conferência pronunciada no Congresso Internacional de S. Francisco (1985) emite a seguinte opinião: se o escorregamento não for em material do tipo frágil, existem sempre

ocorrências premonitórias que permitem a sua previsão no tempo com grande precisão; a este respeito cita Ter-Stepanian o caso de um escorregamento em Tabakayama (Japão) em relação ao qual Saito efectuou a previsão do instante em que o movimento entraria em aceleração incontrolável (superior a 10 cm/s^2) com o erro de 6 minutos! Há portanto, na generalidade e na opinião de Ter-Stepanian, tempo para tomar medidas e para, muitas vezes, conseguir evitar o processamento dos escorregamentos.

A propósito do que atrás ficou dito há que aprofundar muitos aspectos, por exemplo: em certos tipos de solo a ruptura dar-se-á quando se atingir uma *extensão crítica* (Fig. 13); e as deformações podem processar-se com desaceleração, dando a impressão que o talude tende para a estabilização, mas, uma vez atingida a extensão crítica, as deformações bruscamente aceleram e o talude rapidamente evolui para o colapso. Esta questão já tinha sido teoricamente prevista em trabalho realizado pelo autor em 1962. Recentemente a Academia de Ciências da República da Arménia, em trabalhos relativos à estabilidade de taludes naturais, dirigidos por Ter-Stepanian, detectou este tipo de comportamento nalguns taludes que sofreram escorregamento.

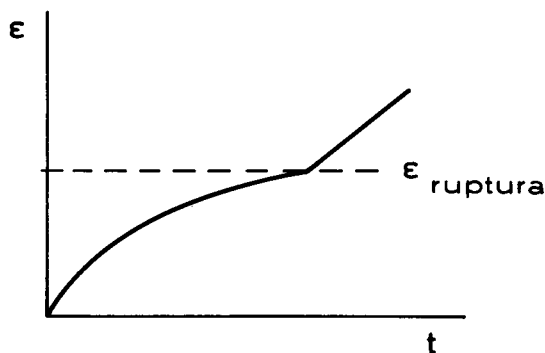


Fig. 13 — Ruptura antecida de desaceleração

2.2.10 — Taludes artificiais

Os cálculos de taludes artificiais, e como tal relativamente homogéneos, incluem-se nos equilíbrios que na generalidade foram comentados em 2.1. Aí se apontaram os principais problemas que actualmente se apresentam neste domínio. Especificamente para o caso de barragens é muito importante aperfeiçoar a problemática das equações constitutivas adoptadas nos cálculos. E como os cálculos actuais permitem analisar

situações que não são de equilíbrio-limite é possível prever as deformações das barragens. É uma previsão com muito interesse, para confirmar o dimensionamento e para verificar a exactidão da equação constitutiva adoptada. Deve ser feita "antes do acontecimento".

2.2.11 — *Filtros*

Mesmo os filtros para materiais incoerentes, apesar de há muito serem utilizados, não parece que já tenham sido sujeitos a uma revisão crítica. Há conhecimento, na literatura da especialidade, de exames muito escassos de filtros antigos para verificar a espessura de contaminação. Por outro lado não se examina sistematicamente a água exsudada para verificar a presença ou ausência de materiais finos arrastados. Funcionando o filtro como barreira estereométrica do material filtrado há interesse em comparar a granulometria do material a filtrar com a porometria do filtro, como ficou dito em 2.2.2.

Para materiais coerentes pode dizer-se que ainda não há critérios assentes para dimensionamento de filtros. Sabe-se que a coesão representa um papel importante mas falta averiguar a perenidade da coesão e outros efeitos de tempo.

Neste domínio os geotêxteis ⁽²⁾ estão a desempenhar um importante papel e é de esperar que ainda maior venha a ser a sua utilização. Há portanto investigações relacionadas com os geotêxteis que se impõe efectuar com urgência: tamanho de poro, fenómenos de envelhecimento, resistência a acções agressivas de agentes que podem estar presentes na água das barragens.

2.2.12 — *Ancoragens*

As ancoragens em solos vieram desempenhar um importante papel, quer na estabilização de taludes, quer como elementos de atirantamento de muros de suporte. Há obras em cave que hoje seria inconcebível executar sem recorrer a ancoragens. Há investigações complementares a efectuar, talvez que a mais importante delas seja a perenidade da aderência.

Há elementos de fundação, que na tecnologia são relativamente recentes, e que representam importante papel na engenharia moderna. Eles devem a sua existência a uma associação feliz de técnicas de ancoragem e de injeção. Tal é o caso das micro-estacas e das presso-ancoragens. Acerca destes elementos de construção muitos estudos complementares são ainda requeridos.

⁽²⁾ Actualmente já deve ser tarde para contrariar o uso, largamente difundido, do infeliz termo "geotêxtil". "Têxtil", do latim "textilis" (o que pode ser tecido, o que se destina a ser tecido) tem sentido que obviamente se relaciona mal com um dos mais difundidos "geotêxteis": os "geotêxteis não-tecidos".

Os processos actualmente mais utilizados para melhoria de terrenos, para além de injeções de produtos químicos ou de cimento, são: pré-cargas para provocar a consolidação do terreno a melhorar (utilizando ou não drenos verticais para acelerar o processo), compactação dinâmica, estacas de brita (estacas de compactação), estacas de cal, vibroflutuação, solos reforçados (terra armada).

Acerca de pré-cargas já se falou em 2.2.4 onde se mencionam aspectos que requerem investigação.

A compactação dinâmica é de eficiência comprovada em solos arenosos. Já se afigura questionável a sua utilização em terrenos argilosos. Afirmam os defensores do método que se dão fenómenos de consolidação rápida, com abertura de micro-fissuras que tornam a fechar, e outras ocorrências cuja exactidão está longe de estar comprovada. Não há dúvida que é este portanto um domínio requerendo investigação.

A vibroflutuação, só aplicável a solos arenosos, é um excelente método de densificação, o mesmo acontecendo com as estacas de compactação. São processos que certamente terão larga aplicação no futuro mas que não parece que suscitem largas actividades de investigação, excepto no que se refere ao aumento de potência e de eficiência dos equipamentos.

A terra armada não é propriamente uma novidade. Para dar só um exemplo cita-se a que é talvez a mais notável aplicação antiga da terra armada: o zigurate de Aqar Quf, na Suméria, a poucos quilómetros da actual Bagdad. Esta construção, que data de 1400 AC, tinha tapetes de fibras vegetais entrançadas, constituindo armaduras dispostas horizontalmente.

Mas não há dúvida que o processo esteve muitos séculos no olvido e só recentemente voltou a ser utilizado. Actualmente, como é óbvio, com recurso a materiais mais apropriados — elementos metálicos, de plástico, fibras de vidro — e com melhor conhecimento dos fenómenos envolvidos, conhecimento que permite assimilar o efeito das armaduras a uma "coesão" e calcular assim os maciços como se eles fossem constituídos por solos coerentes, com coesão permanente. Este é um domínio em que é de prever desenvolvimento apreciável em pesquisas, quer no que respeita a novos materiais, quer no que se refere a melhor conhecimento da fenomenologia envolvida.

Métodos muito recentes, desenvolvidos de há muito poucos anos para cá, trouxeram espectaculares resultados no que se refere a melhoria dos terrenos. Trata-se de métodos em que se usam injeções de muito alta pressão, não para injectar caldas, como nas injeções clássicas, mas para profundamente modificar a estrutura do solo.

São métodos patenteados e portanto com os correspondentes condicionamentos à sua utilização. Mas nada obsta a que se invéstigue a fenomenologia física envolvida, pois, como é sabido, só as concretizações materiais (instrumentos, dispositivos mecânicos, etc.) é que são patenteáveis. Por isso merecem os métodos menção nesta exposição.

Dá talvez uma ideia suficiente das suas potencialidades uma descrição sumária de um método usado na União Soviética (artigo publicado em 1984). Diz-se no artigo que o método consiste fundamentalmente em cravar no solo a tratar tubos dotados de injectores laterais através dos quais são injectados água, ar comprimido e líquidos tixotrópicos. Durante a cravação o tubo tem movimento de rotação e a pressão de injeção atinge os 60 kg/cm². Os jactos removem os finos do solo e misturam o líquido solidificante (calda de cimento, argila-cimento, produtos químicos diversos). Após remoção do tubo permanece no solo uma coluna de material muito rijo.

Outras técnicas são usadas em que as pressões utilizadas vão até algumas centenas de kg/cm² e em que os resultados obtidos, quer em resistência do solo melhorado, quer em permeabilidade, são verdadeiramente espetaculares.

2.2.14 — *Aprofundamento da investigação reológica de solos com granulometria extensa*

O conceito de "enrocamento" tem sido recentemente alargado de forma a cobrir uma gama mais vasta de materiais. Sobretudo em barragens usa-se hoje o termo "enrocamento" para designar materiais TOT (todo o tamanho) que resultam da exploração de maciços tais como xistos alterados e outros semelhantes.

Os estudos de aprofundamento das características reológicas destes materiais já se iniciaram há anos e até há contribuições portuguesas importantes neste domínio (Maranha das Neves, Veiga Pinto). Não é porém assunto que se possa considerar esgotado, pelo contrário, é importante prosseguir-lo com certo afincio.

2.2.15 — *Compactação; seu controle*

Os equipamentos de compactação actualmente disponíveis são de muito boa eficiência e não é de prever que se tornem necessárias investigações adicionais para averiguar as características de compactabilidade dos materiais usualmente dispostos em aterros.

Já o controle da compactação, conjunto de operações delicadas, dispendiosas e demoradas, requer nitidamente que se introduzam aperfeiçoamentos.

2.2.16 — *Comportamento de solos para solicitações dinâmicas*

Os estudos de liquefacção de areias estão muito desenvolvidos. É de crer que os conhecimentos já adquiridos cubram as necessidades práticas, pelo menos para os próximos anos.

Outro tanto não sucede com o comportamento de solos argilosos compactados sob a acção o de solicitações dinâmicas. Este problema põe-se com particular acuidade em relação com o cálculo de barragens aos sismos. Com efeito, é sabido que, atendendo às características visco-plásticas dos materiais de construção de barragens de aterro, podem estas suportar solicitações de curta duração que excedem largamente as tensões de cedência, sem que isso acarrete ruptura do maciço por escorregamento. Mas resultarão deformações não recuperáveis que é necessário saber calcular para ajuizar se o estado limite de utilização de barragem foi excedido. O esclarecimento deste problema requer investigações no domínio do aprofundamento do conhecimento da reologia dos materiais em causa para solicitações dinâmicas.

A adequada instrumentação de barragens, para registar, quando da ocorrência de sismos, as respostas em termos de deslocamentos, acelerações, frequências, constitui uma das melhores vias para conseguir esse aprofundamento.

2.2.17 — *Semelhança. O uso de modelos reduzidos*

Já na primeira parte desta exposição se aludiu a esta questão e ao interesse e, por outro lado, às dificuldades que ela apresenta. Aos motivos de interesse poderá ainda acrescentar-se os que derivam do facto de os ensaios em modelo em muito esclarecerem os mecanismos de ruptura.

Antes de retomar o tema é necessário esclarecer que modelos reduzidos, obedecendo às condições de semelhança, têm sido largamente utilizados montados em centrífugas. Por este processo consegue-se ladear uma das maiores dificuldades do problema: os efeitos de peso próprio são na centrífuga substituídos por efeitos de força centrífuga.

Mas uma centrífuga é cara e os ensaios são dispendiosos e difíceis de realizar. As observações que é possível efectuar no modelo encontram por outro lado limitações devido às dificuldades de tirar do modelo o "sinal" transmitido por cada aparelho aí instalado. Daqui deriva que seria extremamente conveniente se se pudessem utilizar modelos "gravíticos" (está-se a utilizar este termo para designar os modelos em que as forças de peso próprio são as que a gravidade determina) (Fig. 14).

Ao procurar materiais para construir modelos "gravíticos" surgem grandes dificuldades. Seja, por exemplo, e para avaliar essas dificuldades, o caso de um maciço actuado só por forças de peso próprio. Manuel Rocha demonstrou que a escala de tensões

homólogas $\frac{tm}{tp}$ é $\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\lambda\rho}$ em que $\frac{1}{\lambda}$ é a escala geométrica e $\frac{1}{\rho}$ é a escala das densidades. Quer dizer que se se executasse um modelo à escala $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{10}$ e se se

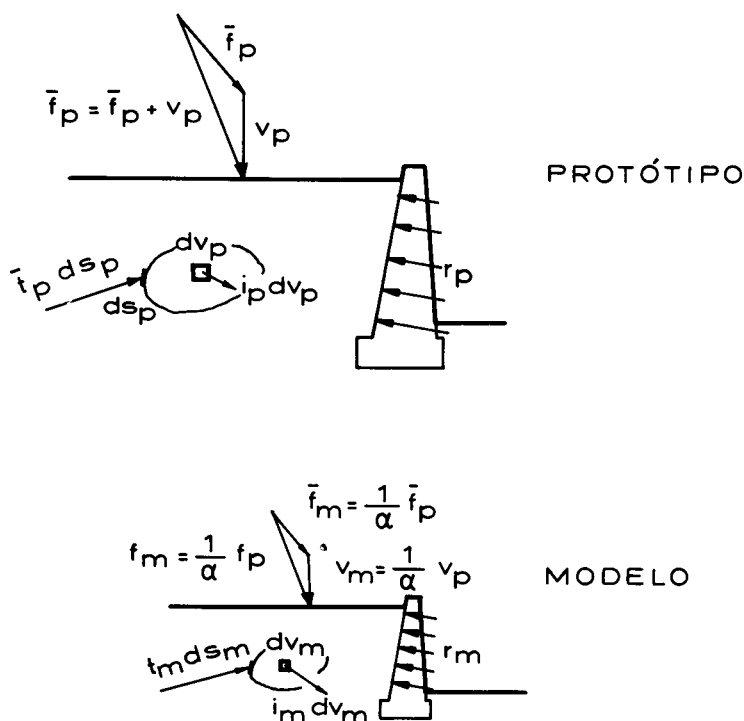


Fig. 14 — Relações de semelhança

utilizasse o mesmo material do protótipo $\left(\frac{1}{\rho} = 1\right)$ viriam para o modelo tensões 10 vezes mais baixas do que no protótipo. Seriam tensões muito baixas, praticamente impossíveis de medir. Haveria portanto que procurar um material para o modelo substancialmente mais denso, com $\frac{1}{\rho} = 2$ ou 3. Mas há outras exigências a satisfazer; assim, a compressibilidade do modelo não convém que seja mais baixa do que a do protótipo, por razões óbvias. Donde virá que o material procurado teria que ser 2 ou 3 vezes mais denso do que o material do protótipo, mas ter a mesma compressibilidade.

Note-se que são dois requisitos que, nos materiais comuns, são em regra incompatíveis, pois em geral quando aumenta a densidade diminui a compressibilidade. Se se tiver em conta que há ainda mais condições a satisfazer, ficar-se-á com uma ideia da dificuldade em encontrar um material satisfatório para construir modelos em Mecânica dos Solos. Estas dificuldades são tão grandes que têm levado à desistência nalgumas tentativas que se têm iniciado nesse sentido.

Mas a conveniência de poder dispor de modelos de Mecânica dos Solos é tão grande que tudo indica que essas tentativas serão retomadas, sobretudo depois de os métodos numéricos se terem esgotado nas suas possibilidades por não-adequabilidade dos modelos matemáticos utilizados.

2.2.18 — *Observação de obras*

Seguindo a linha que logo de início se apontou de duas vias fundamentais de investigação, uma que consiste fundamentalmente na pesquisa de métodos de cálculo e outra que tem por fim fundamentalmente a determinação de características de solos, vem que a observação de obras tem que fornecer elementos para fundamentar e ajuizar de problemas que se situam em ambos os domínios. Assim, há que verificar se os métodos de cálculo são adequados, o que os resultados da observação de obra esclarecerá se houver confiança nos parâmetros de cálculo. E há que julgar se os parâmetros de cálculo foram bem escolhidos, o que a observação de obra ajudará a realizar se houver confiança nos métodos de cálculo adoptados. Os procedimentos a seguir para conseguir êxitos neste intrincado problema, que tem algo de círculo vicioso, constitui um interessante desafio aos investigadores em Mecânica dos Solos.

Pelo que ficou dito poderá concluir-se que a observação de obras é um tema inesgotável de investigações: novos aparelhos para medir grandezas que já se medem, mas que é necessário medir com maior precisão; novos aparelhos para medir grandezas que actualmente não se medem mas que se sente necessidade de medir.

VOTO DE AGRADECIMENTO

Ao propor um voto de agradecimento ao Eng. José Folque, o Eng. Pedro Nunes proferiu as seguintes palavras:

”Como já foi aqui referido, o nosso prelector de hoje encetou a sua carreira geotécnica em 1946. Uns três anos antes, Terzaghi publicara a sua *Mecânica dos Solos Teórica* e, por 1947, com Peck a *Mecânica dos Solos na Prática de Engenharia*.

Assim, o currículo de José Folque desenvolveu-se em contemporaneidade com — melhor dizendo, em integração no — processo mundial de grande expansão da Mecânica dos Solos. Foram (guardadas naturalmente as diferenças de escala) dois florescimentos paralelos e correspondentes.

A mesma sorte tiveram — e dela foram dignos, e têm aqui hoje representação na plateia — outros geotécnicos portugueses. Mas eles serão unânimes em reconhecer a penetrante preparação teórica de Folque.

É por estas circunstâncias talvez que, não obstante a intenção — sem dúvida conseguida — de prospectar o futuro próximo da investigação em Mecânica dos Solos, eu senti — mas por certo o método expositivo seguido também assim propiciou —, senti, dizia, como em pano de fundo da lição, a recordação latente da própria biografia — sejamos humanos, da própria vida — do prelector.

Se não fosse uma desagradável consonância, eu sugeriria que, ao publicá-la, ele lhe mudasse o título para *as minhas memórias de Mecânica dos Solos...*

Tivemos assim o prazer de ouvir uma exposição de conceitos, muito bem sistematizada através dum fraseado escorreito, com discreta referência às contribuições pessoais e donde em onde ornada por uma analogia sugestiva ou uma citação erudita, sinais da extensa cultura geral do prelector.

Na vasta soma de informações e reflexões que o Eng. Folque aqui nos trouxe, há duas ordens de problemas a que me atrevo fazer referência especial.

Uma é-me sugerida pelo vasto leque de investigação em aberto para as quais se tornam necessárias a expansão e o aperfeiçoamento das observações de obras. O que a este respeito quero salientar é a importância que nessa expansão têm de ter as observações *de rotina*.

A rotina é o suporte essencial de qualquer investigação. Há que assinalar a responsabilidade e a projecção das tarefas dos observadores de rotinas.

E há que assinalar aos jovens investigadores que a sua vivência próxima — quando não directa — das rotinas de observação é o campo em que hão-de surgir os estímulos da sua criatividade.

E esta anotação leva-nos à outra ordem de problemas para que fui especialmente sensibilizado. Refiro-me àquele *risco* de recessão na investigação experimental (dou por entendido de laboratório como de campo) que o Eng. Folque julga detectar na atracção dos novos geotécnicos pelo cálculo numérico apoiado na computadorização.

Creio que o problema existe. E o prelector está no caminho certo da sua análise enquadrando-o na sociologia.

Só quero dizer que, a essa luz, nós, os mais velhos, temos de ajudar a identificar as nossas próprias responsabilidades, como educadores, como dirigentes, como políticos e como homens e mulheres que tantas vezes somos (sem disso nos apercebermos) *exemplares*.

Finalmente, quero referir a intenção manifestada pelo prelector — não obstante a sua disponibilidade para o memorialismo, que considero comprovada —, a intenção, dizia, de continuar a trabalhar, de trabalhar *pensando*, e, por certo, de *pensar para nós*.

Proponho que, com este especial sentido, lhe agradeçamos numa renovada salva de palmas.”

O voto foi aceite com aclamação.

4.ª LIÇÃO MANUEL ROCHA

Tema

Predicting the behaviour of underground openings in rock

Conferencista

DR. NICK BARTON, Norwegian Geotechnical Institute

Data

12 de Outubro de 1987, às 15 horas

Local

Fundação Calouste Gulbenkian — Auditório 2

Organização

Associação de Geotécnicos Antigos Alunos da F.C.T./U.N.L.

Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Secção Autónoma de Geotecnia da F.C.T./U.N.L.