

# ALGUMAS REFLEXÕES SOBRE AS TEORIAS USADAS EM ESTUDOS DE MECÂNICA DOS SOLOS\*

Some thoughts concerning the theories involved in soil mechanics studies

por  
JOSÉ FOLQUE\*\*

RESUMO – Os fundamentos das metodologias usadas em estudos de Mecânica dos Solos são passados em revista evocando as ligações às teorias da elasticidade e da plasticidade. Comentam-se as idealizações necessárias para assimilar os solos reais a corpos reológicos relativamente simples.

SYNOPSIS – The fundamental methodologies adopted in Soil Mechanics studies are reviewed, stressing the connections with the theories of elasticity and plasticity. The approaches involved in the assimilation of actual soils to ideal and simple rheologic bodies are commented.

## 1 – O ÂMBITO DA MECÂNICA DOS SOLOS

Todas ou quase todas as obras de engenharia implicam decisões que necessitam informação sobre o comportamento de terrenos. No dimensionamento de fundações de estruturas tem de haver conhecimento da capacidade do terreno para suportar as solicitações transmitidas e da ordem de grandeza dos deslocamentos que a aplicação dessas solicitações causará. Nas escavações para inserir vias de comunicação, canais, ou qualquer outra obra que em parte se desenvolva abaixo do nível do solo, há que decidir acerca da estabilidade dos taludes, da necessidade de os reforçar ou de construir obras de suporte; se obras de suporte forem reconhecidas necessárias, há que decidir sobre a grandeza dos impulsos que elas terão de absorver. Nos túneis e cavernas subterrâneas, tais como cavernas para

---

\* Manuscrito recebido em Outubro 1976. A discussão do trabalho está aberta durante um período de três meses.

\*\* Investigador, Chefe da Divisão de Fundações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

armazenamento (hoje bastante usadas), centrais subterrâneas, parques de estacionamento de viaturas, tem de se tomar decisões com base na estima das solicitações que os terrenos envolventes determinam nas estruturas de suporte e de revestimento. Nas obras em que a terra é usada como material de construção – aterros de estrada, barragens de terra – há que conhecer as características que condicionam os equipamentos de escavação e de compactação e tem de se saber prever as suas características mecânicas depois de compactada, o que será determinante no dimensionamento da obra-jorramento dos seus taludes, drenos.

A lista que se apresentou, e que não se pretende exaustiva, ilustra bem a densidade de inter-informação necessária para adequadamente decidir sobre o conjunto: obra super-estrutural/terreno, seja ele subjacente, adjacente, ou envolvente.

Tenha-se presente que a solução adoptada será tanto mais adequada quanto mais justa tiver sido a compreensão dos fenómenos inter-activos estabelecidos entre as duas entidades: a obra e o terreno que a suporta ou solicita, passiva ou activamente. Passivamente quando predomina o efeito de reacção do terreno às solicitações transmitidas, activamente quando predomina a acção de solicitação do terreno sobre a obra que o suporta. Em qualquer dos casos há entrelaçamento entre a solicitação e a resposta, não estabelecido por via de sentido único, mas sim com retro-acção condicionante na própria solicitação, retro-acção que é função do tipo e nível da resposta.

O que fica exposto aparenta uma complexidade de inter-relações que pode causar a seguinte perplexidade: como foi possível, desde há séculos, realizar obras, e tantas foram de extraordinária complexidade super-estrutural, conhecendo tão pouco, em termos de uma precisão mesmo só de exigência média, àcerca do comportamento dos maciços terrosos? Eis aqui matéria para uma certa reflexão que apresenta interesse por permitir elucidar o âmbito, a natureza e as limitações das ciências que se vieram a designar por Mecânica dos Solos e Mecânica das Rochas.

Duas razões principais permitiram que a engenharia se exercesse com relativo êxito conseguindo superar deficiências muito acentuadas relativas ao conhecimento do comportamento dos terrenos. A primeira deriva do facto de um número muito elevado de obras, sobretudo as de maior vulto, interessarem terrenos rochosos: rochas sãs, quase sãs ou pelo menos pouco alteradas. Embora o conhecimento do comportamento de rochas também se apresente extremamente precário para altas solicitações, o nível das solicitações instaladas é em geral

muito modesto em comparação com a resistência final do material. Por isso uma grande imprecisão no cômputo quantitativo da “resposta” não tem repercussões de ordem prática que condicionem as decisões a tomar.

Outra razão resulta da acumulação, por tentativa e fracasso, de conhecimentos empíricos, compilados em códigos de edificação, conservados na tradição local, que permitiram estabelecer regras de quantificação de “respostas” seguras, embora com um certo desconhecimento da margem de segurança implicada. O progresso tecnológico levou porém a que estas vias se exaurissem. E assim surgiu a necessidade de codificar disciplinas com conformação científica.

A Mecânica dos Solos estabelece-se como resultado de um esforço de teorização para enquadrar o comportamento dos solos em formulações de conformação científica. Organizou-se portanto em termos de, partindo de bases físicas, construir por elaboração racional teorias explicativas dos comportamentos observados e, *a fortiori*, capazes de servir de base à previsão de comportamentos para condições extrapoláveis das observadas. A Mecânica dos Solos é assim integrada por um conjunto de proposições “universais”. É importante realçar esta circunstância para a comparar com o panorama algo diferente que apresenta a Mecânica das Rochas. Neste domínio, com efeito, porque os comportamentos são determinados por peculiaridades dos maciços com geometria que implica dimensões da ordem de grandeza dos próprios elementos da obra solicitante, cada caso concreto é um caso de espécie. Por exemplo, a “resposta” de um maciço rochoso fracturado solicitado por uma sapata é determinada pela ocorrência ou não ocorrência de uma só diaclase com um desenvolvimento que pode ser de muito maior dimensão que a própria largura da sapata. A orientação da diaclase é determinante predominante da “resposta”. Por isso a Mecânica das Rochas não se afigura que se possa organizar em termos de teorizações contendo formulações “universais”, parecendo condenada a ter de ser uma disciplina “casuística”. Claro que poderá haver maciços rochosos, muito alterados ou com grande frequência e pequeno espaçamento de fracturas aleatoriamente orientadas, que consintam um tratamento em termos de “universais”; mas metodologicamente será então legítimo (e mesmo mais indicado) situá-los no domínio da Mecânica dos Solos.

## 2 – A VARIABILIDADE DOS SOLOS

Uma teorização da Mecânica dos Solos do tipo racionalista e determinístico, como atrás se deixou insinuado, implicaria para boa articulação entre a teoria e a

prática uma uniformidade de propriedades do objecto – solo – que na realidade está longe de existir. Não só os solos são muito variáveis encarados na generalidade das espécies, mas também uma dada formação que em primeira aproximação, em classificação qualitativa, se considera como um “dado solo” exhibe acentuada variação de propriedades de ponto para ponto. É evidente que esta circunstância faz apelo mais a um tratamento probabilístico do que a uma formulação determinística. Como é sabido porém, as formulações determinísticas são muito mais potentes para servir de base a teorizações “universais”, por outras palavras, prestam-se muito melhor à elaboração de doutrinas que, com fácil apreensão, fornecem fundamento racional a uma explicação englobante de um dado conjunto de fenómenos observados. Formulações probabilísticas, a que se é forçado quando a contraprova da realidade assim o exige, têm êxito quando sobrepostas a um fundo de primeira aproximação, simplificado em termos determinísticos. O uso de formulações probabilísticas, complementando primeiras aproximações determinísticas, é uma tendência actual em Mecânica dos Solos, mas este é um aspecto que excede o âmbito da presente exposição. Para já importa sublinhar e reter que:

a) – os solos reais exibem acentuada variabilidade de propriedades de ponto para ponto;

b) – uma cómoda e conveniente teorização do seu comportamento obriga a que essa variabilidade seja ignorada;

c) – a simplificação assim introduzida na Mecânica dos Solos é útil porque permite uma boa compreensão qualitativa dos comportamentos observados, mas não pode ser ignorada nas aplicações práticas, pois evidentemente se repercutirá no grau de precisão com que as previsões de comportamentos são efectuadas.

Depreende-se do enunciado em a), b) e c) que a Mecânica dos Solos, para se organizar como disciplina racionalista de conformação determinística, tem de basear-se em solos ideais, em “arquétipos” de solos. Na passagem da teoria à prática, é uma delicada decisão do utilizador julgar da maior ou menor adequação do arquétipo ao solo real com que tem de lidar.

### 3 – OS MÉTODOS USADOS EM MECÂNICA DOS SOLOS PARA ESTUDO TEÓRICO DOS PROBLEMAS

Duas grandes linhas de aprofundamento teórico são usadas em Mecânica dos Solos. Uma, que se poderá designar por micro-reológica ou micro-estrutural,

explora o domínio da física e fisico-química das partículas, suas cargas de superfície, acções inter-partículas, efeitos dos fluídos de preenchimento intersticial e sua composição iónica. Com base nestes estudos procura-se depois organizar as teorias explicativas dos comportamentos mecânicos.

Outra linha de aprofundamento, que se poderá designar por fenomenológica, ou até mesmo por epifenomenológica pois que propositadamente ignora o substrato físico dos comportamentos observados, assimila o solo a um corpo contínuo, atribuindo-lhe um comportamento básico em termos de uma dada função tensões-deformações, e parte daí para teorizações descritivas, explicativas, e portanto capazes de fornecer previsão, dos equilíbrios mecânicos (sobretudo estáticos) dos maciços terrosos.

Será tema doutro trabalho analisar com algum pormenor a via de aprofundamento micro-estrutural. Para já comentar-se-á só a segunda das apontadas que informa as teorias da Mecânica dos Solos de maior interesse para o utilizador não especialista em Física dos Solos, um engenheiro que recorre à Mecânica dos Solos para a resolução de problemas concretos que as obras suscitam. As formulações teóricas elaboradas de acordo com esta linha, como se depreende do que àcerca delas já se disse, implicam um elevado grau de idealização, necessária para tornar os problemas domináveis pelas ferramentas de cálculo disponíveis, mas que não pode ser tão desligada do real que conduza a soluções sem validade prática, por muito desviadas em relação ao comportamento na natureza verificado.

Estas idealizações caracterizam os métodos próprios da Mecânica dos Solos fenomenológica e são diferentes, como se vai ver, quando o problema envolve questões predominantemente interessando deformações volumétricas e quando o problema interessa equilíbrios em que estão em jogo solicitações predominantemente distorsionais.

Ao contrário da aproximação tradicional em engenharia estrutural, em que o desenvolvimento clássico se fez com base numa idealização elástica dos materiais, a

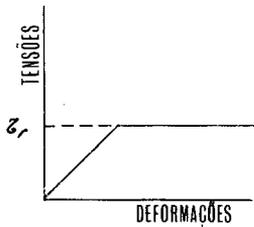


Fig. 1

Mecânica dos Solos convencional construiu-se postulando um certo tipo de comportamento plástico para o material "solo". Caracteriza o comportamento postulado o facto de, atingido um dado nível de tensão tangencial,  $\zeta_r$ , o material "ceder", entendendo-se por isso que ele é incapaz de reagir com tensão superior a  $\zeta_r$  (não pode suportar tensões tangenciais superiores a  $\zeta_r$ ) e as defor-

mações processam-se a tensão constante  $\zeta_r$ . O que por outras palavras quer dizer que, no domínio plástico, as extensões (as deformações) *não dependem* das tensões. Por outras palavras ainda, num material plastificado reina um campo de tensões tangenciais uniforme ao longo das “linhas de escorregamento” e o estado de deformação comporta uma grande latitude de deformações possíveis. Recorde-se que num material elástico, em que há correspondência bi-unívoca entre tensões e extensões, as condições de compatibilidade obrigam a que entre elementos contíguos de um contínuo existam estritos condicionamentos de tensão e extensão. Tal não se passa num contínuo plastificado, pois que elementos vizinhos podem deformar-se, mantendo a continuidade física, sem que tal circunstância afecte o estado de tensão, “congelado” no valor  $\zeta_r$  ao longo das linhas de escorregamento.

Depreende-se do que fica dito que o estudo do equilíbrio de um maciço plastificado encontra-se facilitado por se poder praticamente ignorar o estado de deformação. O estudo reduz-se à pesquisa e traçado das redes de linhas de escorregamento e à comparação das tensões resultantes das solicitações exteriores com o nível de tensão  $\zeta_r$ , máximo que o material pode suportar.

Como se vê, esta metodologia conduziu a que em Mecânica dos Solos se tivesse, logo desde o início da época clássica, realizado estudos de equilíbrios por “métodos de cálculo à rotura”. Mas estes métodos, como se depreende até da sua abreviada descrição apresentada, comportam o inconveniente de não informar sobre as deformações ocorrentes. E mais outra lacuna de informação comportam ainda: atente-se a que, como o estudo é feito para uma situação de equilíbrio-limite e é aplicado a um maciço que não está em equilíbrio-limite (pois se o estivesse não era estável de um ponto de vista de engenharia civil e teria portanto de ser modificado para o trazer para uma situação hipo-limite) um qualquer artifício tem de ser introduzido para conseguir esta simulação: traçar a rede de superfícies de escorregamento de um maciço como se ele estivesse em equilíbrio-limite quando na realidade tal não é o caso. Esse artifício poderá ser, por exemplo, atribuir uma tensão de plastificação fictícia  $\zeta'_r$ , menor do que o  $\zeta_r$  real; ou considerar solicitações fictícias,  $S'$ , maiores do que as solicitações reais,  $S$ . E a quantificação da reserva de resistência far-se-á pela comparação entre os valores reais e fictícios, por exemplo pelas relações  $\zeta_r/\zeta'_r$  ou  $S'/S$ .

É aceitável que uma quantificação da reserva de resistência assim estabelecida tenha boa aplicação prática, informe de facto sobre a estabilidade do maciço.

Mas não há dúvida que o método não informa, não só sobre o estado de deformação, como ficou apontado, mas também sobre a própria distribuição de tensões reais no maciço verdadeiro. Procurando obviar a estas lacunas tem-se hoje progredido no sentido de refinar métodos que possam fornecer estas informações, e que obviamente não são métodos de cálculo à rotura. O desenvolvimento de métodos numéricos, sobretudo os que recorrem a elementos finitos, abre neste campo vastas perspectivas.

É curioso notar que de certa forma é um caminho inverso aquele que se seguiu em engenharia estrutural, de cálculo de estruturas de aço ou de betão, em que exauridas as potencialidades dos métodos elásticos, ou mesmo não elásticos mas em que os equilíbrios estudados não eram considerados na situação de rotura, se sentiu necessidade de evoluir para métodos de cálculo à rotura, para quantificar as reservas de resistência sobrando entre uma dada sollicitação e a sollicitação que determina plastificação.

A idealização elástica também é usada em Mecânica dos Solos. Atende-se novamente no diagrama descritivo de um material elasto-plástico. No ramo OA a resposta é elástica. Isto legitima que, mesmo dando como certo que uma idealização elasto-plástica é uma boa aproximação

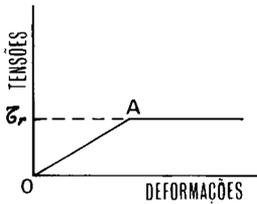
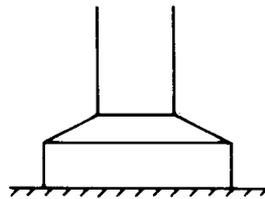


Fig. 2

Como exemplo tem-se o cálculo das tensões induzidas sob uma sapata. A tensão induzida num qualquer ponto P do maciço é em regra calculada usando métodos próprios da teoria da elasticidade e a prática tem mostrado que é boa a aproximação conseguida.

Para conveniente estudo de certos fenómenos típicos de solos argilosos não pode ser ignorada, numa idealização que para esses solos se construa, uma componente viscosa. É o caso da deformação por consolidação,

descritiva do comportamento de massas terrosas, a pesquisa das respostas para níveis de sollicitação no ramo OA possa ser feita utilizando uma idealização elástica. Este é o caso da larga utilização que na mecânica de maciços terrosos se faz da teoria da elasticidade para, por exemplo, calcular tensões induzidas no interior do maciço por sollicitações aplicadas à superfície.



· P

Fig. 3

isto é, por deformação predominantemente volumétrica, com diminuição da porosidade. Uma idealização visco-elástica é clássica neste domínio em Mecânica dos Solos. É a base da teoria de consolidação de Terzaghi bastante vulgarizada. O “esqueleto”, constituído pelo conjunto de partículas sólidas, é assimilado a um elemento elástico e a água de preenchimento dos poros, cuja expulsão condiciona o andamento do fenómeno no tempo, constitui a componente viscosa do modelo idealizado.

Se se atender a que os fenómenos de consolidação não são reversíveis, facilmente se concluirá que uma idealização mais exigente terá de recorrer a um modelo visco-plástico, sendo a componente plástica responsável pela deformação processada e não recuperada.

Concluindo, vem então que o ajuste de um dado caso concreto a uma idealização passível de tratamento dentro das metodologias consagradas, obrigará a fazer uma escolha entre diversas possíveis opções, que vão desde a mais simples – corpo elástico linear – até uma idealização já relativamente complexa – corpo elasto-visco-plástico. Esta escolha, que poderá comportar numerosas cambiantes intermédias, é talvez o domínio em que mais perícia é exigida ao utilizador dos métodos disponíveis em Mecânica dos Solos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SUKLJE, L. – *Rheological aspects of Soil Mechanics*, Wiley, Londres, New-York, 1969.  
TAYLOR, D. – *Fundamentals of Soil Mechanics*, Wiley, Londres, New-York, 1948.  
FOLQUE, J. – *Reologia de solos não saturados*, LNEC, Lisboa 1961.