

MODELOS FÍSICOS SIMPLES DE APOIO AO ENSINO DA GEOTECNIA

SIMPLE PHYSICAL MODELS FOR TEACHING GEOTECHNICAL COURSES

Santana, Teresa, *Centro de Investigação em Estruturas e Construção, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, mtgs@fct.unl.pt*

Lamas, Pedro, *Centro de Estudos Geológicos, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, pcl@fct.unl.pt*

RESUMO

Um dos principais aspectos do ensino da Geotecnia prende-se com a necessidade de os alunos experimentarem directamente solos e rochas, manuseando-os e observando o seu comportamento. Neste sentido, modelos físicos simples podem constituir ferramentas aliciantes e inovadoras para uma fácil compreensão de alguns fenómenos e conceitos associados ao comportamento destes materiais geotécnicos. Na Faculdade de Ciências e Tecnologia têm sido desenvolvidos esforços para que os alunos das disciplinas de Geotecnia realizem pequenas experiências pedagógicas nas aulas práticas, tirando partido de alguns modelos existentes. Apresentam-se, assim, quatro experiências pedagógicas, desenvolvidas com base em bibliografia ou modelos já existentes, pretendendo ilustrar os seguintes fenómenos ou conceitos: i) escoamento em meios porosos; ii) estimativa da resistência ao deslizamento de descontinuidades em maciços rochosos, iii) avaliação do ângulo de atrito em solos incoerentes e iv) liquefacção sísmica nos solos.

ABSTRACT

One of the main aspects of teaching geotechnics is the importance for students to manipulate real soils and rocks and understand their behaviour. Being so, simple physical models can be a stimulating and innovative framework for a better understanding of concepts in geotechnical engineering. At Faculdade de Ciências e Tecnologia there has been personal involvement of teachers on encouraging students to do some simple experiment in demonstration models suited for use in a classroom. The four teaching models that are reported in this paper try to explain the following concepts or phenomena: i) seepage and groundwater flow; ii) residual shear strength of rock joints; iii) friction angle of non cohesive materials; and iv) seismic liquefaction.

1. INTRODUÇÃO

Constitui preocupação dominante dos autores, incutir uma forte motivação nos estudantes que iniciam a sua formação na área da Geotecnia. Essa motivação pode obviamente ser conseguida com o tradicional quadro preto e as palavras certas, mas é naturalmente possível criar novos estímulos à aprendizagem das suas disciplinas, diversificando os meios postos à disposição dos alunos para, como dizia Manuel Rocha os “ensinar a aprender”. Esta lógica de aprendizagem passa por dar a maior importância ao contacto com o mundo físico da Geotecnia, interessando os estudantes na realização efectiva de alguns ensaios de laboratório e em experiências com modelos físicos simples. Estimulando a sua participação activa no manuseamento de solos e rochas e na observação do seu comportamento, os estudantes desenvolvem a intuição necessária para uma melhor compreensão dos conceitos.

Relativamente aos ensaios de laboratório, tem sido desenvolvido, pelos autores, um trabalho exaustivo de aquisição, montagem e manutenção dos equipamentos mínimos necessários à realização da maior parte dos ensaios correntes de caracterização de solos e rochas realizados nos laboratórios de Mecânica dos Solos e de Geologia de Engenharia da FCT/UNL. Todo este esforço, envolvendo um número sempre crescente de alunos, foi desenvolvido no sentido de que estes executassem eles mesmos os ensaios, total ou parcialmente, em pequenos grupos de trabalho. Os alunos apreendem assim a relação entre as grandezas dos parâmetros medidos ou determinados nos ensaios e os aspectos intuitivos que resultaram do manuseamento do próprio material geotécnico, ficando com uma percepção clara das discrepâncias que podem existir entre a teoria e a prática.

A preocupação com a aproximação dos alunos aos fenómenos físicos e à experimentação passa ainda por conduzir pequenas experiências com modelos físicos simples, ilustrativos de alguns dos fenómenos, aguçando a sua curiosidade para uma compreensão sólida dos conceitos envolvidos. As experiências apresentadas foram desenvolvidas com base em alguns modelos semelhantes encontrados na bibliografia [1], [2] e [3] ou a partir de modelos já existentes, tendo sido construídas as adaptações necessárias à sua implementação no ensino da Geotecnia na FCT/UNL.

As experiências apresentadas referem-se: i) ao escoamento em meios porosos com visualização das linhas de percolação, apresentada na disciplina de Mecânica dos Solos; ii) à estimativa da resistência ao deslizamento de descontinuidades em maciços rochosos, exemplificada na disciplina de Movimentos de Terrenos e Estabilidade de Taludes; iii) à estimativa do ângulo de atrito em solos incoerentes na disciplina de Mecânica dos Solos e iv) ao fenómeno da liquefacção sísmica nos solos, realizada na disciplina de Fundamentos de Engenharia Sísmica.

2. ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS

2.1 Generalidades

A percolação da água nos meios porosos é essencial na Mecânica dos Solos dado que pode originar instabilidade da massa de solo provocando roturas catastróficas. Os alunos estudam o fenómeno como um escoamento laminar bidimensional, em meios porosos, recorrendo, entre outros, ao conceito de rede de percolação constituída por linhas equipotenciais e linhas de corrente, evidenciando que estas últimas indicam o movimento da água através do meio poroso. Como ilustração das linhas de percolação, desenvolveu-se o modelo representado na figura 1 que pretende simular o escoamento, devido à existência de dois níveis freáticos diferentes, através da fundação de uma cortina cravada numa areia bem graduada, saturada.

2.2 Experiência

Para esta demonstração, além da caixa em *perspex* com a areia, é necessário dispor ainda de uma seringa e de um corante. A torneira alimenta o escoamento e o sistema mantém-se em equilíbrio, ou seja, os níveis de montante e jusante permanecem constantes, através das respectivas saídas, instaladas à esquerda e à direita do modelo. Assim, o escoamento processa-se devido à diferença de carga hidráulica entre duas superfícies. Em seguida, vai-se injectando cuidadosamente o líquido colorido, junto às paredes do modelo, como representado na figura 1a). O líquido é arrastado pelo escoamento ilustrando as linhas de percolação (figura 1b).

Os alunos visualizam assim como é que a água se move através do solo, observando as linhas de percolação e o seu desenvolvimento para jusante.



Figura 1 - a) Injecção do corante; b) Visualização de linhas de percolação

3. DESLIZAMENTO NA MESA DE INCLINAÇÃO PROGRESSIVA

3.1 Generalidades

Na análise de estabilidade de taludes rochosos, dois dos mais importantes aspectos a ter em conta são a estrutura do maciço, particularmente no que respeita às relações entre a orientação das discontinuidades que o compartimentam e a orientação da frente exposta do talude, e o comportamento mecânico dessas mesmas discontinuidades. No caso dos planos destas últimas serem totalmente limpos, sem qualquer cimentação ou preenchimento, as características mecânicas resumem-se ao ângulo de atrito efectivo das discontinuidades. Normalmente, este parâmetro é dado pela soma de duas parcelas: ϕ_b , ou ângulo de atrito básico e i , que corresponde à influência da rugosidade.

$$\phi = \phi_b + i$$

O ângulo de atrito básico pode ser obtido por serragem de um bloco de rocha, tendo o cuidado de se manter esta discontinuidade artificial limpa de poeiras e de qualquer material proveniente do desgaste provocado durante ensaios sucessivos.

No âmbito da disciplina de Movimentos de Terrenos e Estabilidade de Taludes, os alunos realizam ensaios de deslizamento de diaclases utilizando um dispositivo de *tilt test*, ou seja, uma mesa ou plataforma de inclinação progressiva, apresentada na figura 2, cuja concepção se baseou em esquema apresentado na bibliografia [4]. Corresponde a uma prancha basculante em ferro, que faz de plano de apoio dos provetes a ensaiar e na qual se encontra fixo um transferidor em aço, coaxial com as dobradiças da prancha. A elevação desta é efectuada por accionamento manual de um simples macaco para automóveis e não através de um mais complexo sistema de motor eléctrico e contra-peso, esquematizado na fonte bibliográfica, apesar deste último oferecer óbvias vantagens quanto ao controlo da velocidade de elevação e de eventuais vibrações.



Figura 2 – a) Dispositivo de *Tilt-Test*. b) Ensaio de descontinuidade natural

3.2 Utilização do dispositivo

Este ensaio é realizado, em aula, sobre um provete rochoso de forma rectangular, cortado por uma descontinuidade natural lisa, paralela à base, que vai sendo lenta e progressivamente basculado até se dar o deslizamento do bloco superior. No instante em que tal ocorre, o incremento da inclinação é interrompido e lê-se o ângulo que o plano de apoio faz com a horizontal (α).

Este método expedito de ensaio oferece diversas vantagens em relação aos métodos laboratoriais tradicionais, realçando-se, para além da facilidade de execução, a sua aplicabilidade ao estudo da estabilidade de taludes rochosos, dadas as tensões normais extremamente baixas actuando sobre as descontinuidades. Estas últimas não permitem, contudo, ultrapassar o efeito da rugosidade que pode ser responsável por inclinações de deslizamento quase verticais, fazendo com que o bloco tombe em vez de deslizar, o que é considerado um dos maiores inconvenientes do método [5].

Um método alternativo muito simples para determinar o valor de ϕ_b recorrendo a este dispositivo, consiste em utilizar, em vez do bloco cortado por uma descontinuidade natural ou artificial, três provetes cilíndricos (figura 3), obtidos por carotagem de blocos, ou por qualquer sondagem com recolha de testemunho, e cujo processo de furação cria superfícies pré-cortadas e lisas [6], equivalentes às superfícies serradas atrás referidas.



Figura 3 - Ensaio com tarolos de sondagem

O ângulo de atrito básico equivale ao ângulo de atrito ao longo de cada um dos contactos, supostos iguais, entre o provete que desliza e os dois provetes imóveis sobre os quais se dá o movimento e é dado pela seguinte expressão: $\phi_b = \arctg (1,155 \operatorname{tg} \alpha)$ [6].

Dada a dificuldade em se obterem, até ao presente, boas amostras de blocos rochosos cortados por uma descontinuidade lisa, optou-se por avaliar, nas aulas, o ângulo de atrito básico com provetes cilíndricos obtidos de sondagens. O laboratório de Geologia de Engenharia possui algumas caixas de tarolos, gentilmente cedidos por empresas sondadoras, o que permite comparar resultados obtidos com provetes de diferentes litologias: granitos, calcário, xistos, arenitos, siltitos, etc.

Os alunos colocam os provetes em posição de ensaio, com a plataforma na horizontal e vão lenta e cuidadosamente accionando a manivela do macaco, tentando evitar possíveis sacões que façam estremecer o dispositivo e, de algum modo, antecipar o deslizamento do provete superior. Durante a manobra, o operador deve estar bem concentrado pois deve-se interromper o movimento no preciso momento em que o provete inicia o deslizamento. Obtido o ângulo de inclinação α , os alunos calculam o valor do respectivo ângulo de atrito básico.

4. ÂNGULO DE ATRITO EM SOLOS INCOERENTES

4.1 Generalidades

Em taludes constituídos por solos incoerentes secos, o declive i máximo possível (situação de equilíbrio limite) corresponde ao valor do ângulo de atrito interno (ϕ'). Tal é ilustrado pela equação do coeficiente de segurança para taludes infinitos em solos incoerentes que, na condição de secos (e também submersos), é:

$$FS = \frac{\operatorname{tg} \phi'}{\operatorname{tg} i}$$

No âmbito da disciplina de Movimentos de Terrenos e Estabilidade de Taludes é apresentada aos alunos uma célula de acrílico, de concepção muito simples, para a determinação do ângulo de atrito em solos incoerentes. O modelo é uma réplica da conhecida célula de Hele-Shaw [7] tendo-se-lhe acoplado um funil num dos extremos superiores e encostado um transferidor (figura 4).



Figura 4 - Medição da inclinação do talude formado pela areia

4.2 Utilização do dispositivo

Numa das extremidades da célula é lançada areia seca, utilizando o funil para derramar a areia no fundo, de modo uniforme. A areia vai-se acumulando, criando um pequeno talude. O transferidor permite aos alunos acompanhar o contínuo ajuste do declive do talude à medida que este vai crescendo em altura e comprimento. O ângulo de atrito poderá variar dependendo, entre outros aspectos, da granulometria da amostra e do rolamento (ou forma) das partículas.

Mede-se assim a inclinação de taludes formados por diferentes tipos de areias, algumas delas previamente preparadas por peneiração de amostras recolhidas, maioritariamente em praias e dunas próximas.

5. LIQUEFACÇÃO SÍSMICA

5.1 Generalidades

A liquefacção sísmica dos solos e os seus efeitos devastadores são por demais evidentes em relatos e imagens obtidos após sismos como o de Loma Prieta, em 1989, ou o de Kobe, em 1995. Durante um sismo, o solo é solicitado rapidamente, sob condições não drenadas, o que em solos não coesivos saturados implica um aumento do excesso de pressões intersticiais e a consequente diminuição das tensões efectivas originando a liquefacção do solo.

O terreno perde assim a sua resistência e as fundações nele implantadas colapsam, originando a ruína dos edifícios. Estruturas anteriormente enterradas, flutuam.

No Departamento de Engenharia Civil existe uma mesa sísmica educacional (UCIST Shake Table) que tem sido utilizada para trabalhos práticos laboratoriais da disciplina de Dinâmica de Estruturas, tais como a resposta em regime forçado de um oscilador de um grau de liberdade, a identificação das frequências próprias de uma estrutura utilizando a Transformada Finita de Fourier (FFT) e a simulação numérica e experimental da acção sísmica.

Esta mesa é a utilizada para ilustrar o fenómeno da liquefacção devida aos sismos, matéria leccionada na disciplina de Fundamentos de Engenharia Sísmica.

5.2 Experiência

Para esta demonstração, não é necessário nenhum equipamento especial. Executa-se facilmente com materiais correntes [8], a saber:

- caixa de plástico, transparente, adquirida numa loja local;
- um qualquer bloco de madeira ou tijolo para simular o edifício; no caso presente foi utilizada uma casa de pequenos tijolos miniatura, adquirida numa loja de brinquedos;
- bola de ténis de mesa para simular uma conduta enterrada;
- cerca de 8 kg de areia;
- cerca de 1,5 l de água.

A montagem efectuada é a da figura 5a). A caixa é solidarizada à mesa com uns parafusos. Coloca-se a areia na caixa e em seguida junta-se a água, lentamente, junto aos bordos, até chegar ao mesmo nível da areia. Enterra-se a bola de ténis sensivelmente a meia profundidade e a casa é colocada sobre a areia, pressionando ligeiramente para evidenciar as boas condições de

fundação. A partir do computador selecciona-se o tipo, a frequência e a amplitude do sinal de entrada do sismo a induzir e inicia-se o movimento.



Figura 5 – Liquefacção da areia: a) antes do sismo; b) após o sismo

Assiste-se então ao assentamento e rotação da casa e ao aparecimento rápido da conduta à superfície, como indicado na figura 5b). Nota-se o aparecimento da água à superfície acima do nível da areia. A experiência é em seguida efectuada com outras areias de diferentes granulometrias (D_{15}), estudando assim a influência desta dimensão na susceptibilidade à liquefacção.

6. CONCLUSÕES

Constituiu objectivo deste trabalho procurar métodos alternativos de ensino, com novas ideias que possam incutir nos alunos o gosto pela aprendizagem e pela procura de explicações para os fenómenos geotécnicos. Este objectivo insere-se num programa mais vasto de procura de alternativas ao ensino tradicional, incutindo nos alunos os alicerces para uma atitude de aprendizagem ao longo da vida [9].

As experiências apresentadas, enquanto auxiliares preciosos da aprendizagem, foram desenvolvidas com a preocupação de que pudessem ser divertidas, visualmente interessantes, tornando mais fácil aos alunos a memorização de alguns conceitos associados aos fenómenos observados.

As sessões realizadas criaram um ambiente propício à troca de impressões, ao aparecimento de sugestões sobre o funcionamento dos equipamentos e à colocação de dúvidas sobre os conceitos envolvidos, fora do ambiente tradicional de aula “papel e lápis”, numa atitude claramente participativa.

Finalmente, para os próprios docentes é sempre gratificante ver o gosto e o entusiasmo dos alunos pela aprendizagem na área da Geotecnia, sentindo-se assim motivados para incluir nas suas aulas novas experiências pedagógicas e materiais didácticos inovadores.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Sr. José Manuel Gaspar a colaboração prestada no desenvolvimento de alguns equipamentos.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Coduto, Donald P. – Geotechnical Engineering. Principles and Practices, Prentice Hall, 1999.
- [2] Cardoso, Rafaela et al. - Equipamentos para experiências pedagógicas no ensino da Mecânica dos Solos. 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. II, SPG, pp. (2004) 243-254.
- [3] <http://www.uwsp.edu/stuorg/awra/h2omodel.html>
- [4] Bruce I.G.; Kruden D.M. & Eaton T.M. Use of a tilting table to determine the basic friction angle of hard rock samples, Canadian Geotechnical Journal, 26 (1989), 474-479.
- [5] Muralha J., Ensaios de deslizamento de descontinuidades a tensões normais quase nulas, Actas do 4º Cong. Nac. de Geotecnia, 1, SPG (1991), 243-254.
- [6] Stimpson B., A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18 (1981), 63-65
- [7] http://www.seed.slb.com/pt/scictr/lab/index_earth.htm
- [8] Cross, B. Liquefaction Demonstration for the UCIST Shake Table, Southern Illinois University, Edwardsville (<http://ucist.cive.wustl.edu>)
- [9] Santana, Teresa et al - Utilização de Ferramentas Computacionais Orientadas para o Ensino no curso de Engenharia Geológica. 10º Congresso Nacional de Geotecnia, SPG (2006).