

NOVOS EQUIPAMENTOS DIDÁCTICOS NO ENSINO DA MECÂNICA DOS SOLOS

NEW EDUCATIONAL EQUIPMENT FOR TEACHING SOIL MECHANICS

Cardoso, Rafaela, *Instituto Superior Técnico, UTLisboa, Portugal, rafaela@civil.ist.utl.pt*
Gomes, Rui Carrilho, *ESTBarreiro, IPSetúbal, Portugal, rui.gomes@estbarreiro.ips.pt*
Santos, Jaime A., *Instituto Superior Técnico, UTLisboa, Portugal, jaime@civil.ist.utl.pt*
Sena Costa, Víctor, *Instituto Superior Técnico, UTLisboa, Portugal, victor.sena@ist.utl.pt*
Caetano, João Pedro, *Instituto Superior Técnico, UTLisboa, Portugal, joao.caetano@ist.utl.pt*

RESUMO

Este trabalho descreve os novos equipamentos desenvolvidos no Instituto Superior Técnico e na Escola Superior de Tecnologia do Barreiro para reforçar a componente experimental e melhorar a qualidade do ensino da Mecânica dos Solos no âmbito da Engenharia Civil. Os equipamentos desenvolvidos evidenciam de uma forma simples alguns fenómenos e princípios fundamentais da Mecânica dos Solos e pretendem motivar a aprendizagem dos alunos. Este trabalho, que constitui uma evolução do ensino experimental que tem vindo a ser ministrado nas duas instituições, visa fomentar a reflexão e a discussão sobre o ensino da Mecânica dos Solos.

ABSTRACT

This work describes new educational equipment developed at Instituto Superior Técnico and Escola Superior de Tecnologia do Barreiro to increase the quality and the experimental component of teaching Soil Mechanics in Civil Engineering. The equipment illustrates fundamental theoretical concepts and physical phenomena of Soil Mechanics in a simple way, with the intention of motivating students learning. This work represents the evolution of the experimental teaching in both institutions, so as to promote discussion on Soil Mechanics education.

1. INTRODUÇÃO

A Geotecnia integra a formação de base do Engenheiro Civil, sendo as disciplinas desta área de grande importância para o exercício da profissão, independentemente da área de especialização posterior à obtenção do grau.

É cada vez mais uma prioridade no ensino de disciplinas de engenharia que este incorpore uma componente experimental, pois permite estabelecer a ligação entre a teoria e a fenomenologia. Na Mecânica dos Solos esta ligação é desejável pois, para além de permitir estabelecer o primeiro contacto do futuro engenheiro civil com os solos, apoia a compreensão de muitos dos fenómenos e dos problemas objecto de estudo da Geotecnia.

Nos últimos anos, no Instituto Superior Técnico (IST) e na Escola Superior de Tecnologia do Barreiro (ESTB) têm sido desenvolvidos alguns equipamentos com carácter didáctico com o objectivo de reforçar a componente experimental no ensino da Geotecnia ministrado aos alunos de Engenharia Civil [1], [2], [3], [4] e [5].

Os últimos equipamentos desenvolvidos permitem ilustrar fenómenos tais como a consolidação unidimensional, o campo de tensões recorrendo à fotoelasticidade e o escoamento bidimensional em meios porosos. Apresenta-se, seguidamente, uma breve descrição dos objectivos e das funcionalidades de cada um destes equipamentos.

2. NOVOS EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS

2.1 Análise do campo de tensão através da fotoelasticidade

O desenvolvimento da técnica da fotoelasticidade ocorreu no início do século XX com o intuito de prever a distribuição de tensões em corpos sujeitos a acções externas. Esta técnica ainda hoje é utilizada em sectores de tecnologia avançada, como por exemplo na indústria aeronáutica, como complemento de modelos numéricos (modelos de elementos finitos, entre outros).

As principais aplicações das técnicas da fotoelasticidade em engenharia são: (i) em revestimentos fotoelásticos, que correspondem a métodos de extensometria, no sentido em que são aplicados na superfície de uma determinada estrutura; (ii) na construção de modelos fotoelásticos, que permitem estimar as tensões em modelos geralmente realizados em escala reduzida. Neste trabalho apresentam-se apenas exemplos da segunda aplicação.

A técnica da fotoelasticidade baseia-se no facto de o índice de refração da luz variar consoante a orientação dos eixos das cadeias de polycarbonatos. As cadeias de polycarbonatos estão dispostas aleatoriamente, alinhando-se em caso de haver aplicação de tensões. Com a incidência de luz é possível visualizar este alinhamento, uma vez que o índice de refração é maior segundo o eixo das cadeias. A técnica da fotoelasticidade permite obter dois tipos de linhas: (i) as linhas isocromáticas, que são linhas com uma dada cor onde a diferença entre as tensões principais é constante, e (ii) as linhas isoclinais, que são linhas que ocorrem quando as direcções das tensões principais coincidem com os eixos de polarização. Por análise destas linhas é possível ter uma noção da distribuição e da magnitude das tensões induzidas.

Conforme representado na Figura 1, o equipamento é constituído pelos seguintes elementos:

1. Armação rectangular em alumínio.
2. Vidro com polarização plana.
3. Parafusos para aplicação de carga e para apoio das peças em acrílico.
4. Peças em acrílico com formas diversas para ensaio.

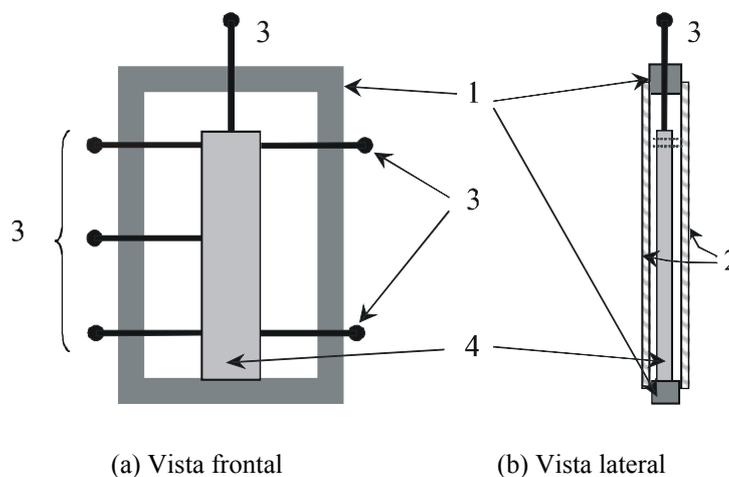


Figura 1 – Esquema do equipamento recorrendo à técnica da fotoelasticidade.

No âmbito da Mecânica dos Solos e das Obras Geotécnicas em geral, o conhecimento da distribuição das tensões nos materiais geotécnicos assume grande relevância. A técnica da fotoelasticidade permite avaliar a influência de diversos factores na distribuição das tensões, tais como a geometria e a intensidade do carregamento, as condições de fronteira e a existência de perturbações geométricas.

Na Figura 2 é possível visualizar a perturbação no campo de tensões de uma abertura circular no centro de uma placa de acrílico comprimida uniformemente numa das faces. Na Figura 3 ilustra-se a simulação, através da força exercida por um parafuso, da carga transmitida por uma sapata ao terreno de fundação.

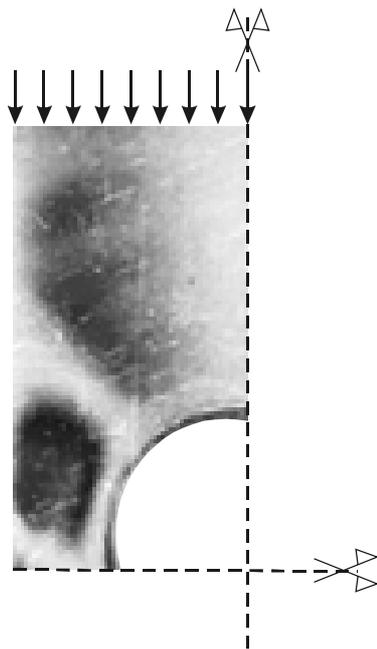


Figura 2 – Distribuição de tensões numa placa comprimida com uma abertura circular.

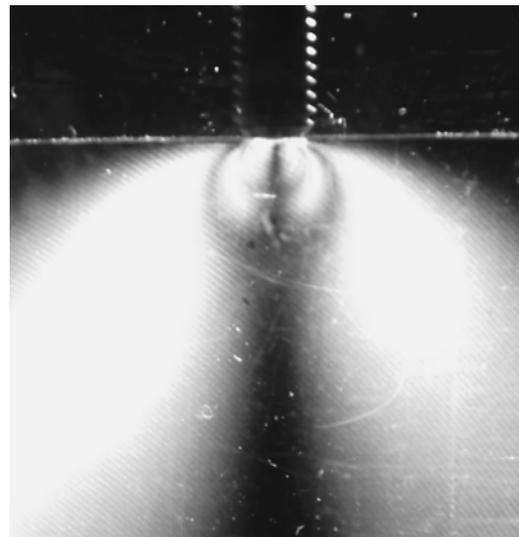


Figura 3 – Carga de compressão numa placa, representando uma fundação superficial.

Por último, refira-se que as dimensões do equipamento permitem a sua colocação sobre o retroprojector, facilitando a exibição do equipamento a uma assistência numerosa.

2.2 Modelo de consolidação primária unidimensional de Terzaghi

O fenómeno da consolidação hidrodinâmica (ou primária) em solos saturados tem origem no aumento de tensão aplicada e conseqüente variação de volume associada à expulsão da água.

Nos casos em que se pode admitir comportamento não drenado na fase de aplicação do carregamento, o acréscimo da tensão total gera de imediato excesso de pressão intersticial de valor idêntico. Este excesso de pressão intersticial dissipa-se ao fim de um determinado tempo, cuja duração depende essencialmente da permeabilidade do solo e das condições de fronteira. No final da consolidação primária, o acréscimo de tensão efectiva é igual ao acréscimo de tensão total.

O modelo de Terzaghi é correntemente utilizado para compreender o fenómeno da consolidação primária em solos saturados. A Figura 4 apresenta o esquema desse modelo para a consolidação unidimensional e considerando o solo confinado lateralmente. Refira-se que este equipamento constitui uma versão melhorada do equipamento desenvolvido no passado e descrito por Cardoso et al. [6]. Ambas as versões cumprem os mesmos objectivos, mas a nova versão facilita a preparação e os procedimentos para realização da experiência.

Este equipamento, cuja fotografia se apresenta na Figura 5a), é constituído pelos seguintes elementos:

- reservatório cilíndrico em *perspex* preenchido com água, com um êmbolo amovível;
- mola de compressão exterior accionada pelo êmbolo;
- piezómetro ligado ao reservatório;
- válvula para controlo do caudal de saída.

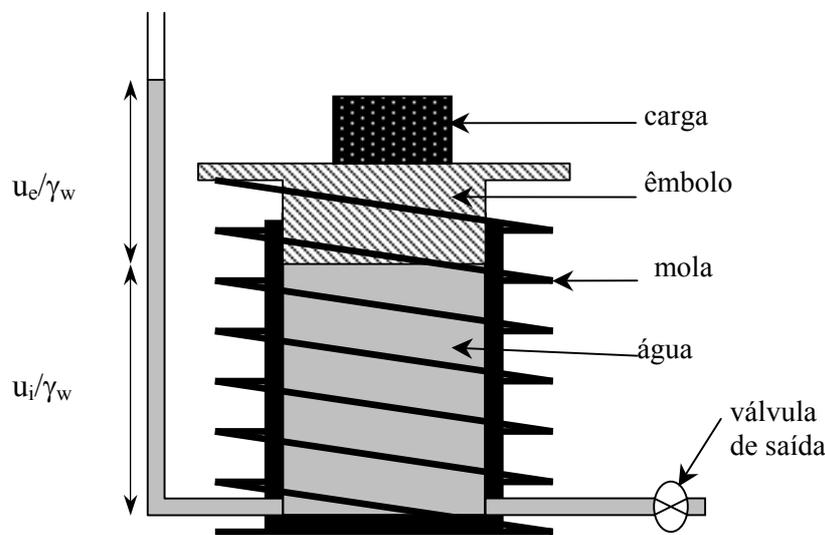


Figura 4 Esquema do modelo de Terzaghi para ilustrar o fenómeno da consolidação primária.

De acordo com as Figuras 4 e 5, antes da aplicação da carga o nível no piezómetro, u_i/γ_w , é igual ao nível da água no interior do reservatório.

Ao colocar a carga sobre o êmbolo com a válvula fechada, ocorre subida do nível de água no piezómetro sem alteração visível do nível do êmbolo (Figura 5 b)). Refira-se que o aumento da pressão pode ser medido através de um manómetro de precisão, tal como na versão anterior, ou através de um piezómetro, como é apresentado agora na nova versão deste equipamento. A variação do nível registada no piezómetro, u_e/γ_w , deve-se portanto ao carregamento aplicado.

Ao abrir a válvula inicia-se o processo de drenagem (saída da água do interior do reservatório), com a conseqüente diminuição da pressão na água, que é registada através da descida do nível de água no piezómetro. A transferência de carga para a mola provoca a descida do êmbolo. O sistema estabiliza quando o nível no piezómetro é igual a u_f/γ_w , permitindo concluir que toda a carga aplicada é suportada pela mola (Figura 5 c)).

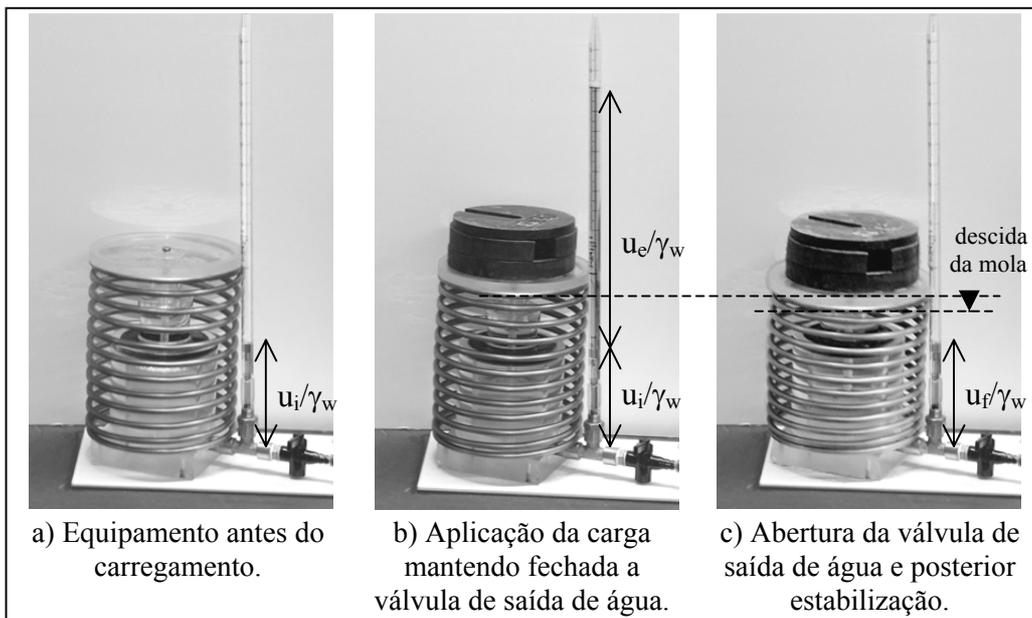


Figura 5 Modelo de Terzaghi - nova versão do equipamento.

2.3 Escoamento bidimensional em meios porosos

A percolação em meios porosos é uma matéria importante da Mecânica dos Solos. A nível experimental, o primeiro contacto do aluno com o escoamento de água no solo ocorre através da realização de um ensaio de permeabilidade (Cardoso et al., 2004 [6]).

Os princípios estudados e conceitos básicos adquiridos durante o estudo do escoamento unidireccional apoiam o estudo posterior de escoamentos bidimensionais. Introduce-se assim a noção de linhas equipotenciais e de linhas de fluxo, que permitem caracterizar o escoamento associado a diversas situações geotécnicas. É proposto ao aluno o traçado manual de redes de escoamento, definidas geralmente para os casos de cortinas de contenção e de barragens de aterro, e procede-se ao cálculo dos caudais percolados e ao estudo da estabilidade hidráulica em ambos os casos.

• Percolação em cortinas de contenção

O equipamento desenvolvido pretende representar uma escavação num meio granular onde os níveis de água a montante e a jusante da cortina se mantêm estáveis, originando um regime de percolação permanente.

O equipamento, cuja representação esquemática se apresenta na Figura 6, consiste numa caixa com uma divisória vertical e com a face exterior em perspex translúcido para que se possa visualizar o solo no seu interior. O solo utilizado é granular (areia média) e a divisória vertical simula uma cortina de contenção. Simulando uma escavação, a altura de solo do lado esquerdo da divisória é superior à do lado direito. O escoamento é imposto fazendo circular água no sentido da escavação (da maior para a menor altura de solo) impondo um gradiente hidráulico, pois a saída de água da caixa está a uma cota inferior à cota de entrada. As linhas de fluxo são visualizadas através da injeção de um corante líquido no solo em vários pontos na entrada do escoamento.

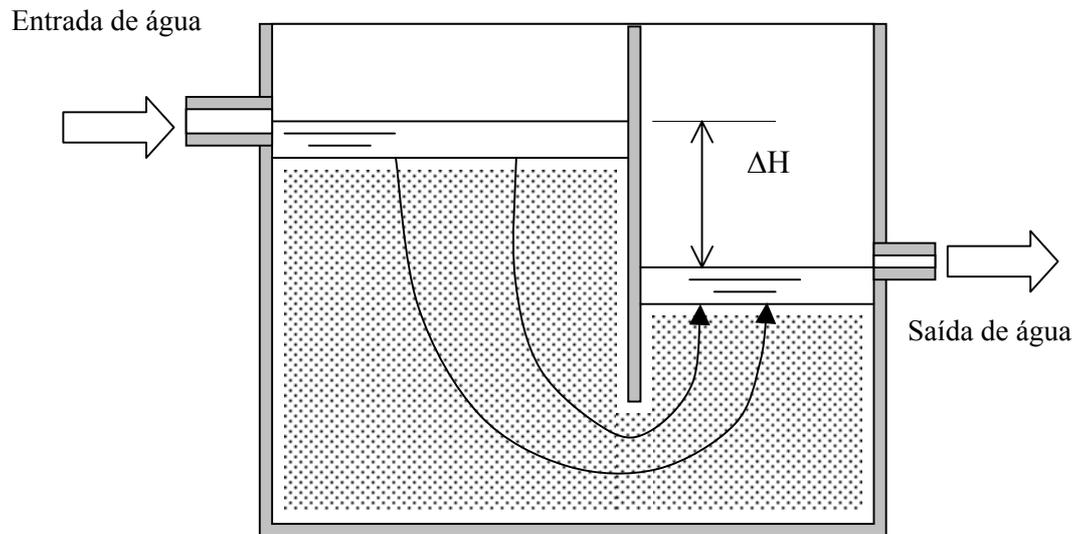


Figura 6 Esquema da cortina de contenção.

O equipamento descrito apresenta-se na Figura 7. Nessa figura é possível visualizar as linhas de fluxo através do corante líquido injectado a montante. Estas linhas propagam-se a velocidades diferentes permitindo, deste modo, a identificação das zonas de maior gradiente hidráulico.

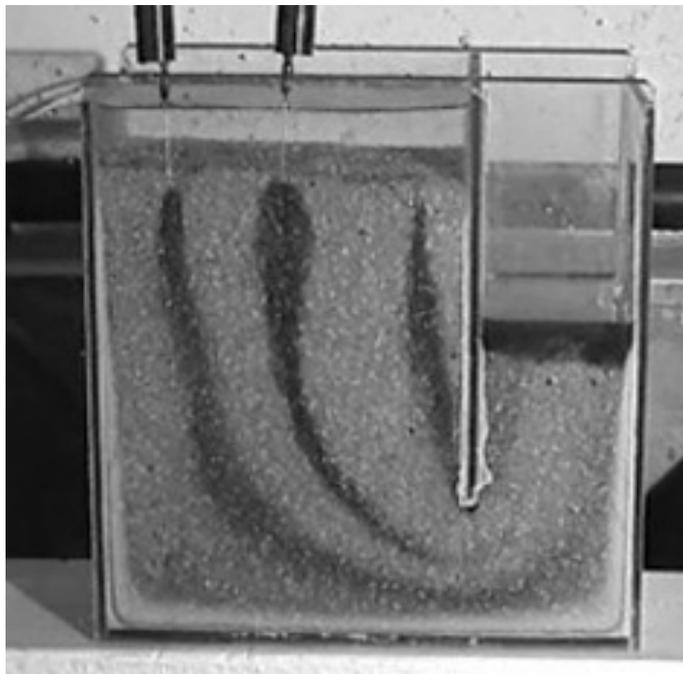
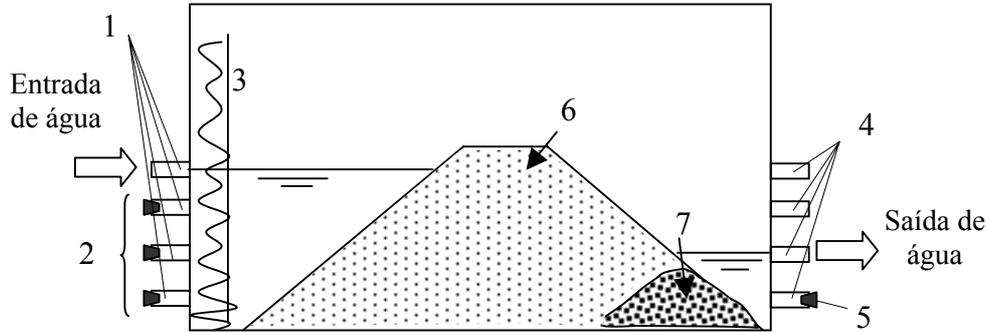


Figura 7 Modelo de escoamento numa cortina de contenção.

- Percolação em barragens de aterro

O equipamento desenvolvido pretende representar uma barragem de aterro homogénea, com um dreno de pé de jusante. O esquema do equipamento pode ser observado na Figura 8. Este consiste numa caixa de *perspex* com a forma paralelepipedica, onde se coloca um solo granular (areia fina a média) no seu interior com a geometria de uma secção transversal de uma barragem. O dreno é constituído por material grosseiro tipo cascalho.



Legenda:

- 1- tubos de entrada de água
- 2- válvulas para controlo do nível de água de montante
- 3- dissipador de energia (rede de plástico)
- 4- tubos de saída de água
- 5- válvulas para controlo do nível de água de jusante
- 6- corpo da barragem (areia fina a média)
- 7- dreno

Figura 8 Esquema da barragem.

O escoamento é imposto fazendo circular água no sentido longitudinal da caixa. Tanto o nível de água a montante como a jusante são ajustáveis através do sistema de válvulas. Foi necessário introduzir um dissipador de energia (rede de plástico) junto à entrada de água para evitar a erosão do paramento de montante.

Tal como efectuado para a cortina de contenção, as linhas de corrente são visualizadas através de corante líquido que é injectado em vários pontos do paramento de montante.

O equipamento descrito apresenta-se na Figura 9. Nesta figura também é possível visualizar as linhas de corrente.

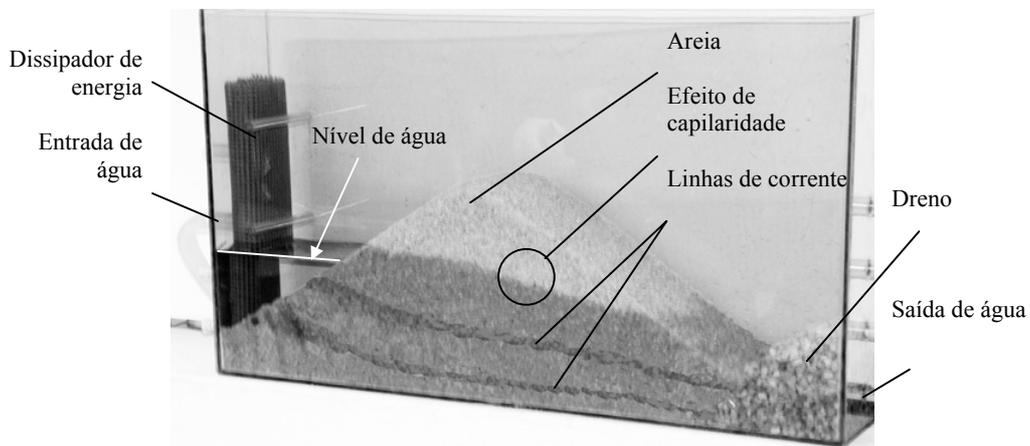


Figura 9 Modelo de escoamento numa barragem.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A boa receptividade dos alunos face aos anteriores equipamentos para experiências pedagógicas desenvolvidos no IST e na ESTB, incentivaram o desenvolvimento de novos equipamentos e o melhoramento dos equipamentos existentes.

Os equipamentos construídos permitiram reforçar a componente experimental do ensino tradicional, tendo em vista a melhoria da qualidade do ensino da Geotecnia nas duas instituições.

Outros equipamentos encontram-se já em fase de concepção, visando a ilustração da superfície de cedência do modelo Cam-Clay e a demonstração do efeito da dilatância em solos densos.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar os seus agradecimentos aos colegas da secção de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico pelas contribuições e críticas manifestadas em várias ocasiões para a concepção e o aperfeiçoamento dos equipamentos para experiências pedagógicas.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Concurso para projectos com vista ao incremento do ensino experimental no DECivil. Proposta do Laboratório de Geotecnia, IST, 2001.
- [2] Concurso para projectos com vista ao incremento do ensino experimental no DECivil. Proposta do Laboratório de Geotecnia, IST, 2002.
- [3] Concurso para projectos de melhoria da qualidade do ensino. Proposta da área científica de Geotecnia, IST, 2003.
- [4] Concurso para projectos de melhoria da qualidade do ensino. Proposta da área científica de Geotecnia, IST, 2004.
- [5] Concurso para projectos de melhoria da qualidade do ensino. Proposta da área científica de Geotecnia, IST, 2005.
- [6] Cardoso, R., Gomes, R.C., Santos, J.A., Sena Costa, V. e Caetano, J.P. Equipamentos para experiências Pedagógicas no Ensino da Mecânica dos Solos. Actas do 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Universidade de Aveiro, 2004, vol. 1, pp. 209-218.