

**81**

**Novembro  
1997**

# **GEOTECNIA**

**Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia**



3	Editorial	Direcção
5	Avaliação de parâmetros geotécnicos pelo DMT em solos portugueses	N. Cruz, A. Viana da Fonseca, J.L. Lemos e P. Coelho
17	A nova centrífugadora portuguesa	J. Portugal, L. Madeira, G. Silva, C. Santos, M. Neves e R. Correia
27	Comparação entre alguns resultados de ensaios de placa e cálculos teóricos	F. Martins e J. Barreiros Martins
35	Ensaio <i>in situ</i> e de carga de uma fundação num solo saprolítico do granito do Porto	V. Fonseca, M. Fernandes e S. Cardoso
51	Resposta sísmica de camadas de solo por meio de uma abordagem estocástica	B. Serra e L. Caldeira
65	Comportamento de três estruturas de contenção tipo Berlim	G. Correia, N. Guerra e A. Pinto

# A NOVA CENTRIFUGADORA PORTUGUESA

## Portuguese new centrifuge facility\*

JOÃO CANDEIAS PORTUGAL\*\*  
LUÍS AGUILAR MADEIRA\*\*  
MANUEL GONÇALVES DA SILVA\*\*\*  
CARLOS ALMEIDA SANTOS\*\*  
EMANUEL MARANHA DAS NEVES\*\*\*  
RUI PEREIRA CORREIA\*\*

RESUMO - O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) dispõe desde 1995 de uma centrífuga geotécnica. A centrífuga, uma Acutronic modelo 661, tem uma capacidade de 40g-ton e um raio de 1,80 m à plataforma giratória. O artigo descreve o desenvolvimento da instalação, incluindo as características gerais do equipamento e sistemas eléctricos, ópticos e mecânicos associados.

SYNOPSIS - A new centrifuge facility has recently been established at the Portuguese National Laboratory for Civil Engineering (LNEC). The centrifuge is an Acutronic model 661 and it has a capacity of 40 g-tonnes. The platform radius is 1.8 m. The paper describes the development of the facility, including general features of the housing, centrifuge test equipment and associated

## 1 - INTRODUÇÃO

No presente artigo é feita a descrição da nova centrífuga portuguesa, recentemente instalada no Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). A concepção da centrífuga inclui algumas características inovadoras, quer ao nível estrutural, quer ao nível dos sistemas ópticos, eléctricos e mecânicos associados. Estas características são apresentadas detalhadamente, descrevendo-se ainda os acessórios essenciais a aplicações geotécnicas.

## 2 - DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

### 2.1 - Generalidades

A centrífuga foi instalada no piso -2 do edifício Ferry Borges no *campus* do LNEC, numa câmara circular com paredes de betão armado, construída por forma a assegurar um funcionamento adequado da máquina e a segurança dos operadores. Esta câmara dispõe de um acesso directo a um laboratório concebido para a preparação de modelos, onde também se encontram os armários de controlo e potência que asseguram, respectivamente, o controlo e a

---

\* Comunicação apresentada ao XIV Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Hamburgo, 1997.

\*\* Laboratório Nacional de Engenharia Civil

\*\*\* Universidade Nova de Lisboa

alimentação eléctrica do sistema. A operação de todo o conjunto é conduzida a partir de uma sala de controlo, especialmente concebida para esse efeito e que se situa ao nível -1 do edifício. Nesta sala encontram-se instalados os sistemas de operação e controlo (mesa e painel de comando), que asseguram o interface utilizador/máquina, bem como o hardware necessário ao armazenamento/transmissão de dados com os modelos físicos em centrifugação. A operação de controlo da máquina pode ser conduzida quer manual, quer automaticamente por computador (IBM, PC compatível).

A centrifugadora apresenta uma estrutura piramidal metálica, rigidamente ligada à laje de soleira da câmara, que suporta um braço giratório e um motor trifásico de accionamento. O braço giratório comporta numa das extremidades uma cesta basculante na qual é introduzida a carga modelo e na outra, um contrapeso ajustável para equilibrar o conjunto. O raio médio de giração é de 1,55 m no centro geométrico da cesta e de 1,80 m na plataforma de montagem. As dimensões máximas da carga embarcável são de  $500 \times 700 \times 500 \text{ mm}^3$ , sendo o seu peso máximo função da aceleração a atingir - 4 kN para acelerações até 100g, decrescendo linearmente até 2 kN para acelerações até 200g (correspondente à velocidade de rotação máxima de 345 rpm).

No topo da estrutura piramidal encontram-se duas juntas rotativas: uma junta rotativa de fluidos e uma junta óleo-hidráulica. A junta de fluidos permite o acesso hidráulico ou pneumático ao modelo embarcado. É fixada à laje de cobertura da câmara por uma estrutura metálica projectada para esse efeito e a sua refrigeração é assegurada por água. A junta óleo-hidráulica encontra-se ligada a uma unidade de alimentação hidráulica, também colocada no piso da cobertura da câmara circular, a qual permite operar o sistema de equilibragem automática do centro de gravidade do braço giratório durante a rotação.

A fim de permitir a comunicação, segura e com um nível de ruído extremamente baixo, entre o sistema de aquisição de dados e o sistema de armazenamento de dados e controlo, localizado na sala de controlo, a máquina dispõe de uma junta rotativa de fibra óptica e de uma junta rotativa eléctrica.

A cesta basculante é dotada de uma câmara de vídeo ligada a um monitor que se encontra na sala de comando. Este equipamento permite um acompanhamento visual do comportamento dos modelos durante a centrifugação.

## 2.2 - Descrição da centrifugadora

Na Fig. 1, encontra-se representada uma vista geral da centrifugadora, podendo observar-se que é basicamente constituída por um pedestal de forma troncocónica (Fig. 1-1), cuja solidarização à laje de soleira é assegurada por 8 parafusos (M30) apertados a 800 Nm. Na parte superior do pedestal existe um cubo (Fig. 1-2) apoiado num rolamento axial de esferas e dois rolamentos radiais de rolos, cujo eixo define o eixo de rotação da máquina. Ao cubo são ligados 2 corpos cilíndricos, através de um sistema de anéis cónicos de aperto axial, o que garante uma fixação de grande rigidez e sem folgas. O veio de accionamento do cubo prolonga-se até à parte inferior do pedestal onde se encontra o sistema de accionamento. Este sistema é constituído por um redutor de engrenagens cónicas de eixos horizontal e vertical com uma relação de transmissão de 1:5 (Fig. 1-3), e um motor eléctrico trifásico de 45 kW com eixo horizontal (Fig. 1-4), ligados entre si por uma união elástica. O veio de saída do redutor é oco a fim de permitir a transmissão de sinais entre a parte giratória da máquina e o equipamento fixo, transmissão que é conseguida à custa de juntas rotativas de vários tipos, cuja descrição é apresentada em 2.3.

Os dois corpos cilíndricos constituem o braço giratório da máquina (Fig. 1-5) que suporta numa das extremidades uma cesta articulada (Fig. 1-6), onde é instalado o modelo, e, na outra, um contrapeso ajustável manualmente para equilibrar o conjunto (Fig. 1-7). No interior dos corpos cilíndricos existem dois êmbolos hidráulicos que fazem parte do sistema de equilibragem automático a descrever em 2.3.2.

A medição de acelerações é feita recorrendo a um acelerómetro instalado no braço giratório a uma distância de 0,80 m do eixo de rotação (Fig. 1-8).

Na parte superior do cubo encontra-se uma estrutura para inserção da unidade de controlo/aquisição de dados (Fig. 1-10) com um volume de  $400 \times 482 \times 560 \text{ mm}^3$ , estrutura que foi integrada no conjunto sob especificações do LNEC. Imediatamente abaixo desta estrutura encontra-se o suporte dos contactos eléctricos e a respectiva junta rotativa eléctrica (Fig. 1-9), assim como a junta rotativa de fibra óptica, constituída por quatro canais uni-direccionais. A junta rotativa eléctrica é constituída por 46 contactos, que suportam uma intensidade de corrente de 1 Ampère à tensão máxima de 150 Volts em DC; 12 contactos para uma intensidade de corrente de 5 Ampère à tensão máxima de 220 Volts em AC ou 300 Volts em DC e ainda 3 canais de vídeo para uma tensão de 10 Volts. Na parte superior existem duas servo-válvulas (Fig. 1-11) e a junta rotativa óleo-hidráulica (Fig. 1-12) que asseguram o fornecimento de óleo ao sistema de equilibragem automático. Por cima desta junta existe uma outra junta rotativa para fluidos que permite aceder, hidráulica ou pneumáticamente, aos modelos durante os ensaios (Fig. 1-13).

## 2.3 - Componentes principais

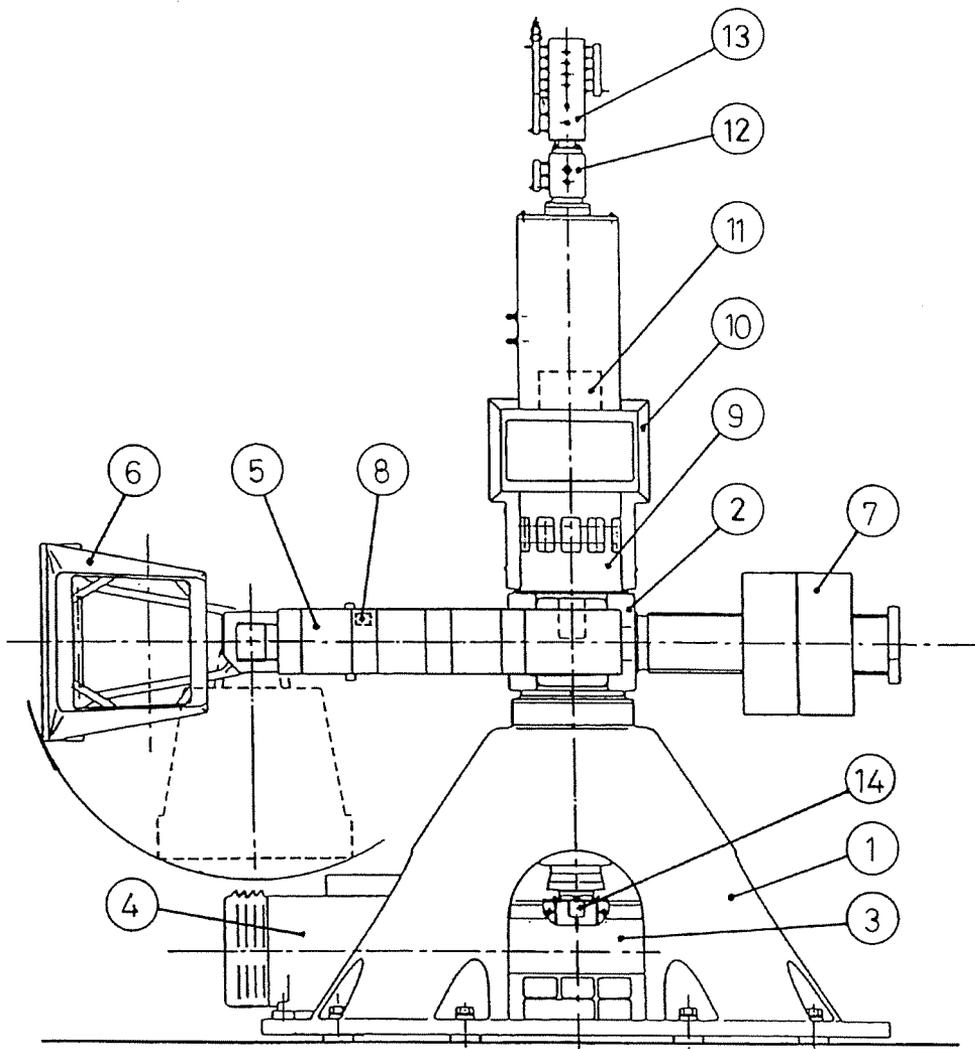
### 2.3.1 - Junta rotativa para fluidos

Esta junta permite aceder hidráulica ou pneumáticamente aos modelos durante os ensaios e é independente da centrífugadora. A junta é constituída por dois contactos rotativos óleo-hidráulicos, cuja pressão máxima de operação é de 20 MPa, e 4 contactos rotativos para ar ou água, que podem trabalhar até pressões máximas da ordem dos 2 MPa. Entre cada contacto rotativo existem canais de arrefecimento a água para evitar o aumento excessivo da temperatura dos vedantes hidráulicos. O sistema de arrefecimento possui ainda uma válvula que controla o caudal de água em função da temperatura. A parte fixa desta junta (quando a mesma não está a ser utilizada) pode girar livremente com a centrífugadora, prolongando-se, assim, a vida útil dos elementos rotativos.

### 2.3.2 - Sistema de equilibragem

Conforme se referiu anteriormente o braço giratório é provido de um contrapeso móvel, cuja posição em relação ao eixo de rotação é ajustada em função da massa a introduzir na cesta basculante. O deslocamento é conseguido à custa de um sistema de engrenagens accionadas manualmente com um jogo de chaves. A distância do contrapeso ao eixo de rotação da máquina deve ser ajustada previamente, com a máquina parada, e é estabelecida de tal forma que o binário introduzido pelo contrapeso seja igual, mas de sinal contrário, ao resultante da massa embarcada.

Para além deste sistema de equilíbrio manual, a centrífugadora do LNEC dispõe de um sistema de equilíbrio automático do braço. Este sistema permite compensar, no decorrer dos



- |                           |   |
|---------------------------|---|
| 1 - Pedestal              | 8 - Acelerómetro                                |
| 2 - Cubo                  | 9 - Suporte dos contactos eléctricos            |
| 3 - Caixa de redução      | 10 - Estrutura da unidade de aquisição de dados |
| 4 - Motor de accionamento | 11 - Servo-válvulas                             |
| 5 - Braço giratório       | 12 - Junta rotativa óleo-hidráulica             |
| 6 - Plataforma basculante | 13 - Junta rotativa para fluidos                |
| 7 - Contrapeso            | 14 - Codificador óptico                         |

Fig. 1 - Esquema mecânico da centrífugadora (alçado)

ensaios, desequilíbrios resultantes de acções sobre o modelo que alterem a posição do seu centro de massa e/ou o valor da massa embarcada (e.g., introdução de água no modelo).

A equilibragem automática é conseguida à custa do movimento de dois pesos móveis, que são na realidade os dois êmbolos alojados no interior dos corpos cilíndricos, como já referido anteriormente. O deslocamento dos êmbolos é assegurado pela unidade óleo-hidráulica, sendo o óleo (com uma pressão de serviço da ordem dos 6 MPa) transmitido da parte fixa para a parte móvel da máquina através da respectiva junta rotativa. O circuito é comandado por duas válvulas direccionais-proporcionais ligadas a 4 sensores de pressão (existentes em cada uma das câmaras dos cilindros hidráulicos) e a 4 pontes de extensómetro. A medição de desequilíbrios é feita pelas pontes de extensómetro, que se encontram coladas a quatro barras do pedestal da centrífugadora. Este sistema é activado a partir do painel de controlo e permite compensar desequilíbrios até 20 kN.

### 2.3.3 - Sistema de televisão em circuito fechado

O sistema de televisão em circuito fechado permite a visualização dos modelos durante os ensaios. É constituído por uma câmara de vídeo (lente e unidade de controlo da câmara), de muito pequenas dimensões e um monitor. A lente está instalada na cesta basculante. A unidade de controlo da câmara foi colocada na estrutura onde também se encontra a unidade de aquisição de dados e o monitor na sala de controlo.

A comunicação entre a unidade de controlo da câmara e o monitor é feita por intermédio de um cabo coaxial, e um dos 3 canais de vídeo de que a máquina dispõe.

### 2.3.4 - Sistemas de segurança

A máquina dispõe de vários sistemas que controlam e preservam a sua segurança. Uma vez detectada uma anomalia de funcionamento é accionado o respectivo alarme no painel de controlo, provocando a paragem automática da máquina se esta se encontrar em rotação ou impedindo o seu arranque enquanto a anomalia se mantiver.

Os sistemas de segurança de que a máquina dispõe são os seguintes:

- Sistema de desequilíbrio - este sistema pode subdividir-se em três subsistemas. O primeiro acciona o alarme - *Unbalance Level 1* - quando é atingido o máximo desequilíbrio permitido (20 kN), não provocando a paragem imediata da máquina. O segundo acciona o alarme - *Unbalance Level 2* - quando o desequilíbrio excede 5 a 10 % do valor máximo permitido (i.e., 21 a 22 kN), provocando a paragem da máquina. O terceiro acciona o alarme - *Unbalance Measurement* - quando é detectado um funcionamento anormal de uma das pontes de extensómetro, provocando a paragem da máquina, se esta se encontrar em rotação ou impedindo o seu arranque se esta se encontrar parada.
- Sistema de velocidade de rotação máxima - este sistema activa o alarme - *Rate Trip* - provocando a paragem da máquina quando a velocidade de rotação imposta pelo operador é superior à permitida. O registo da velocidade de rotação é feito através de um codificador óptico situado na base da centrífugadora (Fig. 1-14).
- Sistema de aceleração excessiva - se a aceleração da máquina exceder 205g ( $\pm 5g$ ), este sistema activa o alarme - *Excessive Acceleration* - e provoca a paragem da máquina. A medição da aceleração é feita por um acelerómetro colocado no braço giratório, como já referido em 2.2.

- Sistema de falta de potência - um funcionamento anormal do armário de potência acciona o alarme - *Power Amplifier* - impedindo o arranque ou provocando a paragem da máquina.
- Sistema de porta fechada - se o portão de acesso à câmara da centrífugadora se encontrar aberto, este sistema impede o arranque da máquina. Quando o portão se encontra fechado é dada essa indicação no painel de controlo - *Door Closed*.
- Sistema de porta trancada - impede o arranque da máquina, se o operador, através do painel de controlo - *Door Latched* - não tiver trancado o portão de acesso à antecâmara da centrífugadora.
- Sistema acústico/luminoso - este sistema visa, não a protecção da máquina propriamente dita, pois o seu funcionamento é independente da mesma, mas sim a protecção das pessoas que circulam nas suas imediações. O sistema será constituído por uma sirena e uma luz intermitente, comandados a partir do painel de comando da sala de controlo. Após o operador dar a ordem de arranque da centrífugadora, a sirena emite um som, indicando que dentro de alguns segundos a máquina irá rodar (este intervalo de tempo é estabelecido por intermédio de um temporizador localizado no armário de controlo). Findo este tempo, a sirena é colocada fora de serviço e, em simultâneo com o arranque do braço giratório, a luz intermitente ligada. A centrífugadora dispõe de uma potência de 2 KVA para alimentar este sistema.

### 2.3.5 - Sistema de aquisição, controlo e armazenamento de dados

Este sistema divide-se em duas unidades: i) unidade de aquisição e; ii) unidade de controlo/armazenamento de dados. A primeira, instalada na centrífugadora (secção 2.2), é constituída por uma unidade de aquisição de dados da marca Hewlett-Packard, Modelo 3852-A, com um MByte de memória RAM (para armazenamento de programas e dados) e um módulo com 24 canais para leitura de sinais DC. A leitura dos sinais é efectuada com uma resolução de 6 dígitos e meio, em escalas que vão desde os 300 mV aos 300 Volts DC. Futuramente, o sistema será dotado de módulos adicionais que lhe permitirão fazer o condicionamento de sinais e saídas analógicas e/ou digitais para controlo de actuadores electromecânicos.

A segunda unidade, instalada na sala de controlo, é constituída por um computador da marca Hewlett-Packard, modelo 382, com monitor policromático, que terá como funções o controlo do sistema de aquisição e o processamento/armazenamento de dados, recolhidos por este último.

A comunicação entre os dois sistemas é feita por intermédio de um sistema óptico, transparente, constituído por dois cabos de fibra óptica e dois conversores (National Instruments, Modelo GPIB-110), que efectuam a conversão GPIB-óptico e vice-versa (um deles instalado na centrífugadora e o outro na sala de comando).

## 3 - ACESSÓRIOS

### 3.1 - Equipamento para construção e monitorização de modelos

A instalação foi dotada de um laboratório de construção de modelos, localizado num recinto contíguo ao da máquina centrífugadora e onde se encontra o conjunto de equipamentos acessórios necessários para a preparação dos modelos.

Para a preparação de modelos físicos estão disponíveis dois contentores de aço inoxidável, um com secção transversal circular e outro com secção transversal rectangular. Os modelos de solos podem ser consolidados recorrendo a um consolidómetro fabricado pela empresa CIEL.

Os solos podem também ser caracterizados *in vivo* através de um dispositivo miniaturizado de CPTU.

A monitorização dos modelos durante a centrifugação é conseguida através de potenciómetros lineares, LVDT's e células de carga. Uma câmara de vídeo, instalada na plataforma basculante, permite a observação simultânea e em tempo real do comportamento dos modelos.

### 3.2 - Actuador para ensaios de penetração e de carga sobre fundações

A aplicação de uma força variável sobre um modelo de uma fundação ou estrutura é conseguida através de um sistema pneumático de carga (Figs. 2 e 3). Pretendia-se que o equipamento permitisse a aplicação de ciclos de carga e de descarga segundo a direcção vertical protótipo (radial no modelo), para assim se poder proceder à conveniente modelação de problemas de capacidade de carga de sapatas e estacas. O dispositivo apresenta dois graus de liberdade. A sua operação é extremamente simples (simplicidade de ajustamento) e é conduzida a partir da sala de controlo (próximo do painel de comando da centrifugadora e do computador do sistema de aquisição de dados).

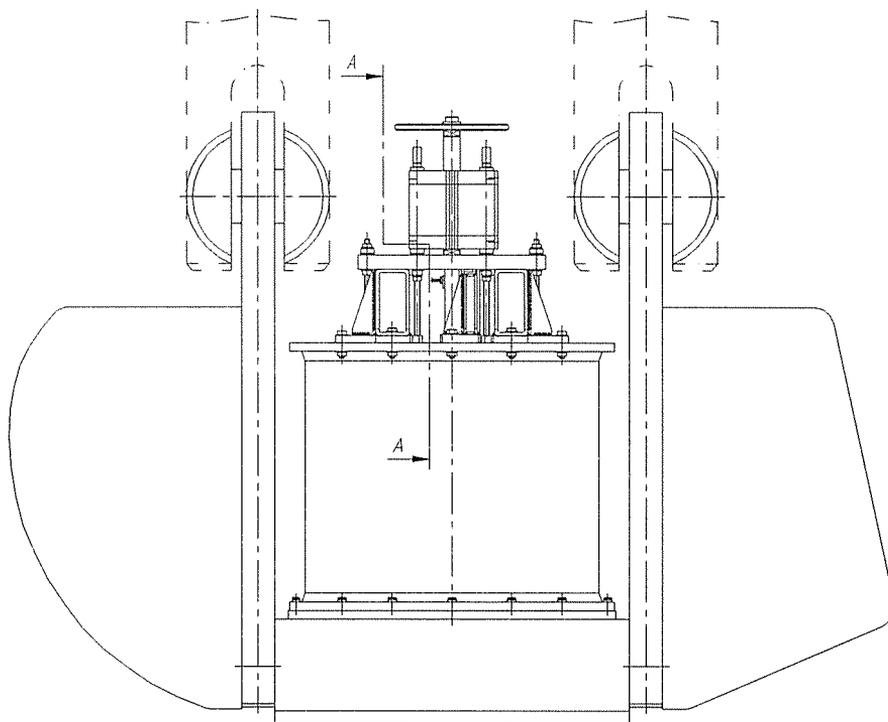
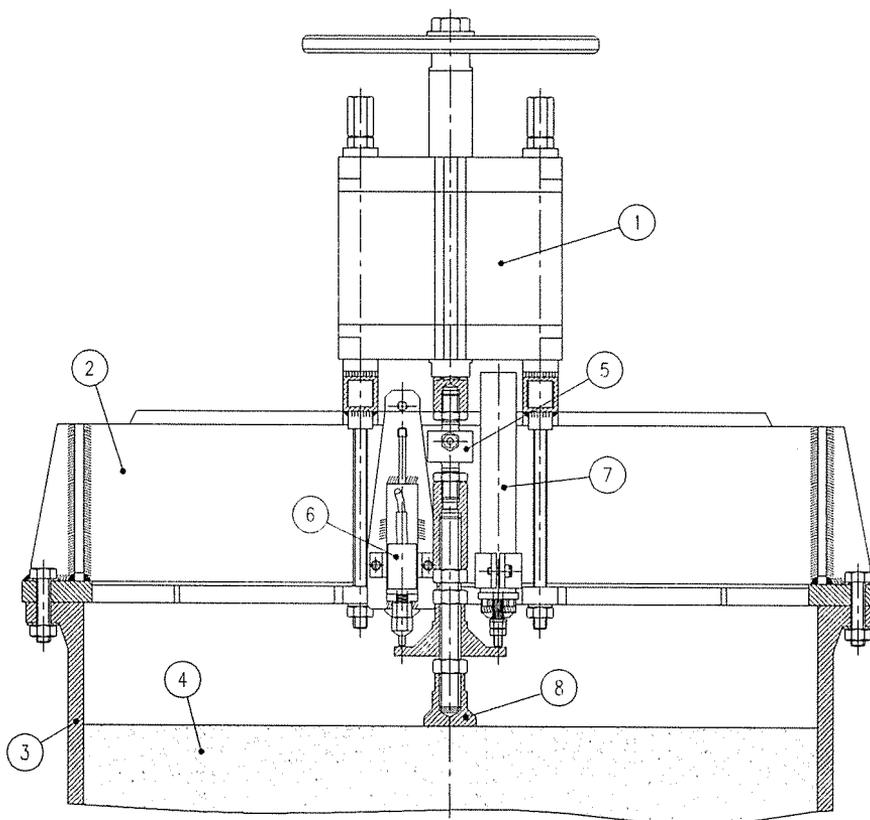


Fig. 2 - Sistema de actuação pneumático instalado na cesta basculante (vista frontal)



- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 1 - Actuador pneumático  | 5 - Transdutor de força  |
| 2 - Viga de apoio        | 6 - Potenciômetro linear |
| 3 - Contentor cilíndrico | 7 - LVDT                 |
| 4 - Modelo               | 8 - Placa de carga       |

Fig. 3 - Esquema de montagem do sistema de actuação pneumático (Fig. 2 - corte A-A)

O sistema de actuação é basicamente constituído por um *actuador pneumático*, controlado por uma válvula reguladora de pressão de precisão. O actuador não é mais do que um cilindro pneumático de haste dupla e duplo efeito, com 50 mm de curso. A haste tem 100 mm de diâmetro. O peso total do cilindro é de cerca de 4 kg, para uma capacidade de carga nominal de 4,5 kN a 0,6 MPa e uma pressão máxima de operação de 1 MPa.

A medição da força aplicada é feita recorrendo a uma célula de carga instalada na extremidade inferior da haste. Todos os componentes são suportados por uma estrutura de reacção dimensionada para ensaios até 100g. A medição dos deslocamentos da placa de carga é conseguida através de um LVDT e de um potenciômetro linear, localizados um de cada lado do eixo de actuação. Estes dois dispositivos são suportados por uma estrutura metálica de referência montada paralelamente à estrutura de reacção.

A configuração descrita é aplicável quando nos ensaios se recorre ao contentor cilíndrico de 420 mm de diâmetro. Uma configuração similar é utilizada no caso de modelos de secção rectangular.

O fornecimento de ar comprimido é assegurado por uma unidade Atlas Copco instalada numa sala contígua ao laboratório de preparação de modelos. Esta unidade alimenta um circuito de ar comprimido da sala de comando, a que está ligado o painel do actuador. A ligação entre o painel de comando e a plataforma basculante é assegurada por um circuito flexível que liga o painel de comando à junta rotativa de fluidos e esta ao cilindro pneumático.

#### 4 – ACTIVIDADES FUTURAS E CONCLUSÕES

Descreveu-se a nova centrífugadora portuguesa, recentemente instalada no Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

A instalação aumenta a capacidade potencial da instituição para a resolução de problemas no âmbito da Geotecnia, mas exige um esforço inicial ao nível de aperfeiçoamento técnico, familiarização com a tecnologia de centrifugação e treino de pessoal. Assim sendo, pelo facto de não existir experiência portuguesa passada relevante no domínio da modelação física com centrífugadora, os primeiros ensaios a realizar serão simples e concentrar-se-ão em problemas devidamente documentados tendo em vista a certificação de procedimentos.

Em termos de simplicidade, uma ligeira excepção é feita no caso dos problemas de geotecnia ambiental, de reconhecida complexidade, uma vez que se perspectiva uma oportunidade de cooperação com outros centros europeus, que aconselhou o LNEC a participar nos moldes seguidamente descritos.

Em síntese os tópicos a estudar são:

- Comportamento de estacas e grupos de estacas carregados lateralmente, fundados em areias secas;
- Efeitos de escala na modelação de problemas de interacção solo-estaca, incluindo a avaliação da importância da rugosidade das superfícies em função dos parâmetros geométricos;
- Transporte de contaminantes no seio de solos - problemas de semelhança na modelação física com centrífugadora;
- Fendilhação de argila e sua influência na contaminação de solos.

O LNEC tem ainda cooperado com o LCPC (Bouguenais) no estudo de efeitos de escala na modelação física com centrífugadora, no âmbito de um projecto de investigação financiado por um programa conjunto Portugal/França.

No que se refere aos problemas ambientais, o LNEC encontra-se associado a 10 instituições europeias que dispõem de máquinas centrífugas no Reino Unido, França, Holanda, Dinamarca, Itália e Alemanha, através de um projecto rede (NECER) recentemente iniciado e financiado ao abrigo do Programa TMR da Comunidade Europeia. A duração do projecto NECER é de 4 anos, procurando-se que no final da década se disponha de experiência acumulada na modelação física do transporte de poluentes em solos, capaz de contribuir para a compreensão de um fenómeno tão grave e tecnicamente tão complexo como se afigura actualmente.

## BIBLIOGRAFIA

- ACUTRONIC FRANCE - *Instruction manual. Centrifuge model 661-1 J 57010*. Acutronic, 1993.
- PORTUGAL, J.C.; MADEIRA, L.A e SANTOS, C.A - *Centrifugadora do Departamento de Geotecnia. Recepção e colocação em serviço*. LNEC, Relatório 290/95 DG/CPCE, 1995.



- 3 *Editorial. Direcção da Revista*
- 5 *Avaliação de parâmetros geotécnicos pelo DMT em solos portugueses.* N. Cruz, A. Viana da Fonseca, J.L. Lemos e P. Coelho
- 17 *A nova centrifugadora portuguesa.* J. Portugal, L. Madeira, G. Silva, C. Santos, M. Neves e R. Correia
- 27 *Comparação entre alguns resultados de ensaios de placa e cálculos teóricos.* F. Martins e J. Barreiros Martins
- 35 *Ensaio in situ e de carga de uma fundação num solo saprolítico do granito do Porto.* V. Fonseca, M. Fernandes e S. Cardoso
- 51 *Resposta sísmica de camadas de solo por meio de uma abordagem estocástica.* B. Serra e L. Caldeira
- 65 *Comportamento de três estruturas de contenção tipo Berlim.* G. Correia, N. Guerra e A. Pinto