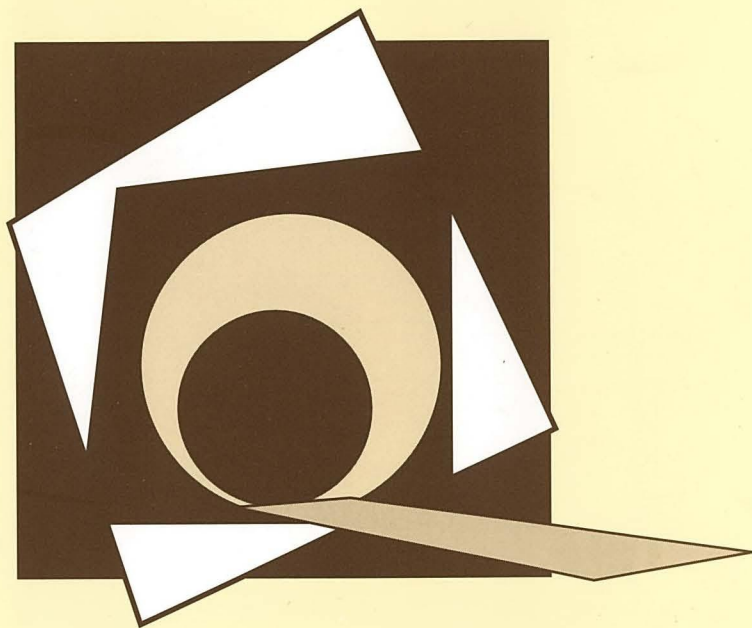


80

# CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA

A GEOTECNIA PORTUGUESA  
E OS DESAFIOS DO FUTURO

VOLUME 2



Lisboa, 15 - 18 de Abril de 2002

**Sociedade Portuguesa de Geotecnia**  
Patrocínio :  
**LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil**

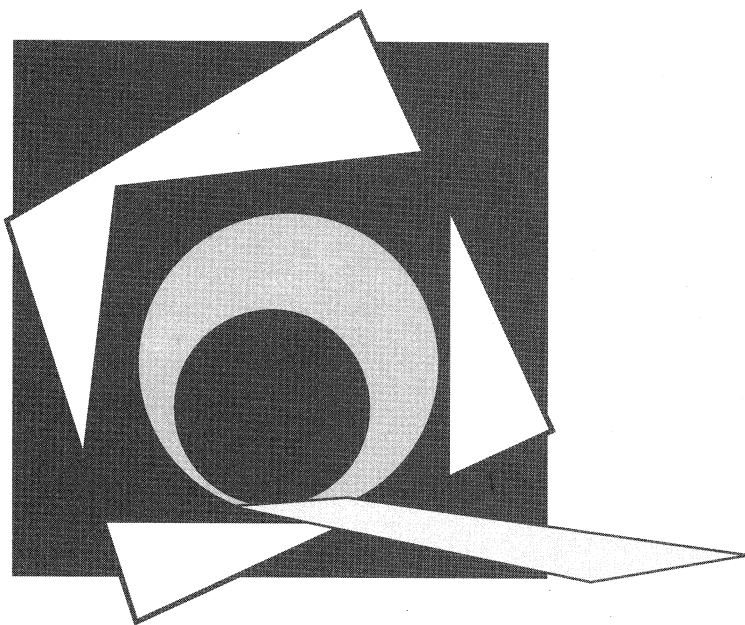




80 CONGRESSO NACIONAL  
DE GEOTECNIA

A GEOTECNIA PORTUGUESA  
E OS DESAFIOS DO FUTURO

VOLUME 2



Lisboa, 15 - 18 de Abril de 2002



## COMISSÃO DE REVISÃO

Ana Paula Varatojo (UNL)  
António Correia Mineiro (UNL)  
António Gomes Coelho (LNEC)  
António Gomes Correia (IST)  
António José Roque (LNEC)  
António Pinelo (LNEC)  
António Pires Carreto (Teixeira Duarte)  
António Silva Cardoso (UP)  
António Veiga Pinto (LNEC)  
António Viana da Fonseca (UP)  
Carlos Dinis da Gama (IST)  
Carlos Santos Pereira (IST)  
Claudino Pinto Cardoso (UA)  
Emanuel Maranhã das Neves (IST)  
Fernando Pardo Santayana (SPG, LNEC)  
Filipe Telmo Jeremias (SPG, LNEC)  
Francisco Salgado (LNEC)  
Isabel Moitinho (UL)  
Jaime Santos (IST)  
João Bilé Serra (LNEC)  
João Castel-Branco (LNEC)  
João Marcelino Silva (LNEC)  
Joaquim Pires Barreto (SPG, Metropolitano de Lisboa)  
Jorge Almeida e Sousa (SPG, UC)  
Jorge Vasquez (COBA)  
José Alves Paula (SPG)  
José Couto Marques (UP)  
José Delgado Rodrigues (LNEC)  
José Mateus de Brito (Cenor, OE)  
José Muralha (LNEC)  
José Rodrigues de Carvalho (UNL)  
José Vieira de Lemos (LNEC)  
Júlio Barreiros Martins (UM)  
Laura Saraiva Caldeira (LNEC)  
Luís Fialho Rodrigues  
Luís Leal Lemos (UC)  
Luís Ribeiro e Sousa (SPG)  
Manuel Matos Fernandes (SPG, UP)  
Maria da Graça Lopes (ISEL)  
Maria de Lurdes Lopes (UP)  
Marília Oliveira (LNEC)  
Mário Quinta Ferreira (UC)  
Noemi Schclar Leitão (LNEC)  
Nuno da Costa Guerra (IST)  
Paulo Lopes Pinto (UC)  
Pedro Sêco e Pinto (LNEC, UC)  
Ricardo Oliveira (COBA, UNL)  
Rui M. Correia (LNEC)  
Teresa Santana (UNL)

## COMISSÃO CIENTÍFICA

*Presidente*

RUI M. CORREIA (LNEC)

António Correia Mineiro (UNL)

António Gomes Coelho (LNEC)

António Gomes Correia (IST)

António Pires Carreto (Teixeira Duarte)

António Silva Cardoso (UP)

Carlos Dinis da Gama (IST)

Emanuel Maranha das Neves (IST)

João Castel-Branco (LNEC)

Joaquim Barreto (SPG, Metropolitano de Lisboa)

Jorge Almeida e Sousa (SPG, UC)

Jorge Vazquez (COBA)

José Alves Paula (SPG)

José Delgado Rodrigues (LNEC)

José Mateus de Brito (Cenor, OE)

José Vieira de Lemos (LNEC)

Júlio Barreiros Martins (UM)

Luís Fialho Rodrigues

Luís Leal Lemos (UC)

Manuel Matos Fernandes (SPG, UP)

Pedro Sêco e Pinto (LNEC, UC)

Ricardo Oliveira (COBA, UNL)

## COMISSÃO ORGANIZADORA

*Presidente*

LUÍS RIBEIRO E SOUSA (SPG)

*Secretário-Geral*

FILIPPE TELMO JEREMIAS (SPG, LNEC)

António José Roque (LNEC)

Claudino Pinho Cardoso (UA)

Fernando Pardo Santayana Carrillo (SPG, LNEC)

João Marcelino Silva (LNEC)

Laura Saraiva Caldeira (LNEC, UNL)

Maria Teresa Fonseca (LNEC)

Noemi Schclar Leitão (LNEC)

Nuno da Costa Guerra (IST)

Paulo Lopes Pinto (UC)

Influência da composição química e mineralógica no comportamento do saprólito granítico da Guarda .....	321
<i>Rodrigues, Carlos Manuel Gonçalves; Sousa, Luís Manuel Oliveira</i>	
Análise comparativa de resultados de ensaios de campo e laboratório numa argila porosa brasileira .....	331
<i>Maria B. Mota, Neusa; P. Cunha, Renato; S. Cortopassi, Renato</i>	
A utilização de correlações na caracterização geotécnica de depósitos de solos orgânicos .....	343
<i>Coelho, Paulo Alexandre Lopes de Figueiredo; Lemos, Luís Joaquim Leal</i>	
Bender elements: técnicas laboratoriais excelentes para avaliação de parâmetros geotécnicos referenciais .....	353
<i>Viana da Fonseca, António; Ferreira, Cristiana</i>	
Estabilização e caracterização geotécnica de aterros heterogéneos .....	367
<i>Roxo, Jorge M. C.</i>	
Desenvolvimento de um aparelho Inderbitzen modificado para caracterização da erodibilidade de solos .....	381
<i>Campos Maciel Júnior, Orlando; Gomes Marques, Eduardo Antonio; Carvalho e Silva, Cláudio Henrique; Minette, Enivaldo; Lima, Dario Cardoso</i>	
Índice de compressão de argilas amolgadas saturadas em função dos limites de consistência ...	391
<i>Cavicchia, Luiz Roberto</i>	
Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais tropicais e subtropicais .....	401
<i>Bastos, Cezar Augusto; Gehling, Wai; Milititsky, Jarbas</i>	
Compactação de areias .....	411
<i>Santos Menezes, Rogério</i>	
Avaliação do grau de erodibilidade do solo através do ensaio Inderbitzen modificado .....	419
<i>Freire, Ériclis Pimenta; Galvão, Lucimar</i>	
Novo sistema edométrico do LNEC .....	427
<i>Benta, Agostinho; Emílio, F. T.; Caldeira, Laura</i>	
Ensaio de absorção e permeabilidade em agregados .....	439
<i>Castro Gomes, J. P.; Pereira-Oliveira, L. A.; Gonilho-Pereira, C. N.; Pacheco-Torgal, F.</i>	
O uso de lógica difusa na previsão da compressibilidade de enrocamentos .....	449
<i>Dias Pinto, Wendell; Saboya Jr., Fernando</i>	
Método expedito para determinação das características de corte de rochas e de deslizamento de diaclases .....	461
<i>Dinis da Gama, Carlos; Caranhola Pereira, Hugo; Reis e Sousa, Manuel</i>	
Alteração e alterabilidade das rochas / Implicações em obras de engenharia .....	471
<i>Ladeira, F. L.; Ferreira, P. A.</i>	
Lucubrações em torno de uma insuficiência do modelo de Patton .....	483
<i>Leal Gomes, Manuel J. A.</i>	
Comportamento de um agregado granítico no domínio das pequenas deformações .....	495
<i>Gomes Correia, António; Marques, Filipe</i>	
Anisotropia de propagação das ondas sísmicas em granitos .....	507
<i>Sousa, Luís Manuel Oliveira; Calleja, Lope; Suárez Del Río, Luis Miguel; Rodriguez Rey, Angel</i>	
Emissão acústica em granitos solicitados por incrementos de temperatura .....	517
<i>Sousa, Luís Manuel Oliveira; Ruiz de Argandoña, Vicente G.; Suárez Del Río, Luis Miguel</i>	
Absorção de água e permeabilidade ao oxigénio do granito da Covilhã .....	527
<i>Castro-Gomes, J. P.; Rodrigues-Carvalho, J. A.; Pissarra Cavaleiro, V. M.</i>	

## VOLUME 2

## TEMA 2

### *Estruturas de Suporte, Fundações e Escavações*

Análise comparativa do dimensionamento de estruturas de contenção pelos critérios de cálculo tradicionais e pelos do Eurocódigo 7 no que se refere aos estados limites últimos .....	539
<i>Silva, J. Matos e</i>	
Sistema de contenção periférica da estação de Telheiras do Metropolitano de Lisboa .....	549
<i>Baião, Carlos J. Oliveira; Brito, José A. Mateus; Veloso, José R. Sousa; Rosa, Sérgio P. Parada; Conceição, Miguel F. Menezes</i>	
Duplicação da linha de Sintra entre Cacém e Meleças. Muro M9A: ensaios e blocagens de ancoragens .....	567
<i>Rodrigues de Carvalho, Mariana A.</i>	
Contenção provisória do aterro ferroviário para execução do viaduto do Jamor .....	579
<i>Xavier, Baldomiro; Portela Santos, Alexandre; Esteves, Laura</i>	
Escorregamento de terras na encosta entre a Av. Elísio de Moura e a Rua António Jardim em Coimbra .....	589
<i>Leal Lemos, Luís Joaquim</i>	
Caracterização preliminar do deslizamento da Avenida Elísio de Moura, Coimbra .....	601
<i>Quinta Ferreira, Mário; Leal Lemos, Luís Joaquim; Feiteira Dias, José Luís</i>	
Mecanismo de rotura na escarpa entre Cacilhas e Arealva (Almada) .....	613
<i>Lamas, P. Calé; Rodrigues-Carvalho, J. A.</i>	
Investigação de uma encosta urbana instável em Santa Maria (RS) – Brasil .....	623
<i>Soares, José Mario Doleys; Pinheiro, Rinaldo J. B.; Bica, Adriano V. D.; Bressani, Luiz A.</i>	
Aspectos geológicos-geomorfológicos dos movimentos de massa na encosta da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil .....	633
<i>Pinheiro, Rinaldo J.B.; Bica, Adriano V.D.; Bressani, Luiz A.</i>	
Importância da caracterização geotécnica e da observação na gestão do risco em obras de contenção .....	643
<i>Pinto, Alexandre; Lopes, Pedro; Costa, Rita; Ferreira, Sandra</i>	
Soluções de contenção por cortinas de estacas intercaladas com colunas de jet grouting .....	653
<i>Amaral, Ana Raquel; Pinto, Alexandre; Ferreira, Sandra</i>	
Acerca da definição dos parâmetros resistentes do terreno na análise da estabilidade de um talude .....	663
<i>Flor, António Tavares; Santos Pereira, Carlos</i>	
Recomendações para a realização de ensaios de ancoragens em solos e rochas .....	671
<i>Sousa, Arlindo M. G.</i>	
Acerca da utilização dos coeficientes de reacção no dimensionamento de estruturas de contenção flexíveis .....	685
<i>Carvalho, José Augusto; Gomes Correia, António; Antão, Armando</i>	
Análise comparativa do dimensionamento de fundações pelos critérios de cálculo tradicionais e pelos do Eurocódigo 7 no que se refere aos estados limites últimos .....	699
<i>Silva, J. Matos e</i>	



Um caso recente e raro em que a tecnologia de injeções tornou viável o desempenho de estacas de fundação .....	709
<i>Baracho Dias, Helder; M. Correia, Vítor Hugo; Galrito, Manuel</i>	
Confirmação da importância da avaliação do factor de segurança local .....	719
<i>Rodrigues de Carvalho, Mariana; Salgado, Francisco M.</i>	
Comportamento de estacas apiloadas, instrumentadas, implantadas em solo colapsível .....	739
<i>Ferreira, Cláudio Vidrih; Lobo, Ademar da Silva; Carvalho, David; Albuquerque, Paulo José Rocha</i>	
Comportamento de estacas pré-moldadas, instrumentadas em profundidade, em solo não saturado .....	749
<i>Albuquerque, Paulo José Rocha; Carvalho, David; Ferreira, Cláudio Vidrih; Lobo, Ademar da Silva</i>	
Acompanhamento de recalques de pilares de edifícios durante a construção .....	759
<i>Lobo, Ademar da Silva; Ferreira, Cláudio Vidrih; Rodrigues, Marcelo Ricardo Bertoni</i>	
Metodologias de simulação de drenos verticais em análises planas .....	769
<i>Venda Oliveira, Paulo J.; Leal Lemos, Luís J.</i>	
Comportamento de estacas pré-moldadas submetidas a esforços de tracção em solo arenoso colapsível .....	781
<i>Maia Menezes, Stélio; de Carvalho, David</i>	
Cravação de estacas escavadas de base alargada para melhoria da capacidade de carga em solo colapsível .....	787
<i>Cintra, José Carlos; Benvenuti, Márcio; Menegotto, Mauro Leandro; Aoki, Nelson</i>	
Segurança e confiabilidade de fundações profundas .....	797
<i>Aoki, Nelson; Cintra, José Carlos; Menegotto, Mauro Leandro</i>	
Determinação de carga última de estacas por regressão linear múltipla usando SPT .....	807
<i>Vorcaro, Maria do Carmo; Velloso, Dirceu de Alencar</i>	
A utilização do modelo de Kim-Lade na modelação de um ensaio em escala natural de uma sapata .....	817
<i>Coelho e Silva; Margarida; Almeida e Sousa, Jorge; Viana da Fonseca, António</i>	
Relatos de obras em estacas escavadas com bulbos, bloco-sapata e armação protegida com tela nylon .....	831
<i>Galindo Marques, Abel; Figueiredo Marques, Juliane Andréia</i>	
Comparação de recalques calculados e observados para um prédio em Santos .....	841
<i>Gonçalves, Heloisa Helena Silva; Oliveira, Nilene Janini de</i>	
Evolução dos recalques por adensamento secundário em alguns edifícios da cidade de Santos .....	853
<i>Gonçalves, Heloisa H.S.; Cardozo, Denise la Scala</i>	
Um modelo numérico para avaliação das incertezas da capacidade de carga estática de estacas .....	863
<i>Adeildo S. Ramos Júnior; Luciana C. L. M: Vieira; Viviane C. L. Ramos</i>	
Modelação de solos granulares com elementos discretos .....	873
<i>Couto Marques, José; Ribas, José; Martins, Francisco; Barreiros Martins, Júlio; Petrini, Nikica</i>	
Modelação geometricamente não linear da rotura de fundações superficiais .....	885
<i>Couto Marques, José; Teixeira, Ricardo</i>	
Successful application of vacuum consolidation method <sup>TM</sup> to Nakdong river soft clay in Kimhae, South Korea .....	895
<i>Liasu, Philippe; Masse, Frederic</i>	
Uma proposta para determinação automática de aproximações às cargas limites últimas de uma estrutura geotécnica .....	907
<i>Antão, Armando</i>	

Variante de fundações de um viaduto. Interação solo-estrutura na modelação dos elementos estruturais .....	919
<i>Xavier, Baldomiro; Portela Santos, Alexandre</i>	
Um caso de obra: um sistema de drenagem para alívio de pressões na laje do subsolo de um edifício .....	929
<i>Murrieta, Pedro; Feitosa, José Henrique</i>	
A modelação física com centrifugadora. Um problema modelo .....	937
<i>Portugal, João Candeias</i>	
Comportamento de grupos de estacas solidarizadas por encabeçamento rígido .....	947
<i>Varatojo, P.</i>	
Modelação numérica de maciços semi-indefinidos .....	959
<i>Couto Marques, José; Costa, Pedro; Monteiro, André</i>	
Estrutura de contenção tipo Berlim com perfis exteriores: avaliação preliminar do comportamento por via numérica .....	969
<i>Guerra, Nuno M. da Costa; Matos Fernandes, M.; Gomes Correia, A.; Silva Cardoso, A.</i>	
Um estudo paramétrico sobre o dimensionamento de cortinas autoportantes utilizando métodos de equilíbrio limite .....	979
<i>Vieira, Castorina Silva; Matos Fernandes, Manuel</i>	
Fluência volumétrica e desviadora de solos argilosos .....	991
<i>Carrilho Leão Ramos, Viviane; Soares Ramos Júnior, Adeildo; Rezende Lopes, Francisco</i>	
Modelação física e numérica de cortinas flexíveis .....	1001
<i>Pinto, Paulo Lopes; Grazina, José Carlos</i>	

# A MODELAÇÃO FÍSICA COM CENTRIFUGADORA UM PROBLEMA MODELO

## *PHYSICAL MODELING WITH CENTRIFUGE A MODEL PROBLEM*

PORTUGAL, JOÃO CANDEIAS \*

### RESUMO

Compara-se o mérito relativo da modelação física convencional e da modelação física com centrifugadora através de um problema modelo - a determinação experimental da capacidade resistente de uma sapata fundada sobre areia seca. Apresenta-se o tratamento detalhado dos requisitos de semelhança a respeitar pelos modelos físicos de sapatas, explicitando a leis de modelação relevantes para o problema em estudo. Analisam-se as consequências da adopção de cada uma das técnicas de modelação alternativas, quer em termos de condições de semelhança, quer em termos de resultados experimentais obtidos. Da comparação das duas técnicas resulta um balanço francamente favorável à modelação física com centrifugadora.

### ABSTRACT

A critical analysis of conventional and physical modeling with centrifuge is provided using a model problem - the experimental determination of the bearing capacity of shallow foundations lying over dry sand. Dimensional analysis is used to establish the relevant similarity conditions for the problem, in the modeling laws form. An emphasis is made on the consequences of adopting each one of the available experimental techniques; both in terms of similarity conditions and experimental results, witch demonstrate the benefits of the physical modeling with centrifuge.

(\*) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, portugal@lnec.pt

## 1. PROBLEMA MODELO - CAPACIDADE RESISTENTE DE UMA SAPATA

Considere-se uma sapata circular de diâmetro  $D$ , fundada numa superfície de areia seca, submetida a um carregamento uniforme  $q$  por unidade de área (Figura 1). Como se sabe ao ser carregada verticalmente a sapata sofrerá um assentamento  $\delta$ , como se ilustra na Figura 2.

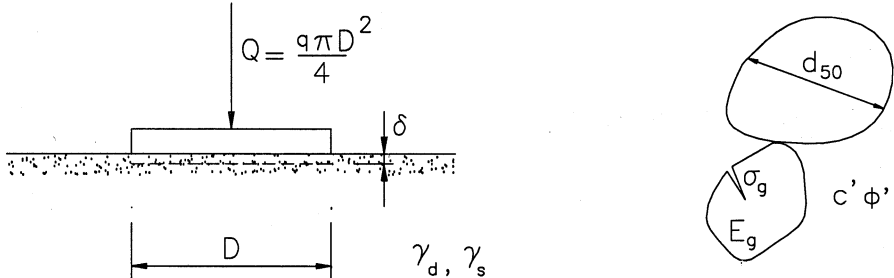


Figura 1 - Sapata carregada verticalmente fundada em areia (Adaptado de [1])

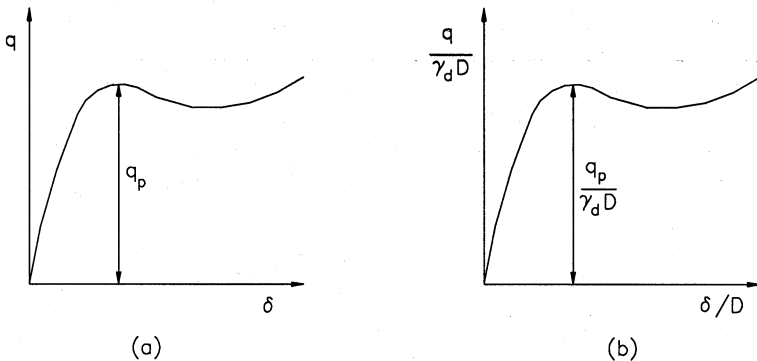


Figura 2 - Curva pressão-deslocamento da sapata: (a) dimensional; (b) adimensional (Adaptado de [1])

Considere-se então o seguinte problema de modelação física: como conceber um modelo por forma a determinar experimentalmente a capacidade resistente, expressa em termos do valor de pico ( $q_p$ ) da curva pressão-deslocamento (Figura 2), de uma sapata protótipo nas condições da Figura 1. Como se ilustra na Figura 1 existem oito quantidades (variáveis) independentes que podem influenciar a forma da curva pressão-deslocamento e que são:

$D$  - o diâmetro da sapata [L],

$\gamma_d$  - o peso volúmico (seco) da areia [ $FL^{-3}$ ],

$\gamma_s$  - o peso volúmico das partículas sólidas [ $FL^{-3}$ ],

$\phi'$  - o ângulo de atrito entre as partículas sólidas [-],

$c'$  - a coesão efectiva entre as partículas sólidas [ $FL^{-2}$ ],

$d_{50}$  - a dimensão média das partículas sólidas [L],

$\sigma_g$  - a resistência à compressão do material constituinte das partículas sólidas [ $FL^{-2}$ ],

$E_g$  - o módulo de elasticidade do material constituinte das partículas sólidas [ $FL^{-2}$ ].

Estas variáveis contêm duas dimensões fundamentais: força e comprimento, isto é, o número de dimensões fundamentais intervenientes no problema é 2. Assim, recorrendo ao teorema de Buckingham pode-se afirmar que se a quantidade  $q_p$  for uma função dimensionalmente homogênea nas 8 variáveis anteriores, essa função pode ser expressa através de um operador adimensional equivalente entre 6 ( $6 = 8 - 2$ ) produtos adimensionais das variáveis.

Escolham-se então duas das variáveis do problema para representar as dimensões fundamentais em jogo, sejam elas, por exemplo,  $D$  (comprimento) e  $\gamma_d$  (força). O conjunto dos 6 produtos adimensionais, por ser completo, permite determinar qualquer produto adimensional entre as variáveis do problema, ou seja, em particular, qualquer das variáveis iniciais do problema pode ser obtida por:

$$G_i = \pi_i D^{\alpha_i} \gamma_d^{\beta_i} \quad \text{com, } i = 1, 2, \dots, 6. \quad (1)$$

Particularizando para o caso vertente tem-se:

$$\gamma_s = \pi_1 D^{\alpha_1} \gamma_d^{\beta_1} \quad (2)$$

$$\phi' = \pi_2 D^{\alpha_2} \gamma_d^{\beta_2} \quad (3)$$

$$c' = \pi_3 D^{\alpha_3} \gamma_d^{\beta_3} \quad (4)$$

$$d_{50} = \pi_4 D^{\alpha_4} \gamma_d^{\beta_4} \quad (5)$$

$$\sigma_g = \pi_5 D^{\alpha_5} \gamma_d^{\beta_5} \quad (6)$$

$$E_g = \pi_6 D^{\alpha_6} \gamma_d^{\beta_6} \quad (7)$$

Sendo os  $\pi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) produtos adimensionais, a condição de igualdade das dimensões dos primeiro e segundo membros de cada uma das equações anteriores traduz-se em:

$$\begin{aligned} [FL^{-3}] &= [L^{\alpha_1}] [F^{\beta_1} L^{-3\beta_1}] & [1] &= [L^{\alpha_2}] [F^{\beta_2} L^{-3\beta_2}] & [FL^{-2}] &= [L^{\alpha_3}] [F^{\beta_3} L^{-3\beta_3}] \\ [L] &= [L^{\alpha_4}] [F^{\beta_4} L^{-3\beta_4}] & [FL^{-2}] &= [L^{\alpha_5}] [F^{\beta_5} L^{-3\beta_5}] & [FL^{-2}] &= [L^{\alpha_6}] [F^{\beta_6} L^{-3\beta_6}] \end{aligned}$$

ou seja (resolvendo o conjunto de 6 sistemas de equações lineares) tem-se:

$$\alpha_1 = 0; \quad \beta_1 = 1 \quad \alpha_2 = 0; \quad \beta_2 = 0 \quad \alpha_3 = 1; \quad \beta_3 = 1$$

$$\alpha_4 = 1; \quad \beta_4 = 0 \quad \alpha_5 = 1; \quad \beta_5 = 1 \quad \alpha_6 = 1; \quad \beta_6 = 1$$

Substituindo os valores de  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  assim obtidos nas equações iniciais vem:

$$\pi_1 = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \quad (8)$$

$$\pi_2 = \phi' \quad (9)$$

$$\pi_3 = \frac{c'}{D\gamma_d} \quad (10)$$

$$\pi_4 = \frac{d_{50}}{D} \quad (11)$$

$$\pi_5 = \frac{\sigma_g}{D\gamma_d} \quad (12)$$

$$\pi_6 = \frac{E_g}{D\gamma_d} \quad (13)$$

Procedendo de forma idêntica à anterior para a variável dependente do problema ( $q_p$ ) tem-se:  $q_p = \pi D^\alpha \gamma_d^\beta$ , vindo,

$$\pi = \frac{q_p}{D\gamma_d} \quad (14)$$

Tendo admitido que a quantidade  $q_p$  é uma função dimensionalmente homogênea desconhecida nas variáveis  $D, \gamma_d, \gamma_s, \phi', c', d_{50}, \sigma_g$  e  $E_g$ :

$$q_p = f(D, \gamma_d, \gamma_s, \phi', c', d_{50}, \sigma_g, E_g) \quad (15)$$

obteve-se uma relação equivalente de forma adimensional entre 6 produtos adimensionais,  $\pi = \Phi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_6)$ , cuja forma explícita é (substituindo os  $\pi$  e  $\pi_i$  pelos seus valores):

$$\frac{q_p}{D\gamma_d} = \Phi\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d}, \phi', \frac{c'}{D\gamma_d}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{\sigma_g}{D\gamma_d}, \frac{E_g}{D\gamma_d}\right) \quad (16)$$

Para que haja semelhança completa, isto é, para que os valores de  $\Phi$  (16) sejam os mesmos no modelo e no protótipo, o modelo tem que ser concebido por forma a que os seis produtos adimensionais independentes tenham os mesmos valores no modelo e no protótipo, ou seja:

$$\pi_{i_m} = \pi_{i_p} \quad (17)$$

com  $i = 1, 2, \dots, 6$ , referindo-se o índice  $m$  ao modelo e o índice  $p$  ao protótipo. As seis condições resultantes da expressão (17) constituem as leis de semelhança para o caso vertente, sendo a sua forma explícita:

$$\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d}\right)_m = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d}\right)_p \quad (18)$$

$$\phi'_m = \phi'_p \quad (19)$$

$$\left(\frac{c'}{D\gamma_d}\right)_m = \left(\frac{c'}{D\gamma_d}\right)_p \quad (20)$$

$$\left(\frac{d_{50}}{D}\right)_m = \left(\frac{d_{50}}{D}\right)_p \quad (21)$$

$$\left(\frac{\sigma_g}{D\gamma_d}\right)_m = \left(\frac{\sigma_g}{D\gamma_d}\right)_p \quad (22)$$

$$\left(\frac{E_g}{D\gamma_d}\right)_m = \left(\frac{E_g}{D\gamma_d}\right)_p \quad (23)$$

Rescrevam-se as leis de semelhança (18) a (23) em termos de relações das mesmas grandezas no modelo e protótipo:

$$\frac{\gamma_{s_m}}{\gamma_{s_p}} = \frac{\gamma_{d_m}}{\gamma_{d_p}} \quad (24)$$

$$\frac{\phi'_m}{\phi'_p} = 1 \quad (25)$$

$$\frac{c'_m}{c'_p} = \frac{D_m \gamma_{d_m}}{D_p \gamma_{d_p}} \quad (26)$$

$$\frac{d_{50_m}}{d_{50_p}} = \frac{D_m}{D_p} \quad (27)$$

$$\frac{\sigma_{g_m}}{\sigma_{g_p}} = \frac{D_m \gamma_{d_m}}{D_p \gamma_{d_p}} \quad (28)$$

$$\frac{E_{g_m}}{E_{g_p}} = \frac{D_m \gamma_{d_m}}{D_p \gamma_{d_p}} \quad (29)$$

e introduza-se a notação,  $G^* = \frac{G_m}{G_p}$ , em que,

$G^*$  - é designado de factor de escala da grandeza  $G$ ,

$G_m$  - é o valor da grandeza  $G$  no modelo,

$G_p$  - é o valor da grandeza  $G$  no protótipo.

Obtém-se:

$$\gamma_s^* = \gamma_d^* \quad (30)$$

$$\phi^* = 1 \quad (31)$$

$$c^* = D^* \gamma_d^* \quad (32)$$

$$d_{50}^* = D^* \quad (33)$$

$$\sigma_g^* = D^* \gamma_d^* \quad (34)$$

$$E_g^* = D^* \gamma_d^* \quad (35)$$

Estas relações, que resultam apenas de um rearranjo da forma explícita das leis de semelhança (18 a 23), são designadas por *leis de modelação*, por traduzirem as relações que têm que existir entre os factores de escala intervenientes no problema para que haja semelhança entre modelo e protótipo.

## 2. MODELAÇÃO FÍSICA CONVENCIONAL DO PROBLEMA MODELO

Considere-se então que se pretende estudar o problema em análise recorrendo a um modelo reduzido convencional à escala 1:N, que respeite as condições de semelhança (18) a (23), isto é, em semelhança completa com o protótipo. Sendo o modelo reduzido, o factor de escala de comprimentos é  $l^* = 1/N$ , pelo que,  $D^* = 1/N$ . Da quarta lei de modelação (33) conclui-se que uma das condições a respeitar é:  $d_{50}^* = 1/N$ , ou seja, a dimensão média das partículas sólidas do material areia do modelo terá que ser  $N$  vezes menor ( $d_{50_m} = d_{50_p}/N$ ) que a correspondente no protótipo. Repare-se que decorre imediatamente desta afirmação a necessidade de introduzir um material de substituição da areia protótipo. Por outro lado, atendendo à segunda lei de

modelação (31), esse material substituto teria que ter o mesmo ângulo de atrito ( $\phi'$ ) que a areia protótipo. A selecção de um material substituto que respeite estas duas condições revela-se, desde logo, difícil na prática. Tal selecção teria inevitavelmente que se basear num processo de tentativas, envolvendo um programa de ensaios laboratoriais dos materiais candidatos a réplicas da areia protótipo. Evidentemente que o material substituto deveria ainda apresentar outras características especiais, que decorrem das restantes quatro leis de modelação, por exemplo, a relação entre a coesão das partículas sólidas do modelo e do protótipo deveria ser igual à relação entre módulos de elasticidade dos grãos (modelo/protótipo). Atendendo às dificuldades de ordem prática que se levantam para a selecção de um material que respeite as condições (31) e (33), facilmente se compreende que a extensão às restantes quatro condições a respeitar compromete a exequibilidade desta via, isto é, a possibilidade de encontrar um material substituto completamente semelhante ao do protótipo.

Não sendo exequível a selecção de um material substituto vejamos quais as consequências de se recorrer ao material do protótipo para construir o modelo. Ter-se-á,

$$\gamma_d^* = \frac{\gamma_{d_m}}{\gamma_{d_p}} = 1 \quad (36)$$

$$\gamma_s^* = \frac{\gamma_{s_m}}{\gamma_{s_p}} = 1 \quad (37)$$

$$\phi'^* = \frac{\phi'_m}{\phi'_p} = 1 \quad (38)$$

$$c'^* = \frac{c'_m}{c'_p} = 1 \quad (39)$$

$$d_{50}^* = \frac{d_{50_m}}{d_{50_p}} = 1 \quad (40)$$

$$\sigma_g^* = \frac{\sigma_{g_m}}{\sigma_{g_p}} = 1 \quad (41)$$

$$E_g^* = \frac{E_{g_m}}{E_{g_p}} = 1 \quad (42)$$

com,  $D^* = 1/N$ . Substituindo valores nas expressões (30) a (35) obtém-se:

$$\gamma_s^* = \gamma_d^* = 1 \quad (43)$$

$$\phi'^* = 1 \quad (44)$$

$$c'^* = 1 \neq D^* \gamma_d^* = \frac{1}{N} \quad (45)$$

$$d_{50}^* = 1 \neq D^* = \frac{1}{N} \quad (46)$$

$$\sigma_g^* = 1 \neq D^* \gamma_d^* = \frac{1}{N} \quad (47)$$



$$E_g^* = 1 \neq D^* \gamma_d^* = \frac{1}{N} \quad (48)$$

Neste caso o modelo afasta-se da condição de semelhança completa com o protótipo, uma vez que quatro das seis leis de modelação não são respeitadas (45 a 48).

Para investigar os efeitos deste “afastamento” em relação à condição de semelhança completa é necessário adoptar um procedimento que ponha em evidência eventuais alterações de comportamento, em função da escala geométrica de redução. Assim, dada a areia protótipo, procedem-se a vários ensaios em modelo reduzido variando o diâmetro  $D_m$  da sapata, isto é, a escala geométrica de redução ( $N$ ) do protótipo:

$$D_{m_1} = \frac{D_p}{N_1}$$

$$\vdots$$

$$D_{m_n} = \frac{D_p}{N_n}$$

pelo que, qualquer dos  $n$  ensaios da série pretende ser uma representação do mesmo protótipo.

Este tipo de ensaios, designados genericamente por modelação de modelos, tem sido realizado por diversos autores. Alguns dos resultados foram compilados e apresentados por De Beer [2] através do diagrama que se reproduz na Figura 3.

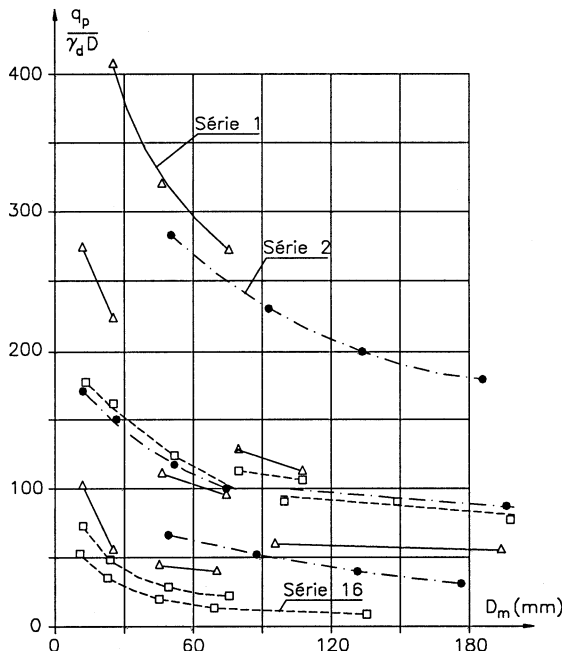


Figura 3 - Resultados de ensaios de sapatas em modelo convencional (Adaptado de [2])

Os valores adimensionais da tensão de pico ( $q_p$ ) são apresentados em função do diâmetro ( $D_m$ ) das sapatas modelo utilizadas nas diferentes séries de ensaios, correspondendo a cada série um

determinado tipo de areia. O diagrama da figura demonstra claramente que os resultados dos ensaios estão sujeitos a um efeito de escala - quanto mais pequeno o diâmetro da sapata modelo, maior o valor da tensão adimensional de pico. Este efeito de escala dificulta extraordinariamente a extrapolação dos resultados dos ensaios para os correspondentes protótipos.

Tendo por base os resultados apresentados na Figura 3 pode pois concluir-se que o desrespeito pela condição de semelhança completa, nomeadamente no que se refere às leis de modelação (32 a 35), introduz um efeito de escala de magnitude considerável em modelos convencionais de sapatas circulares fundadas em areia seca.

### 3. MODELAÇÃO FÍSICA COM CENTRIFUGADORA DO PROBLEMA MODELO

Considere-se agora que o modelo reduzido à escala 1:N, construído com material arenoso idêntico ao do protótipo, é sujeito a um campo artificial de aceleração de magnitude  $Ng$ , em que  $g$  é a aceleração da gravidade. Como se sabe este campo gravitacional artificial é conseguido submetendo o modelo a um movimento de rotação em torno de um eixo fixo (centrifugação).

Sendo o material do modelo o mesmo do protótipo as relações (38) a (42) mantêm-se válidas. O campo gravítico artificial introduz no entanto uma alteração nas relações (36) e (37). Efectivamente, estando o modelo sujeito a uma aceleração  $N$  vezes superior à da gravidade os pesos volúmicos dos materiais que o constituem são:

$$\gamma_{d_m} = N\gamma_{d_p} \quad (49)$$

$$\gamma_{s_m} = N\gamma_{s_p} \quad (50)$$

pelo que,

$$\gamma_d^* = \gamma_s^* = N \quad (51)$$

Vejamos então se, recorrendo a esta técnica de realização de ensaios, as leis de modelação são satisfeitas. Substituindo valores nas expressões (30) a (35) obtém-se:

$$\gamma_s^* = \gamma_d^* = N \quad (52)$$

$$\phi^* = 1 \quad (53)$$

$$c^* = D^* \gamma_d^* = \frac{1}{N} \times N = 1 \quad (54)$$

$$d_{50}^* = 1 \neq D^* = \frac{1}{N} \quad (55)$$

$$\sigma_g^* = D^* \gamma_d^* = 1 \quad (56)$$

$$E_g^* = D^* \gamma_d^* = 1 \quad (57)$$

Ou seja, neste tipo de ensaio, todas as leis de semelhança são satisfeitas, à excepção (mais uma vez) da lei (33) - expressão (55). O modelo afasta-se portanto da condição de semelhança completa, havendo a necessidade de proceder a uma investigação aos correspondentes efeitos de escala, idêntica à referida anteriormente. Este estudo é mais uma vez conduzido recorrendo a séries de ensaios sobre modelos representando o mesmo protótipo a diferentes escalas. No caso vertente a variação do factor de escala de comprimentos ( $l^*=1/N$ ) é acompanhada por uma variação inversa do factor de escala de acelerações ( $g^*=N$ ), pelo que, para além da alteração do

diâmetro da sapata modelo ( $D_m$ ), os ensaios são realizados sobre campos gravitacionais diferentes. Se for  $1/N_i$  o factor de escala de comprimentos do modelo  $i$  da série a ensaiar, o ensaio será conduzido sob um campo gravítico artificial de magnitude  $N_i$  vezes superior à aceleração da gravidade.

Procedendo desta forma Ovesen [1] obteve o diagrama experimental constante da Figura 4, em que, tal como no caso da Figura 3, os valores adimensionais da tensão de pico são apresentados em função dos diâmetros das sapatas modelo, utilizadas para representar o mesmo protótipo a diferentes escalas. Na Figura 4 encontram-se também representados (em fundo) os resultados constantes da Figura 3.

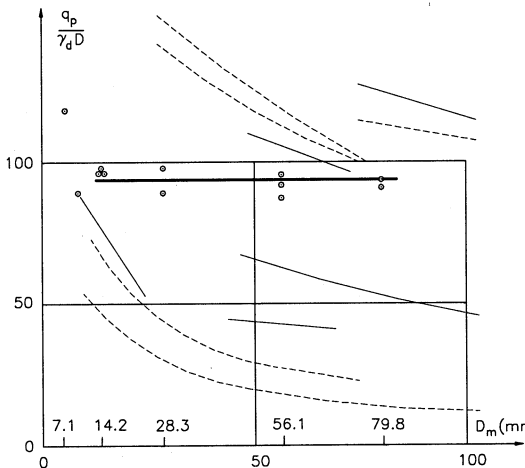


Figura 4 - Resultados de ensaios de sapatas em modelo centrífugo (Adaptado de [1])

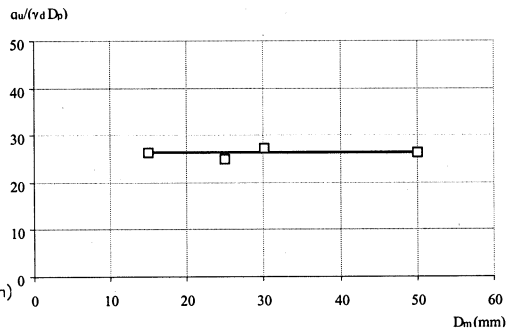


Figura 5 - Resultados de ensaios de modelação de modelos -  $D_p = 1,5$  m [3]

Da análise do diagrama da Figura 4 pode-se concluir que para a gama de dimensões estudadas (diâmetros das sapatas modelo entre 14,2 mm e 79,8 mm) não se observam efeitos de escala. A esta gama de dimensões corresponde uma variação da relação entre o diâmetro da sapata modelo ( $D_m$ ) e a dimensão média dos grãos ( $d_{50}$ ) da areia utilizada de 30 a 180. Ou seja, quando o parâmetro adimensional  $\pi_4$  ( $d_{50}/D$ ) se situa entre  $1/180$  e  $1/30$  não se detectam efeitos de escala significativos, pelo que os resultados em modelo podem ser extrapolados para o protótipo, apesar da condição de semelhança completa não se verificar. Os resultados obtidos nesta série de ensaios permitiram identificar um ligeiro efeito de escala para relações  $D/d_{50}$  da ordem de 15 (Fig. 4 -  $D_m = 7,1$ mm). Neste ensaio a sapata modelo era suportada por menos de 200 grãos pelo que o aparecimento dum efeito de escala se afigura bastante lógico.

Na Figura 5 ilustra-se um conjunto de resultados de ensaios do tipo modelação de modelos realizado em Portugal, com a centrífugadora do LNEC [3]. Para tanto recorreu-se a maciços de areia de Fontainebleau, e a um conjunto de 4 sapatas modelo circulares com diâmetros de 15, 25, 30 e 50 mm que foram ensaiadas a acelerações de 100, 60, 50 e 30g, respectivamente, a todas correspondendo uma sapata protótipo com 1,5 m de diâmetro. Na Figura 5 apresentam-se os resultados dessa bateria de ensaios na forma adimensional descrita anteriormente. Os valores

adimensionais da tensão vertical resistente são representados em função dos diâmetros das sapatas modelo utilizadas para simular o mesmo protótipo ( $D_p = 1,5m$ ) a diferentes escalas.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A complexidade do comportamento reológico dos solos levou desde sempre, e muito naturalmente, os engenheiros geotécnicos a fazer apelo a ensaios em modelo reduzido para o estabelecimento de regras de dimensionamento. Esta atitude encontra-se bem ilustrada em matérias como as da capacidade resistente de fundações superficiais e profundas ou da estabilidade de estruturas de suporte. No entanto, a maior parte destes ensaios foi realizada em laboratório sob gravidade normal, o que se traduz pela violação de condições de semelhança fundamentais, perdendo-se a garantia de que a *essência* do fenómeno observado em modelo reduzido é idêntica à do protótipo. Assim, a validade da transposição de resultados para obras reais foi muitas vezes posta em causa, nomeadamente sempre que em paralelo aos estudos em modelo se dispunha de resultados de ensaios em verdadeira grandeza.

Actualmente, o advento de técnicas de ensaio que permitem assegurar o respeito pelas condições de semelhança reológica, nomeadamente o desenvolvimento da tecnologia de centrifugação de modelos, deve permitir dissipar o sentimento de suspeição reinante na comunidade geotécnica em torno da modelação física a escala reduzida, dando à abordagem experimental um lugar idêntico àquele que ocupa nas outras áreas da Engenharia.

Nesse sentido, o Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil adquiriu uma máquina centrifugadora, especialmente concebida para modelação física em geotecnia. Neste artigo ilustrou-se a aplicação da tecnologia de centrifugação por comparação com a modelação física tradicional. Privilegiou-se o tratamento detalhado dos requisitos de semelhança, explicitando as leis de modelação relevantes do problema em estudo e analisando o mérito relativo das duas técnicas experimentais disponíveis. Dessa comparação resulta um balanço francamente favorável à modelação física com centrifugadora.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Ovesen, N. (1979). Discussion. Design parameters in geotechnical engineering. Proceedings of the 7<sup>th</sup> ECSMFE, Vol. 4, ISSMFE, Brighton, pp. 318-323.
- [2] De Beer, E. (1965). Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand. Proceedings of the Symposium on Bearing Capacity and Settlements of Foundations, Duke University, pp. 15-33.
- [3] Portugal, J. C. (1999). Modelação Física com Centrifugadora. Dissertação apresentada à Universidade Técnica de Lisboa (IST) para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.



