

PRESSIÓMETROS DE MÉNARD E AUTOPERFURADOR DE CAMBRIDGE: CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS MECÂNICOS EM SOLOS ARENOSOS MIOCÉNICOS DE LISBOA

MÉNARD AND CAMBRIDGE SELFBORING PRESSUREMETERS: CORRELATIONS BETWEEN MECHANICAL PARAMETERS IN MIOCENE SANDY SOILS

Ludovico Marques, Marco António; *Instituto Politécnico de Setúbal - Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Barreiro, Portugal, marco.marques@estbarreiro.ips.pt*
Sousa Coutinho, António G. F.; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, coutinho@lnec.pt*

RESUMO

No presente artigo apresenta-se um estudo de caracterização mecânica de areias miocénicas de Lisboa, efectuado a partir de ensaios pressiométricos. Foram realizados ensaios em terrenos no domínio dos solos rijos e das rochas brandas, no âmbito dos trabalhos de ampliação da rede do Metropolitano de Lisboa. Este estudo foi elaborado a partir de ensaios executados com um pressiómetro de Ménard e um pressiómetro autoperfurador de Cambridge. Procedeu-se ao cálculo do coeficiente de impulso em repouso a partir dos resultados experimentais, tendo-se obtido leis de crescimento em profundidade de parâmetros de deformabilidade. Estabeleceram-se correlações entre valores de pressão limite obtidos pelos pressiómetros Ménard e valores de ângulo de atrito determinados através do pressiómetro autoperfurador CSBP.

ABSTRACT

This paper presents a mechanical characterization of Miocene sands of the Lisbon subsoil, carried out by pressuremeter tests. These tests were performed with a Ménard pressuremeter and a Cambridge selfboring pressuremeter in sandy materials classified as hard soils and soft rocks in the scope of the enlargement of Lisbon underground network.

The coefficient of earth pressure at rest was computed, as well as the law of the increase with depth of the stiffness parameters. In the end, a correlation between the Ménard limit pressure and the CSBP angle of shearing resistance was established.

1 - INTRODUÇÃO

O estudo que se apresenta resulta dos trabalhos realizados, no âmbito das obras de execução de:

- túneis do Nó do Grilo, IC 17 - Olival de Basto/Sacavém da via de Cintura Regional Interna de Lisboa (CRIL);
- linhas do Metropolitano da Baixa de Lisboa;
- linha D do Metropolitano - Nó da Alameda D. Afonso Henriques;

No conjunto das três obras foram realizados sessenta e dois ensaios bem sucedidos com o pressiómetro autoperfurador de Cambridge (CSBP) e oitenta e dois ensaios efectuados com o pressiómetro Ménard (MPM) nas últimas duas obras, abrangendo quatro unidades litoestratigráficas ("Argilas e Calcários dos Prazeres", "Areolas da Estefânia", "Argilas do Forno do Tijolo" e "Areias da Quinta do Bacalhau").

No presente artigo referem-se apenas os resultados dos ensaios realizados na unidade das "Areolas da Estefânia".

Apresentam-se valores de coeficientes de impulso em repouso K_0 e estabelece-se uma relação entre os módulos de distorção G_1 do CSBP e os módulos de deformabilidade Ménard, E_M . Também se definiram relações entre as pressões limite Ménard, P_{LM} e os ângulos de atrito ϕ' obtidos pelo pressiómetro autoperfurador CSBP. Estas relações são bastante úteis na prática porque os ensaios efectuados com o pressiómetro Ménard são menos dispendiosos e mais fáceis de executar do que os ensaios realizados com o pressiómetro CSBP.

Contribui-se com este artigo para um melhor conhecimento sobre as características mecânicas da unidade litoestratigráfica das "Areolas da Estefânia".

2 - ENSAIOS REALIZADOS

2.1 - Linhas da Baixa de Lisboa

Os terrenos ensaiados, conforme referência em Ludovico Marques (1997) e Sousa Coutinho e Ludovico Marques (1997) foram os seguintes:

M¹₁₁ – Areolas da Estefânia

Apresentam-se constituídos fundamentalmente por areias finas silto-argilosas com intercalações argilosas, margosas, de blocos, lenticulas e bancadas de calcarenitos. Ocorrem ainda bancadas de calcários margosos fossilíferos que exibem graus de fracturação F₄₋₅ e F₅, segundo ISRM (1978, 1981). Esta unidade apresenta uma possança da ordem dos vinte a trinta metros. Os ensaios SPT revelaram valores de N geralmente compreendidos entre as trinta e as sessenta pancadas, registando-se uma predominância destes últimos valores e até penetrações que não excedem a dezena de centímetros, na segunda fase, para valores de N da ordem das duas e três dezenas. A partir dos ensaios efectuados para determinação dos limites de liquidez e de plasticidade, obtiveram-se valores de índice de plasticidade entre o NP e os 10%. Os tarolos recolhidos permitiram a determinação de R.Q.D. segundo Deere (1967), geralmente em bancadas de calcarenitos, verificando-se valores entre os 10% (intercalações margosas) e os 75% (calcários margosos fossilíferos).

2.2 - Linha D do Metropolitano de Lisboa: Nó da Estação da Alameda

Os terrenos objecto dos ensaios, conforme consta em Ludovico Marques (1997) e Sousa Coutinho e Ludovico Marques (1997) são os que se descrevem:

M¹₁₁ – Areolas da Estefânia

Areias finas silto-argilosas amareladas e acinzentadas, com intercalações argilosas, margosas, de blocos e lenticulas de calcarenitos. Ocorrem ainda bancadas de calcarenitos que exibem graus de alteração W₄₋₅ e de fracturação F₄₋₅, segundo ISRM (1978, 1981). Esta unidade apresenta uma possança da ordem dos 20m e estratos com pendor para leste. Os ensaios SPT revelaram valores de N, compreendidos entre as dez e as trinta pancadas, geralmente da ordem das sessenta pancadas em níveis com blocos de calcarenitos e em bancadas de calcarenitos. Os valores do parâmetro percentagem de recuperação, obtidos a partir das sondagens da Teixeira Duarte, oscilam, predominantemente, entre as oito dezenas e as dez dezenas, havendo, no entanto, troços em que é nula.

2.3 - Resenha sobre os ensaios realizados com os pressiómetros Ménard e CSBP

2.3.1 - Configuração dos equipamentos adoptados face às condicionantes impostas pelos terrenos ensaiados

Em Novembro de 1995, pela primeira vez em Portugal, na CRIL, foi utilizado um modelo digital do CSBP (Mark IXd) com seis braços extensométricos e capacidade para aplicar pressões até 10MPa (Sousa Coutinho, 1996). Inicialmente supôs-se que a configuração normal de perfuração e de ensaio seria indicada, ou seja membrana insuflável de adiprene, protegida por lanterna chinesa e desagregador de espátula cortante. Contudo, desde o primeiro ensaio, verificou-se que os terrenos ensaiados, solos rijos e rochas brandas, se coadunavam mais à configuração de membrana robusta de borracha e desagregador de 73mm, ou mesmo 82,5mm para areias compactas ou cimentadas. Sempre que a célula pressiométrica encontrava blocos de calcarenito, estes dificultavam sobremaneira ou mesmo impediam, de um modo geral, a autoperfuração até à profundidade de ensaio. Não havendo sondagens prévias perto dos locais de ensaio, que permitissem detectar os níveis de calcarenitos, adoptou-se o procedimento de realizar dois furos, ambos por perfuração destrutiva e sem extracção de amostras: o primeiro para o MPM e o segundo para o CSBP.

O modelo do MPM utilizado fabricado pela firma APAGEO, com aquisição e registo automático de dados, é do tipo GA/GC e permite aplicar uma pressão máxima de 10MPa às paredes do furo em que for introduzido. A célula pressiométrica de 60mm foi utilizada inicialmente com membrana de tiras metálicas (designada por lanterna chinesa). Em virtude da ocorrência de roturas nas membranas, tornou-se necessário mudar para a célula de 44mm de diâmetro com protecção de um tubo ranhurado em aço de elevada resistência e rigidez. Trata-se de um tubo adequado para permitir a cravação da célula pressiométrica em formações muito rijas ou com blocos de calcarenitos. A perfuração para os ensaios com o MPM foi executada com um *rock-roller bit* de 62,5 mm de diâmetro para a célula com 60mm e por um *rock-roller bit* de 60,3 mm para a segunda configuração com um diâmetro exterior de 56mm.

2.3.2 - Distribuição dos ensaios efectuados pelas obras realizadas

Os ensaios realizados na unidade das "Areolas da Estefânia", foram efectuados a profundidades compreendidas entre 6,5m e cerca de 30m. Nesta unidade foram efectuados dezanove ensaios com pressiómetro autoperfurador de Cambridge (CSBP), dos quais catorze foram executados na Colina do

Chiado e cinco na Alameda D. Afonso Henriques. Foram realizados vinte e seis ensaios com o pressiómetro Ménard com a seguinte distribuição: dezoito na colina do Chiado e oito na Alameda D. Afonso Henriques.

Os resultados e os respectivos detalhes constam em dez relatórios emitidos pelo LNEC (Sousa Coutinho e Ludovico Marques, 1997).

3 - SÍNTESE DOS RESULTADOS

3.1 - Parâmetros mecânicos obtidos através do pressiómetro Ménard (MPM) e do pressiómetro autopercussor (CSBP)

3.1.1 - Tensão horizontal e coeficiente de impulso em repouso

Os valores de tensão horizontal σ_{h0} determinados a partir dos registos de dezasseis ensaios realizados na colina do Chiado e na Alameda D. Afonso Henriques com o pressiómetro CSBP são apresentados na Figura 1.

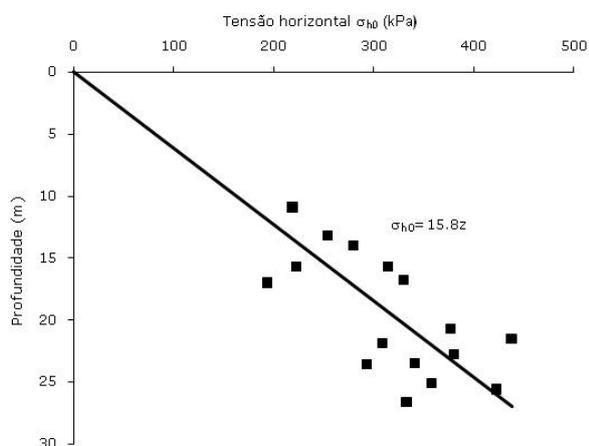


Figura 1 – Variação da tensão horizontal σ_{h0} com a profundidade z

A equação que traduz a variação da tensão horizontal σ_{h0} com a profundidade z é a seguinte:

$$\sigma_{h0} = 15,8z \quad [1]$$

Na Figura 2 constam os valores dos coeficientes de impulso em repouso K_0 obtidos a partir dos valores de tensão horizontal σ_{h0} . Não foram detectados níveis freáticos nos furos realizados, pelo que se assumiu que os solos não se encontravam saturados.

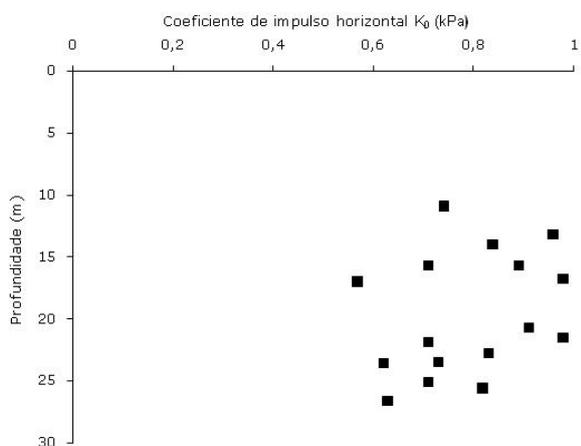


Figura 2 – Variação do coeficiente de impulso K_0 com a profundidade z

Os gráficos das Figuras 1 e 2 não contemplam o registo de três ensaios executados na Alameda D. Afonso Henriques a que correspondem valores de K_0 compreendidos entre 1,28 e 1,43, daí apresentarem apenas valores obtidos em dezasseis ensaios.

Nos dados registados na Figura 2 verifica-se um valor médio de K_0 de 0,79 e um coeficiente de variação de 16,1%.

3.1.2 - Módulos de deformabilidade (pressiométricos)

Nos ensaios CSBP determinou-se o módulo de distorção G_1 no primeiro ciclo de descarga-recarga nas curvas dos registos de pressão-deformação da cavidade cilíndrica, em regime elástico, encontrando-se o procedimento referido em Sousa Coutinho *et al* (1996a,b). No ensaio pressiométrico Ménard a determinação do módulo de deformabilidade, E_M foi realizada segundo as disposições da norma francesa NF P 94-110 (1991), encontrando-se também referida em Sousa Coutinho *et al* (1996a,b).

Os valores dos módulos de distorção G_1 obtidos em dezoito ensaios com o pressiómetro CSBP encontram-se na Figura 3. Nesta também se apresentam os valores dos módulos de deformabilidade Ménard, E_M determinados em 24 ensaios. Na Figura 3 não constam um registo de um valor muito elevado de G_1 de 319 MPa nem dois registos de ensaios com valores exagerados de E_M superiores a 300 e a 370 MPa obtidos em níveis calcareníticos na Alameda D. Afonso Henriques.

Realça-se que os valores de G_M e E_M não são directamente comparáveis, devendo os últimos ser convertidos num módulo de distorção G_M pela relação constante em Ludovico Marques e Sousa Coutinho (2004):

$$G_M = E_M / 2,66 \quad [2]$$

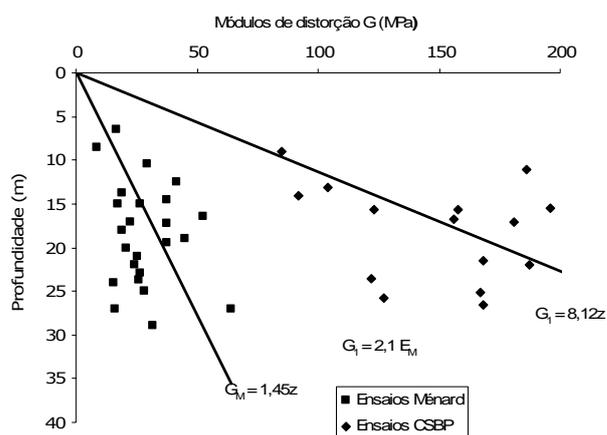


Figura 3 – Variação dos módulos de distorção G_1 do CSBP e Ménard G_M com a profundidade z

A expressão que relaciona o módulo de distorção G_1 com a profundidade z é a seguinte:

$$G_1 = 8,12z \quad [3]$$

Sendo a equação que permite a comparação do módulo de distorção G_M com a profundidade z :

$$G_M = 1,45z \quad [4]$$

Através das equações [2] e [4] advém que:

$$E_M = 3,86z \quad [5]$$

Obtendo-se então a relação entre o módulo de distorção G_1 do CSBP e o módulo de deformabilidade Ménard E_M em profundidade:

$$G_1 = 2,1E_M \quad [6]$$

3.1.3 - Parâmetros de resistência ao corte (ângulos de atrito)

Os procedimentos adoptados para a determinação dos valores de ângulos de atrito através dos registos de ensaios realizados com o pressiómetro CSBP encontram-se referidos em Ludovico Marques (1997).

Na Figura 4 apresentam-se os valores de ângulo de atrito ϕ' determinados através dos registos de dezoito ensaios realizados com o pressiómetro CSBP na colina do Chiado e na Alameda D. Afonso Henriques.

Excluiu-se do gráfico da Figura 4 um valor de 57° obtido na colina do Chiado. Os valores de ângulo de atrito ϕ' que constam na Figura 4 variam entre 38° e 49°, sendo o valor médio de 44° e o coeficiente de variação de 6%.

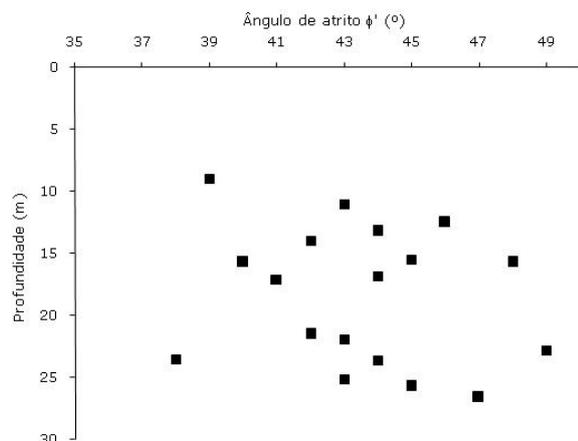


Figura 4 – Variação dos valores de ângulo de atrito ϕ' com a profundidade z , obtidos nos ensaios realizados com o CSBP.

3.1.4 - Relação entre pressões limite e ângulos de atrito

As expressões teóricas que permitiriam calcular a pressão limite nos solos arenosos dependem, ou do conhecimento da deformação volumétrica da areia durante a fase plástica (Vesic, 1972), ou de ser atingido um nível de deformação suficiente para que a areia se deforme a volume constante (Hughes et al., 1977; Ghionna et al., 1989). Não é possível cumprir qualquer daquelas condições dado o nível baixo de deformação atingido pelos pressiômetros autoperfuradores CSBP, pelo que não se consegue obter os valores de pressão limite nos solos arenosos.

A determinação dos valores de pressão limite através dos registos de ensaios efectuados com o pressiómetro Ménard foi realizada segundo as disposições da norma francesa NF P 94-110 (1991), encontrando-se os procedimentos referidos também em Sousa Coutinho *et al* (1996a,b).

Em virtude das expressões teóricas também não permitirem determinar directamente os valores de ângulo de atrito de um solo através do ensaio pressiométrico Ménard, procurou-se estabelecer uma relação entre estes dois parâmetros através de registos de ensaios realizados nos mesmos locais e em profundidades iguais ou semelhantes com um desfasamento até cerca de 0,7m. Assim, de um universo de vinte e quatro ensaios realizados com o pressiómetro Ménard e de dezoito ensaios efectuados com o pressiómetro CSBP, conseguiu-se obter uma correspondência entre os parâmetros ângulo de atrito ϕ' e pressão limite Ménard, Pl_M em seis ensaios realizados na colina do Chiado e em quatro executados na Alameda D. Afonso Henriques conforme referência na Figura 5.

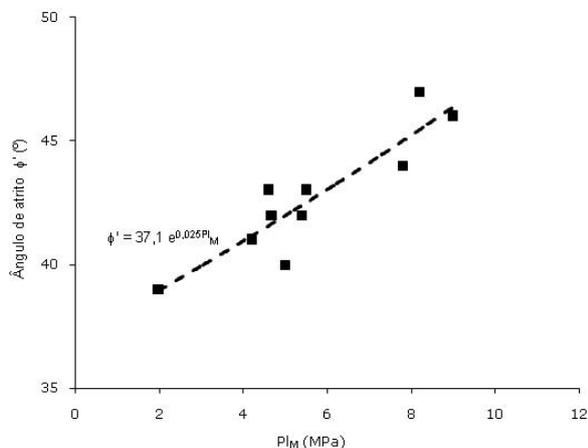


Figura 5 – Variação dos valores do ângulo de atrito ϕ' com os da Pressão limite Ménard, Pl_M

Os dados indicados na Figura 5 permitiram obter uma correlação empírica, a equação [7]:

$$\phi' = 37,1 \text{Exp}(0,025 P_{lM}) \quad [7]$$

Os valores de ângulo de atrito ϕ' calculados através da equação [7] permitem um bom ajustamento aos valores experimentais. Com efeito, 60% dos valores determinados através da equação [7] coincidem com os valores experimentais, enquanto 30% dos valores calculados apresentam uma variação de 1º e 10% dos valores uma variação de 2º.

A equação [8], inversa da equação [7], permite estabelecer a relação entre os valores dos parâmetros pressão limite Ménard, P_{lM} e ângulo de atrito ϕ' :

$$P_{lM} = 40(\text{Ln}\phi' / 37,1) \quad [8]$$

A equação [8] permite um ajustamento muito razoável aos resultados experimentais pois 80% dos valores determinados através desta apresentam uma variação de até 15% com os dados experimentais.

Ménard citado em Clarke (1995) apresentou uma expressão empírica que relaciona a pressão limite Ménard, P_{lM} e o ângulo de atrito ϕ' :

$$P_{lM} = b.2^{((\phi' - 24) / 4)} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad [9]$$

Na Figura 6 efectuou-se uma correspondência entre os valores calculados através da equação [9] e valores determinados através da equação [8], obtendo-se o melhor ajustamento para um valor de b de 2,1 quando as unidades da pressão limite Ménard, P_{lM} vêm em kg/cm^2 , ou seja para um valor de b de 0,21 quando as unidades se encontram em MPa.

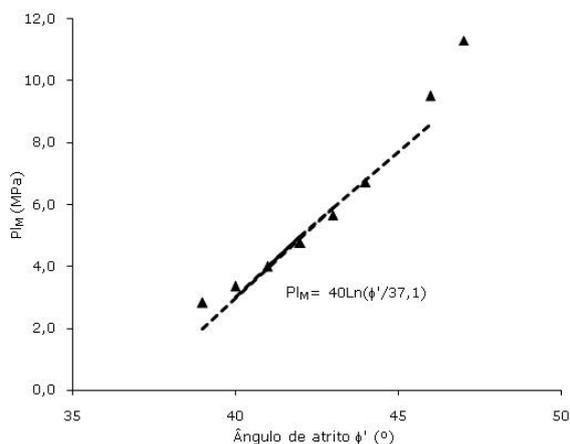


Figura 6 – Determinação do valor do parâmetro b da equação de Ménard [9], através do ajustamento dos valores de P_{lM} obtidos por esta equação, assinalados por triângulos, aos determinados pela equação [8] assinalados na linha a tracejado.

A equação [9] é assim adaptada aos valores experimentais do presente trabalho, resultando:

$$P_{lM} = 0,21.2^{((\phi' - 24) / 4)} \text{ (MPa)} \quad [10]$$

Para Ménard segundo Clarke (1995), os valores do parâmetro b quando as unidades da pressão limite estão em kg/cm^2 , variam entre 1,8 para areias saturadas e 3,5 em areias secas, tomando um valor médio de 2,5.

4 - CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou os resultados dos ensaios pressiométricos realizados na unidade miocénica de Lisboa, "Areolas da Estefânia". Foi possível obter valores de coeficientes de impulso em repouso K_0 e estabelecer uma relação entre os módulos de distorção G_1 do pressiómetro autopercussor CSBP e os módulos de deformabilidade Ménard, E_M . Também se definiram relações entre as pressões limite Ménard, P_{lM} e os ângulos de atrito ϕ' obtidos pelo pressiómetro autopercussor CSBP. Estas correlações são bastante úteis na prática porque permitem estimar os valores dos ângulos de atrito ϕ' a partir dos ensaios efectuados com o pressiómetro Ménard nas "Areolas da Estefânia". Porém deve-se ter em conta que são necessários estudos complementares que compreendam a realização de mais ensaios para se obter uma melhor caracterização mecânica destes terrenos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Metropolitano de Lisboa a autorização para a utilização dos resultados dos ensaios pressiométricos em artigos de índole científica. Finalmente, desejam expressar o seu reconhecimento ao Dr. Machado Leite da Teixeira Duarte, cujo entusiasmo pelas técnicas pressiométricas permitiu a realização de trabalhos de investigação a par dos trabalhos de execução contratual.

REFERÊNCIAS

- Clarke, B.G. (1995). *Pressuremeters in Geotechnical Design*. Blackie Academic & Professional.
- Deere, D.U. (1967). Geological considerations. *Rock Mechanics in Engineering Practice*, 1st chapter, Stagg & Zienkiewicz, London.
- Ghionna, V.N.; M. Jamiolkowski, R. Lancellota e M. Manassero (1989). Limit pressure of pressuremeter tests. *Proc. 12th ICSMFE*, Rio de Janeiro, Brasil, Vol 1, p. 223–226.
- Hughes, J.M.O., C.P. Wroth e D. Windle (1977). Pressuremeter tests in sands. *Géotechnique* 27, 4, pp. 455–477.
- ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Pergamon Press. Vol. 15, pp. 319–368.
- ISRM (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Pergamon Press. Vol. 18, pp.85–110.
- Ludovico Marques, M. A. (1997). *Teoria e prática do pressiómetro autoperfurador: novos desenvolvimentos em solos rijos e rochas brandas*. Tese de Mestrado em Mecânica dos Solos, UNL/FCT, Lisboa.
- Ludovico Marques, M. A.; Sousa Coutinho, A.G.F. (2004). Pressiómetros Autoperfurador e Ménard: contribuição para um estudo de caracterização mecânica dos solos miocénicos de Lisboa e de Loures. 9º Congresso Nacional de Geotecnia. Universidade de Aveiro. Aveiro, p. 299-308.
- Sousa Coutinho, A.G.F. e Ludovico Marques, M.A. (1997). Ensaios pressiométricos na Colina do Chiado e na Alameda D. Afonso Henriques. Contribuição para um estudo de caracterização mecânica dos solos miocénicos de Lisboa. Relatório Final. Relatório 315/97 - NF, LNEC, Lisboa.
- Sousa Coutinho, A.G.F.; Ludovico Marques, M.A.; Costa, A.; Veiga J. (1996a). Ensaios pressiométricos na zona da Estação Baixa/Chiado. Trabalhos realizados, interpretação e resultados dos ensaios na Rua Capelo. Relatório 190/96, LNEC, Lisboa.
- Sousa Coutinho, A.G.F.; Ludovico Marques, M.A.; Costa, A.; Veiga J. (1996b). Ensaios pressiométricos na zona da Estação da Alameda. Trabalhos realizados, interpretação e resultados dos ensaios. Relatório 191/96, LNEC, Lisboa.
- Vesic, A.S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol 98, SM3, pag 265–290.