

O ENSAIO PRESSIOMÉTRICO: TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO

RESUMO

Este artigo vem no seguimento de um trabalho anteriormente apresentado, designado por “O ensaio pressiométrico: Metodologia de Ensaio e Calibração do Equipamento”, pretendendo-se agora fornecer as bases para a interpretação dos resultados que dele provêm. No entanto, adverte-se desde já, para o facto de que estes carecem de correcção antes de serem utilizados para qualquer outro fim.

1 – INTRODUÇÃO

Tal como já foi anteriormente referido, o ensaio pressiométrico é um ensaio efectuado “in situ”, consistindo o mesmo na introdução de uma sonda cilíndrica dentro de um furo aberto no solo, e na aplicação de uma pressão que levará à expansão da sonda - *Fig. 1*, tendo como consequência uma compressão horizontal do solo na zona envolvente.

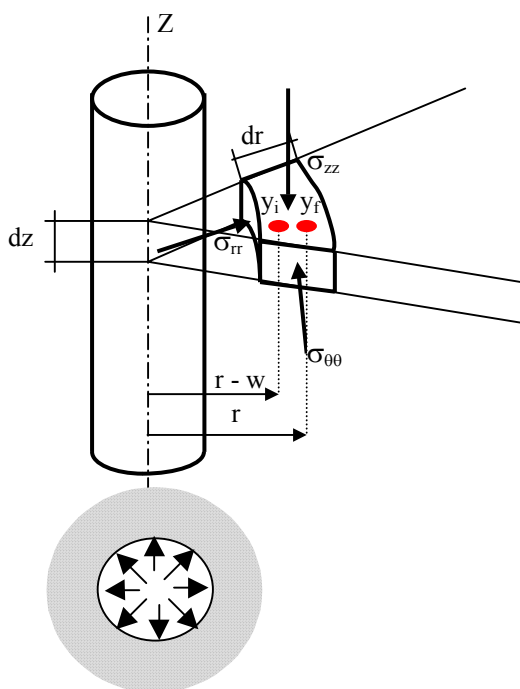


Fig. 1 – Expansão de uma cavidade cilíndrica

Deste ensaio obtém-se uma relação entre a pressão lateral aplicada P no solo (tensão radial σ_{rr} na parede da cavidade) e o respectivo incremento do raio da cavidade relativamente ao seu raio inicial $\Delta R_0/R_0$ (deformação circunferencial $\epsilon_{\theta\theta}$ na parede da cavidade), ou seja, o ensaio fornece uma curva tensão-deformação “in situ” para o solo à profundidade ensaiada. A interpretação das curvas pressão volume ($P-V$) provenientes do ensaio permitem a obtenção de um módulo pressiométrico e de uma pressão limite, daí que se refira a este aparelho como o único que fornece, a partir de um ensaio “in situ”, uma característica de deformabilidade e uma característica de resistência do solo. Verifica-se no entanto que, o módulo pressiométrico e a pressão limite não correspondem a características mecânicas intrínsecas do solo, uma vez que dependem, não só do tipo de terreno como também do equipamento utilizado e ainda do modo de realização do furo e do operador do aparelho. Assim sendo, também os valores obtidos para a capacidade de carga e assentamentos da fundação sofrem de várias imprecisões, função dos coeficientes empíricos utilizados (Monnet e Chema, 1994).

2 – RESULTADOS DO ENSAIO

Relativamente aos resultados do ensaio, é importante salientar que a curva pressiométrica obtida originalmente P_{NC} , ou seja em bruto (pontos experimentais sem correcções), necessita de ser corrigida da resistência que a membrana opõe ao movimento, da pressão hidrostática, da leitura inicial e do volume de perdas do sistema (Jézéquel, Lemée e Saintilan, 1974), tal como se refere de seguida.

i) Correcção da resistência que a membrana opõe à deformação:

Esta correcção têm em conta o efeito de rigidez ou flexibilidade da membrana que envolve a sonda e eventualmente do tubo (o qual possui

aberturas) dentro do qual esta é colocada. A correcção consiste na subtracção de um dado valor de pressão P_4 , a qual é obtida por calibração do equipamento, ao valor de pressão lido P_{NC} para o mesmo volume.

ii) Correcção da pressão hidrostática:

Esta correcção prende-se com o efeito do peso da coluna de água no interior do tubo que faz a ligação do manómetro de leitura até à sonda. As medições de pressão registadas no manómetro não têm em conta a pressão hidrostática P_H desta altura de água, a qual será posteriormente adicionada aos valores lidos.

iii) Correcção da leitura inicial:

Esta correcção consiste na redução de um determinado valor de pressão e volume aos valores medidos durante o ensaio. Esses valores correspondem à pressão e volume inicial da sonda P_I e V_I , obtidos antes do início do ensaio e com a sonda ao nível do painel de leituras da unidade de controlo pressão-volume. Estes valores deveriam ser zero, no entanto devido a efeitos de temperatura e outros, eles podem sofrer modificação, sendo por isso necessário efectuar sempre esta verificação.

iv) Correcção da perda de volume:

Esta correcção é também ela obtida por calibração do equipamento, tendo por objectivo a consideração de que nem toda a água que sai do controlador pressão-volume serve necessariamente para deformar o terreno. Deste modo ao volume injectado deve-se retirar o volume perdido V_2 .

Uma vez efectuadas as devidas correcções obtém-se para pressão P_C aplicada na cavidade do furo (corrigida) e para o aumento de volume V_C da sonda (corrigido), os seguintes valores:

$$P_C = P_{NC} - P_4 + P_H - P_I \quad (1)$$

$$V_C = V_{NC} - V_3 - V_I \quad (2)$$

A curva pressiométrica típica resultante de um ensaio, o qual se supõe bem executado, pode apresentar basicamente dois andamentos distintos, devendo-se essa diferença ao método de introdução da sonda na cavidade aberta no solo.

Tal como já foi referido anteriormente, podem considerar-se essencialmente dois tipos de procedimento para a colocação da sonda à cota de ensaio, sendo:

i) Introdução da sonda num furo já previamente aberto (**BPMT**). O Pressiómetro Ménard é talvez um ou o equipamento mais conhecido e comercializado que emprega esta técnica;

ii) Introdução à força da sonda no solo (**SBPMT** e **CPMT**), geralmente ao abrigo de um tubo que é cravado e que possui aberturas, ou então através da ajuda de um trado no caso de solos móveis (ex: areias). Dentro destes tipo de ensaios encontra-se o pressiómetro autoperfurador. O PAF apresenta para este estudo especial interesse, tal como se compreenderá mais adiante.

No primeiro caso verifica-se que após aberto o furo e antes da introdução da sonda para a realização do ensaio, estes têm tendência a fechar-se devido à descompressão criada pela retirada do solo, podendo ocorrer queda do mesmo para dentro da abertura no caso de se tratar de uma areia, e no caso de uma argila, ocorrerá uma modificação no arranjo estrutural desta. Tal facto vai provocar diferenças entre os andamentos das curvas pressiométricas registados para os dois pressiómetros em causa.

2.1 – CURVA PRESSIOMÉTRICA ASSOCIADA AO PRESSIÓMETRO MÉNARD

O ensaio pressiométrico de Ménard possui a vantagem de conseguir uma boa relação entre o método de ensaio, a selecção dos instrumentos e sua instalação, além da excelente ligação à obtenção de características mecânicas para o solo e da aplicabilidade destas na concepção de fundações.

A curva pressiométrica tipicamente associada a este ensaio é a indica na *Fig. 2*, verificando-se que esta curva apresenta três fases distintas:

Fase I

Correspondente à parte inicial do ensaio e onde teoricamente tenta restabelecer-se o solo ao seu estado inicial (P_0, v_0) ou seja, antes da abertura do furo. O valor de P_0 será a pressão horizontal total das terras em repouso e v_0 será o volume injectado e correspondente a esse estado de tensão. Como tal o volume teórico da cavidade no início do ensaio será de $(V_0 + v_0)$, em que V_0 representa o volume da sonda em vazio.

Fase II

Nesta fase, apelidada de pseudo-elástica dado que as deformações que estão aqui em causa são do tipo micro-plástico, a curva apresenta-se sensivelmente

linear existindo assim uma proporcionalidade entre tensões e deformações. Esta parte da curva é delimitada inferiormente pela pressão P_0 e superiormente pela pressão P_Y (de cedência). Na realidade o solo não apresenta um comportamento puramente elástico uma vez que este só ocorre para deformações inferiores a 10^{-2} , as quais não são captadas pelo pressiómetro de Ménard.

Fase III

A esta fase está associado um comportamento plástico, observando-se que as deformações deixam de ser directamente proporcionais as tensões. Esta parte da curva é limitada inferiormente pelo valor P_Y e superiormente por uma assíntota cujo valor é P_L (limite).

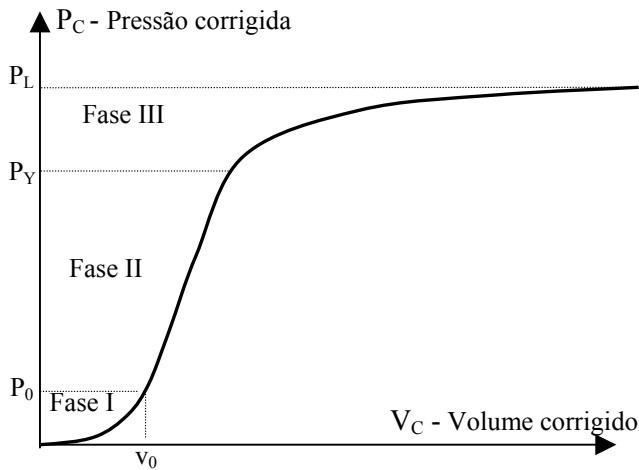


Fig. 2 – Curva típica - Pressiómetro Ménard

2.2 – CURVA PRESSIOMÉTRICA ASSOCIADA AO PRESSIÓMETRO AUTOPERFURADOR (PAF)

O procedimento utilizado durante a realização do ensaio é o indicado de seguida, sendo a curva esquematizada na figura 3, o resultado típico deste ensaio.

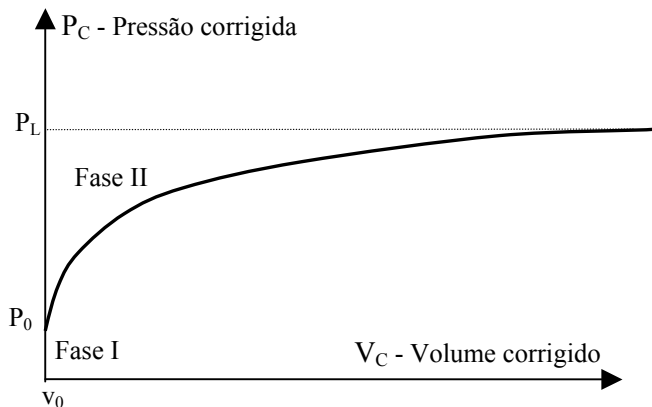


Fig. 3 – Curva típica - Pressiómetro Autoperfurador

Fase I

O primeiro passo será a aplicação de uma pressão interna que iguale a externa e que corresponde á pressão que o terreno exerce na superfície exterior da membrana. Esta pressão inicial é designada de P_0 e a sua relação com σ_{h0} depende de vários factores, como por exemplo a qualidade da furação.

Fase II

Uma vez que a pressão aplicada ao solo exceder a pressão deste sobre a membrana então esta começa a separar-se da superfície metálica do pressiómetro com a qual estava em contacto. Será a partir daqui que se dá o início da expansão radial da cavidade cilíndrica. Continuando a aumentar a pressão atinge-se a máxima pressão que o solo pode suportar.

3 – PARÂMETROS PRESSIOMÉTRICOS

A partir deste ensaio é obtido não só um valor de pressão máxima, designado por pressão limite P_L , como também é deduzido um valor equivalente para o módulo de deformabilidade do solo, E_p . Este último é assim designado porque todos os valores de ensaios do tipo dilatométrico são diferentes dos obtidos a partir de ensaios triaxiais.

No entanto, seria preferível determinar um módulo de distorção, G , uma vez que evitaria atribuir um valor ao coeficiente de Poisson, ν . Ainda a reforçar a ideia de que realmente o módulo de distorção seria o parâmetro mais válido e fiável de obter com este ensaio, é o facto deste ser o mesmo, de acordo com a teoria da elasticidade, quer em termos de tensões efectivas quer em termos de tensões totais.

3.1 – MÓDULO PRESSIOMÉTRICO

O módulo pressiométrico é determinado sobre a parte quasi-linear da curva pressiométrica pressão-volume (P-V) uma vez efectuadas as respectivas correcções. Assim, e assumindo um comportamento elástico para o solo, e tendo em conta apenas a parte linear da curva pressiométrica, a fórmula fundamental para a expansão ΔR de uma cavidade cilíndrica de diâmetro R_0 sob a acção de uma pressão de compressão ΔP pode escrever-se como:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{1}{2.G} \Delta P, \quad (3)$$

mas dado que G - módulo de distorção pode ser expresso por $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$, então ter-se-á :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{1 + \nu}{E} \Delta P \quad (4)$$

No caso de se pretender o módulo pressiométrico conhecido por módulo de Ménard E_M , então o coeficiente de Poisson é tomado igual a 0.33, independentemente do tipo de solo em questão.

Tal procedimento é inadequado para as argilas em condições não drenadas, sendo por isso preferível utilizar o módulo de distorção G . Chama-se no entanto a atenção para o facto de, eventualmente, ocorrerem problemas no cálculo do módulo distorcional inicial, dado que este pode vir a reflectir não as propriedades do solo intacto, mas sim as do remexido.

3.2 – PRESSÃO LIMITE

Define-se pressão limite como o valor da pressão sob a qual a cavidade cilíndrica atinge uma expansão infinita. Como tal será o valor da assíptota para a qual tende a curva de expansão da cavidade quando esta tende para infinito.

Ménard definiu uma pressão limite convencional (P_L) como sendo a pressão para a qual o aumento de volume ΔV é igual ao volume inicial V_0 da cavidade cilíndrica, ou seja quando o volume final da sonda é o dobro do seu volume inicial:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 1 \Rightarrow \Delta V = V_0 \Rightarrow V_f = 2.V_0 \quad (5)$$

ou ainda $V_f = V_0 + 2.V_1$ se se considerar o volume lido corrigido. Um volume igual a 2 vezes o inicial corresponde a uma deformação da cavidade de sensivelmente 40%.

Usualmente este parâmetro é apenas determinado para os ensaios com pressiómetro Ménard, visto que os autoperfuradores não têm capacidade para duplicar o volume inicial da cavidade. Como tal, e sempre que isso aconteça, será então necessário recorrer a técnicas de extrapolação de maneira a determinar o valor de P_L .

O valor da pressão limite, do solo a ter realmente em conta, não é o lido directamente da curva, mas sim o valor definido por:

$$P_L^* = P_L - \sigma_{0h}, \text{ em termos de tensões totais} \quad (6)$$

$$P_L' = P_L^* - u_{0h}, \text{ em termos de tensões efectivas} \quad (7)$$

Este valor de P_L^* não é muito sensível à perturbação que o solo na periferia das paredes da cavidade pode experimentar durante a fase de abertura desta, ao contrário do módulo pressiométrico, no entanto é relativamente sensível à razão entre o comprimento e

o diâmetro da sonda (L/D), principalmente em solos granulares.

De salientar que o valor da pressão limite pode ainda ser obtido de forma aproximada se for tido em conta que usualmente a pressão de cedência P_Y , é igual a $\frac{1}{2}$ ou a $\frac{2}{3}$ da pressão limite, respectivamente para as argilas e areias.

3.3 – COEFICIENTE DE IMPULSO EM REPOUSO, K_0

No caso em que o ensaio é efectuado com o pressiómetro autoperfurador é possível determinar o valor desta grandeza com razoável facilidade, uma vez que se admite que este é inserido no terreno sem perturbação, ou seja não ocorre nem libertação das tensões, nem das extensões, nem alteração do teor em água ou do nível freático. Na realidade existem sempre perturbações, mas neste caso estas são quase desprezáveis quando comparadas com as causadas pelo pressiómetro de Ménard.

O coeficiente de impulso em repouso K_0 é dado pela relação:

$$K_0 = \frac{\sigma_{0h} - u_0}{\sigma_{0v} - u_0} \quad (8)$$

em que: u_0 – Pressão intersticial - hidrostática;

σ_{0h} – Tensão total horizontal em repouso;

σ_{0v} – Tensão total vertical em repouso.

A tensão total vertical em repouso e a pressão intersticial são determinadas com base na profundidade de ensaio, nível freático e peso volúmico total do solo. Quanto á tensão total horizontal em repouso esta é retirada directamente da curva pressiométrica, correspondendo no pressiómetro autoperfurador ao valor de pressão de partida do ensaio (ponto **X**) e no caso do pressiómetro Ménard será o valor de pressão final da fase I e inicial da fase II (ponto **W**) – Fig. 4.

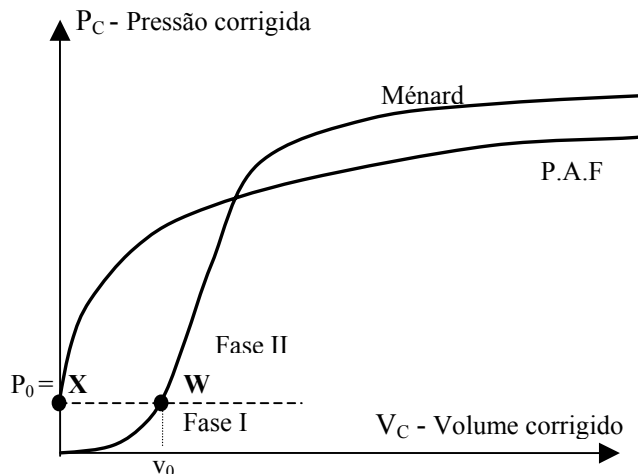


Fig. 4 – Obtenção da tensão total horizontal em repouso

3.4 – VALORES CORRENTES DOS PARÂMETROS PRESSIOMÉTRICOS

Nos Quadros I e II indicam-se os valores correntemente encontrados quer para E_p quer para P_L^* , para os diversos tipos de solo.

ARGILA					
Parâmetros	Mole	Média	Rija	Muito Rija	Dura
P_L^* [MPa]	0 – 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,8	0,8 – 1,6	> 1,6
E_p [MPa]	0 – 2,5	2,5 – 5,0	5,0 – 12,0	12,0 – 25,0	> 25,0

Quadro I– Valores correntes de E_p e P_L^* para as argilas (Briaud, 1992)

AREIA				
Parâmetros	Solta	Média	Densa	Muito densa
P_L^* [MPa]	0 – 0,5	0,5 – 1,5	1,5 – 2,5	> 2,5
E_p [MPa]	0 – 3,5	3,5 – 12,0	12,0 – 22,5	> 22,5

Quadro II– Valores correntes de E_p e P_L^* para as areias (Briaud, 1992)

Com base, não só nestes quadros, como também nas relações entre o módulo pressiométrico e a pressão limite é possível obter uma indicação quanto ao tipo de solo ensaiado (Briaud, 1992). No entanto para solos remexidos verifica-se que estas relações podem vir reduzidas de 20% a 30%. De igual modo o efeito da água não deve ser negligenciado, verificando-se que é tanto mais importante quanto maior for a relação entre módulo pressiométrico e pressão limite. Para situações em que o terreno esteja sujeito a oscilações por parte do nível freático, os valores antes indicados poderão ser afectados e reduzidos de 20% a 40%.

Outro processo de reconhecer o tipo de solo ensaiado está associado ao andamento apresentado pela curva pressiométrica, uma vez que os solos argilosos têm um comportamento diferente dos solos arenosos – Fig. 5.

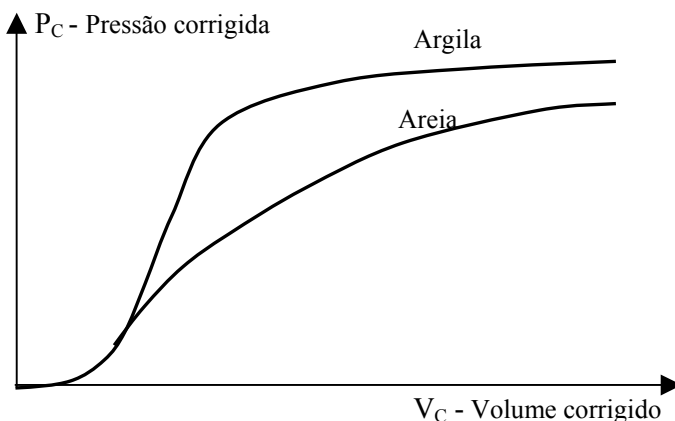


Fig. 5 – Diferença entre a curva pressiométrica de uma argila e de uma areia (Briaud, 1992)

A curva pressiométrica dos solos argilosos apresenta geralmente uma curvatura bastante pronunciada e exibem de forma acentuada o patamar da pressão limite, verificando-se que estas duas características se fazem notar mais ainda nas argilas sobreconsolidadas.

Por sua vez a curva pressiométrica dos solos arenosos, e ao contrário das argilas, apresenta uma curvatura suave e contínua, não sendo evidente a determinação da pressão limite.

4 – QUALIDADE DO ENSAIO PRESSIOMÉTRICO

A avaliação da qualidade do ensaio pressiométrico pode ser retirada quer pela análise dos resultados da pressão limite e módulo pressiométrico, quer por inspecção da curva pressiométrica, sendo talvez esta última a que fornece mais e melhor informação para o julgamento da boa ou má execução do ensaio. Assim, e em relação à curva pressiométrica, podem ocorrer três situações distintas – Fig. 6:

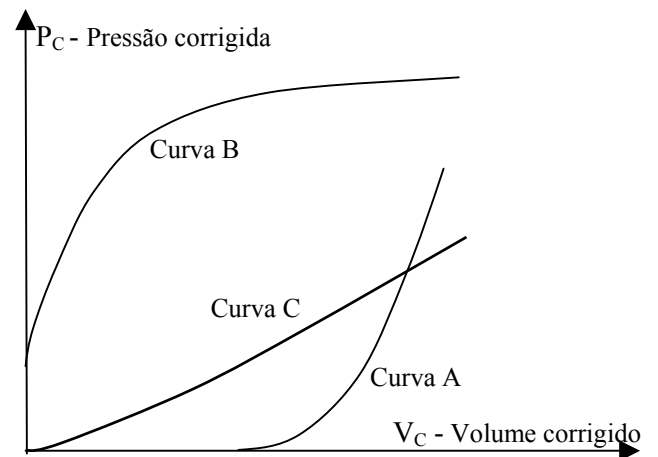


Fig. 6 – Exemplos de curvas pressiométricas provenientes de ensaios de má qualidade (Briaud, 1992)

- i) O diâmetro da cavidade cilíndrica é demasiado largo em relação ao diâmetro da sonda (curva A), ou seja se a relação entre estes é superior ou igual a 1,20. Nesta situação é extremamente difícil obter bons resultados para o módulo pressiométrico, mas por vezes ainda é possível.
- ii) O diâmetro da cavidade é pequeno comparativamente com o da sonda, sendo por isso necessário forçar a introdução desta no solo, o que originará uma pressão horizontal inicial na membrana ainda antes da expansão da sonda (curva B). Quando tal acontece é impossível retirar um valor para o módulo pressiométrico, no entanto para a determinação do valor da

pressão limite não se colocam quaisquer problemas, uma vez que este parâmetro é praticamente insensível a esse tipo de factores.

- iii) Sempre que devido a um processo de furação inadequado ou incorrecto o solo sofra uma profunda alteração do seu arranjo estrutural na zona envolvente à cavidade cilíndrica, então o ensaio pressiométrico não fornece qualquer informação adicional a não ser a de que o ensaio é incorrecto (curva C).

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com a mais recente classificação atribuída a ensaios “in situ”, e analisando os tipos de ensaios que estão associados às diversas categorias, constata-se que o ensaio pressiométrico encontra-se inserido na 2ª categoria (Gambin, 1995; Stille et al, 1968):

"2ª categoria – Inclui os ensaios que fornecem grandezas mecânicas com um sentido prático para a engenharia e cujos resultados podem ser interpretados com base em modelos de teorias simples."

Como tal, e considerando a classificação referida, é possível, com base neste ensaio e nos seus resultados, curvas pressiométricas, obter uma identificação do solo ensaiado e conseqüentemente algumas das suas características, daí que o ensaio pressiométrico seja bastante versátil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Briaud** J. L. (1992). *“The Pressuremeter”*. Published by Balkema, Rotterdam.
- Gambin** M. (1995). *“Reasons for the Success of Menard Pressuremeter”*. Proceedings of the 4th International Symposium on Pressuremeters. May 17-19. Canada.
- Jézéquel** J.F.; **Lemée** E.; **Saintilan** D. (1974). *“Exploitation de l’Essai Pressiométrique Normal par Méthode Numérique”*. Bulletin Liaison Laboratoire Ponts et Chaussées, n°69. Jan.-Fév.
- Monnet** J.; **Chemaa** T. (1994). *“Étude Théorique et Expérimentale de l’Équilibre Élasto-plastique d’un Sol Cohérent Autour du Pressiomètre”*. Revue Française de Géotechnique, n°73, 4^o trimestre.
- Stille** H.; **O’Neill** D.; **Topolnicki** P. (1968). *“Measurements of Soil and Soft Rock Properties”*. Proceedings of the XI European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. DGS. Copenhaguen.