

O ENSAIO PRESSIOMÉTRICO: METODOLOGIA DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

RESUMO

Pretende-se com este artigo dar a conhecer o ensaio pressiométrico, assim como a evolução do mesmo ao longo de várias décadas, mais especificamente dos equipamentos pressiométricos. Além disso, será ainda dada especial atenção à metodologia de ensaio e à calibração do equipamento, de acordo com a norma ASTM.

1 – ENSAIO PRESSIOMÉTRICO/PRESSIÓMETROS

O ensaio pressiométrico é um ensaio efectuado “in situ”, tendo maior aplicação nos solos e rochas brandas ou solos duros. Este consiste 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.

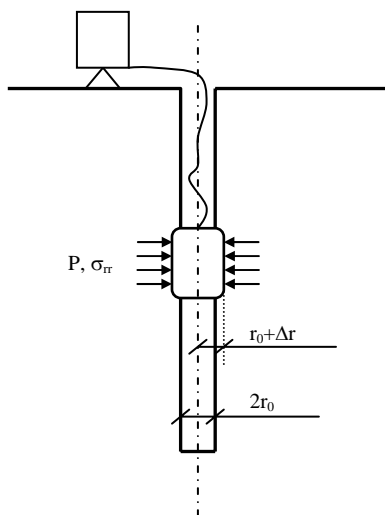


Fig.1 – Ensaio Pressiométrico

O pressiómetro é, hoje em dia, um aparelho extremamente conhecido e de grande aplicação, principalmente em projectos de fundações.

A sua utilização deve-se não só pelo trabalho do seu inventor, Louis Ménard (1955-1959), como também

de Michel Gambin (1963), o principal propulsor da utilização deste equipamento em França.

Hoje em dia existem diferentes tipos de pressiómetros, sendo a principal diferença entre eles resultado do processo de introdução da sonda no solo. Assim sendo, tem-se:

- com pré-perfuração - *Fig. 2*
(**PBPMT** – Preboring Pressuremeter)

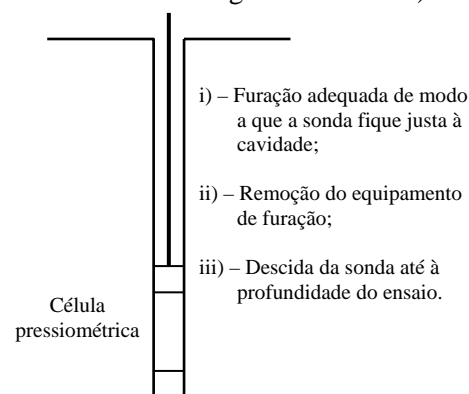


Fig. 2 – Pressiómetro PBPMT

- com autoperfuração - *Fig. 3*
(**SBPMT** – Selfboring Pressuremeter)

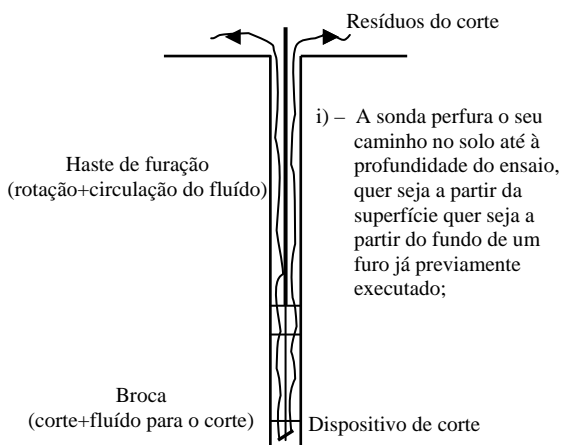


Fig. 3 – Pressiómetro SBPMT

- com cone, cravado no local - *Fig. 4*
(DCPMT – Driven Cone Pressuremeter)
- com cone, penetração por pressão - *Fig. 4*
(PCPMT – Pushed Cone Pressuremeter)

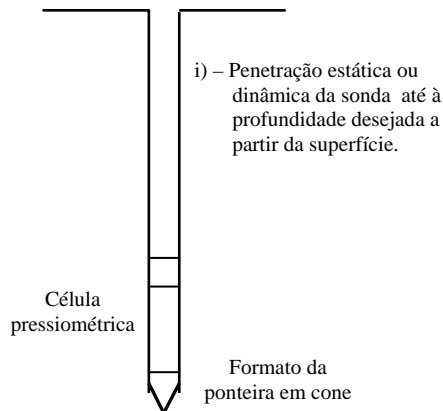


Fig. 4 – Pressiómetro DCPMT e PCPMT

- com tubo exterior de revestimento, penetração por pressão - *Fig. 5*
(PSPMT – Pushed Shelby Tube Pressuremeter)

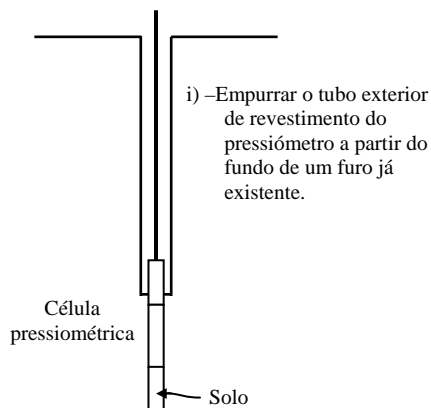


Fig. 5 – Pressiómetro PSPMT

Relativamente às dimensões da sonda existe uma relação entre diâmetro e comprimento que deve ser respeitada, devendo a mesma ser elevada, de modo a que posteriormente, nas interpretações dos resultados, se possa admitir que a sonda tem comprimento infinito e que a pressão aplicada é uniforme. Um outro processo alternativo para obviar o problema do efeito de extremidade, consiste na sub-divisão da sonda em três células: uma central onde se fazem as medições e duas de guarda, sendo então possível considerar que a pressão aplicada é uniforme.

Deve-se ainda referir que estes ensaios podem ser realizados com sucesso a qualquer profundidade, sendo o volume do solo solicitado extremamente importante para os resultados finais.

2 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO PRESSIÓMETRO

A criação do primeiro pressiómetro PBPMT é atribuído a Kogler, em 1933 na Alemanha, no entanto este não levará a sua ideia por diante e será Ménard, em 1955 na França, que desenvolverá e construirá realmente o pressiómetro pré-perfurador e o primeiro que conseguirá obter as propriedades de deformação do solo “in situ” a partir do ensaio, sendo por isso considerado como o inventor e “pai” deste equipamento.

Fukuoka, em 1959 no Japão, desenvolve um outro pressiómetro PBPMT que lhe permitirá determinar o módulo de deformabilidade horizontal do solo (Briaud, 1992). Nesse mesmo ano, Ménard introduzirá uma modificação no seu pressiómetro, passando a proteger a sonda, a qual fica envolta numa camisa cilíndrica.

Em 1963, e com base na experiência adquirida, Ménard publica as primeiras equações e tabelas que relacionam os resultados do ensaio pressiométrico com o assentamento das fundações directas e a capacidade de carga das mesmas (Ménard, 1963). Numa tentativa de aperfeiçoar o procedimento do ensaio, Jézéquel, em 1965, desenvolverá no “Laboratoire des Ponts et Chaussées”, na França, o primeiro pressiómetro SBPMT (Jézéquel et al, 1968). Este pressiómetro, de Jézéquel, é igualmente designado por “PAF” (Pressiometre Autoforeur) e tem sofrido várias melhorias ao longo dos anos.

Em 1966, Suyama, Imai e Ohya pertencentes á empresa Japonesa “Oyo Corporation” criarão dois tipos de pressiómetros PBPMT, sendo eles o “Lateral Load Tester “ e o “Elastmeter 100” (Oyo Corporation, 1983).

Já na década de 70, mais precisamente em 1971 Wroth e Hughes desenvolverão na Universidade de Cambridge, na Inglaterra, o pressiómetro SBPMT “Camkometer” (Wroth e Hughes, 1973), o qual é actualmente comercializado pela “Cambridge In Situ”. Mais tarde, em 1975, a “Building Research Establishment” no Reino Unido procede ao fabrico, com o intuito de ser utilizado em plataformas pretolíferas, o primeiro PSPMT (Wroth, 1982).

Por sua vez no Canada, em 1978, é desenvolvido por Briaud e Shields um pressiómetro de pequenas dimensões para fins de dimensionamento de pavimentos, o qual é conhecido por “Pencell” (Briaud, 1979). Nesse ano, em França, o “Institut Français du Pétrole”, concebe o “PAM”. Este é um pressiómetro SBPMT utilizado para fins de investigação em plataformas pretolíferas. Ao mesmo

tempo é publicado o livro de Baguelin, Jézéquel e Shields com o título “Pressuremeter and Foundation Engineering” (Baguelin et al, 1978).

Briaud e os seus colegas da “Texas A&M University” desenvolverão em 1982 o pressiómetro “Texam”, actualmente comercializado pela “Roctest”. Também nesse ano, em França, as equipas do “Laboratoire des Ponts et Chaussées” e do “Techniques Louis Ménard” trabalharão em conjunto e criarão o “LPC-TLM”. Este é um pressio-penetrómetro com cone e é destinado à caracterização dos maciços nas zonas pouco profundas das plataformas petrolíferas.

Entre 1982 e 1986 vários grupos esforçam-se em conceber um pressiómetro DCPMT ou PCPMT, entre os quais estão: “Cambridge In Situ”, “Fugro B.V.”, “Hogentogler”, “Roctest”, “Texas A&M University” e a “University of British Columbia”.

Em 1984 é introduzida em França a versão automatizada do pressiómetro Ménard “PAC” e ainda nesse ano quer a “Roctest” quer a “Cambridge In Situ” desenvolverão um pressiómetro de alta-pressão para ensaios em rochas (Briaud, 1992). Finalmente em 1988 a ASTM publica a norma (ASTM D4719-87) que determina o procedimento a seguir num ensaio pressiométrico em solo.

Em paralelo com todos estes desenvolvimentos, efectuados ao nível do equipamento, também vários progressos foram obtidos na interpretação das curvas provenientes do ensaio pressiométrico, sendo esses estudos realizados pela França, Inglaterra, Japão, Canada e mais recentemente pela Itália, Noruega e Estados Unidos da América (Briaud, 1992).

3 – OS DIVERSOS TIPOS DE EQUIPAMENTO

3.1 – PRESSIÓMETROS DO TIPO PBPM

Hoje em dia existem essencialmente quatro pressiómetros do tipo PBPM diferentes.

O primeiro tipo considera a sonda dividida em três células, sendo a central onde se efectuam as medições e as outras duas de guarda para isolarem a célula central dos efeitos de extremidade existentes. A aplicação da pressão nestas células é realizada, respectivamente, pela introdução de um gás nas células de guarda e pela introdução de água na célula central. Estas pressões são conseguidas recorrendo a garrafas de gás (nitrogénio) comprimido.

A membrana de borracha que envolve a sonda está protegida de eventuais problemas de perfuração por sobreposição de tiras estreitas de aço. As leituras do

aumento de volume são obtidas através de manómetros de pressão. São exemplo deste tipo de equipamento o pressiómetro Ménard – Fig. 6.

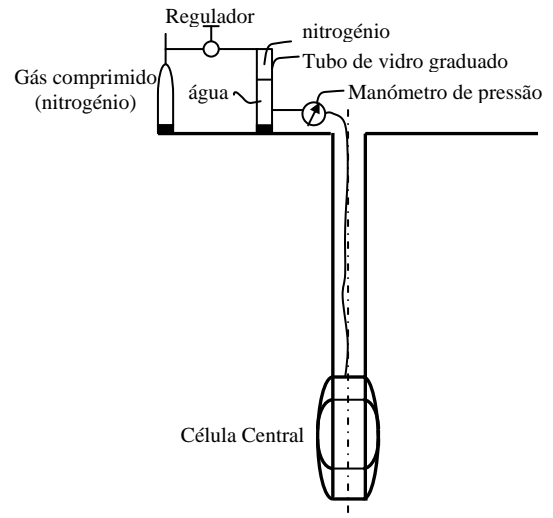


Fig. 6 – Pressiómetro Ménard GC

O segundo tipo é em tudo idêntico ao primeiro, com a excepção de que a sonda é composta por uma única célula, a qual apresenta comprimento suficiente grande para que os efeitos de extremidade se considerem negligáveis. Este é o caso do “Lateral Load Tester - LLT” de Oyo – Fig. 7.

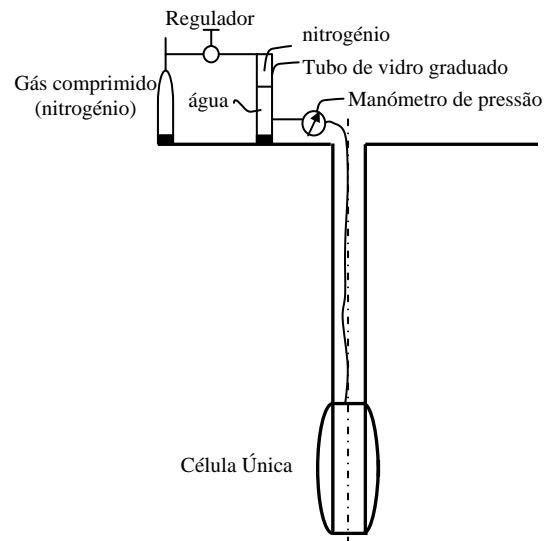


Fig. 7 – Pressiómetro “LLT” de Oyo

O terceiro tipo é muito parecido com o segundo, sendo a diferença dada pelo modo de aplicação da pressão de água na sonda, a qual neste caso é realizada por um macaco que irá actuar sobre um pistão e que forçará a entrada de água na sonda. A medição do aumento de volume é dada pela leitura da distância percorrida pelo pistão ou então pela contagem e registo das voltas efectuadas pelo parafuso do macaco, sendo a medição da pressão obtida do manómetro de pressão – Fig. 8.

O pressiómetro “Texam” da “Roctest” é um exemplo deste tipo que equipamento.

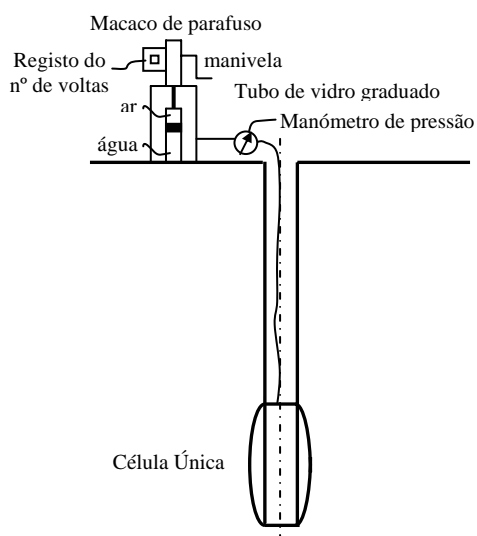


Fig. 8 – Pressiómetro “Texam” da Roctest

Finalmente o quarto pressiómetro deste tipo, o “Tri-Mod”, também da “Roctest”, assemelha-se ao segundo tipo acima mencionado, mas o elemento que garante o aumento de volume da sonda será gás e não água.

3.2 – PRESSIÓMETROS DO TIPO SBPMT

Actualmente existem três pressiómetros do tipo SBPMT diferentes.

No primeiro tipo de pressiómetro, o instrumento que efectua o corte no solo é alimentado por um pequeno motor incorporado dentro da sonda. A célula é única, sendo a dilatação da mesma efectuada por aumento da pressão da água. Esta pressão é aplicada do mesmo modo que descrito em 3.1, assim como o sistema de leituras – Fig. 9.

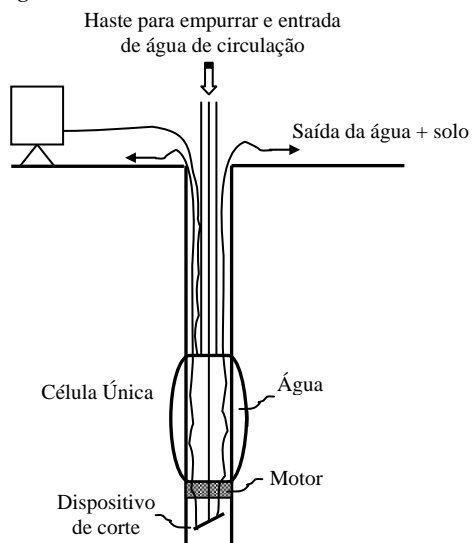


Fig. 9 – Pressiómetro “PAF 76” do LCPC

O pressiómetro do “Laboratoire des Ponts et Chaussées”, designado por PAF 76, é um equipamento do tipo acabado de descrever.

No segundo caso o elemento de corte é alimentado a partir da superfície através da rotação das hastes de furação interiores. A sonda contém apenas uma única célula, no entanto a pressão é exercida por um gás, sendo o aumento do raio da sonda dado por três fios eléctricos situados a meio da sonda. A pressão é medida não só através de transdutores de pressão localizados na sonda como também por manómetros de pressão, podendo-se ainda medir as pressões intersticiais durante o ensaio através da colocação de transdutores de pedras porosas as quais são coladas à membrana que envolve a sonda – Fig. 10. Um exemplo deste tipo de pressiómetro é o “Camkometer” da “Cambridge In Situ”.

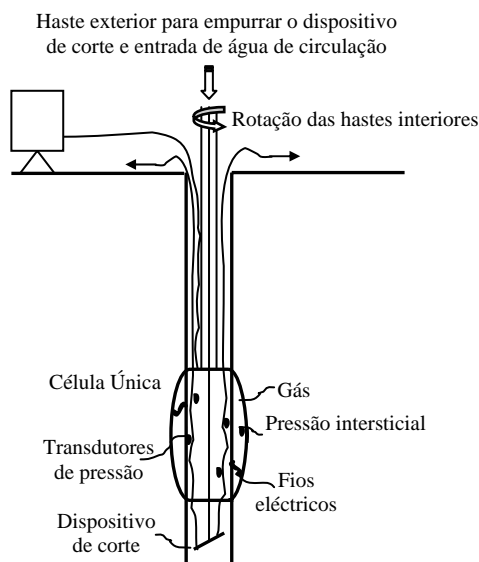


Fig. 10 – “Camkometer” de Cambridge

O terceiro tipo de pressiómetro é semelhante ao primeiro, sendo a única diferença entre eles dada pelo modo de furação do solo, a qual é, neste caso, realizada a partir da superfície pela rotação das hastes interiores. O “Boremac” é um pressiómetro deste tipo, verificando-se que na realidade este não é mais do que a versão do “Texam” com um sistema de autofuração anexado (conjugando a parte referente ao sistema de leituras e aplicação de pressão da Fig. 4 com a parte referente ao sistema de furação da Fig. 7, para melhor percepção do equipamento em causa).

3.3 – PRESSIÓMETROS DO TIPO CPMT

Existem diversos tipos de pressiómetros deste género, ou seja, com cone. Com este equipamento pretende-se conjugar as vantagens do ensaio CPT, “Cone Penetration Test”, com as do ensaio

pressiométrico, PMT. Assim, obtêm-se os perfis, em profundidade, da resistência de ponta oferecida pelo solo, e uma vez atingida a cota pretendida para a realização do ensaio pressiométrico para-se a penetração e procede-se à expansão da sonda. No caso da penetração ser estática, esta é efectuada à razão de 20 mm/s, tal como sucede no ensaio CPT. No caso contrário, ou seja se a penetração é dinâmica, então é deixado cair um peso com uma certa massa a partir de uma determinada altura de queda.

3.4 – PRESSIÓMETROS PARA PAVIMENTOS

Os materiais das camadas dos pavimentos e suas características de deformabilidade, podem de igual ser determinadas com base em ensaios pressiométricos. Neste tipo de equipamento a sonda apresenta um comprimento relativamente pequeno e como tal também o seu diâmetro será menor (aproximadamente 33 mm), por forma a garantir-se que os efeitos de extremidade são desprezáveis. O facto do comprimento da sonda ser inferior prende-se com a necessidade de ensaiar separadamente as camadas que constituem o pavimento, conseguindo-se desse modo obter as características individuais de cada uma delas. Estes ensaios são realizados em furos previamente executados, estando por essa razão inseridos no grupo dos pressiómetros PBPM, usualmente designados por mini-pressiómetros.

4 – CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

A calibração ou aferição do equipamento é efectuada tal como definido na norma ASTM (D4719-87), publicada em 1989 e intitulada “Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soil”.

4.1 – SATURAÇÃO E FUGAS

Considerem-se os pressiómetros que utilizam o elemento água para provocar a expansão ou dilatação da sonda, os quais representam a maioria. Nesse caso, o procedimento seguido para determinar se existem fugas e/ou se este apresenta bolhas de ar no sistema, será inicialmente a saturação completa do conjunto sonda, tubagem e unidade de controlo de pressão-volume.

Isso é realizado ao deixar escorregar a sonda para dentro do tubo de aço de calibração, em que o diâmetro interior deste tubo deve ser aproximadamente 1,005 vezes superior ao da sonda, sendo as paredes do mesmo de pequena espessura por forma a que a sua deformabilidade não afecte os resultados quando aplicada a máxima pressão à sonda, e devendo este ainda ser suficientemente longo para cobrir toda a parte expansível da sonda.

Uma vez a sonda colocada no interior do tubo de calibração, procede-se ao aumento da pressão até que sejam atingidos os 2500 kPa, traçando-se a curva pressão-volume correspondente – Fig. 11. Observando a curva tem-se que do ponto A ao B a sonda entra em contacto com o tubo de aço, considerando-se que só quando a pressão chega ao ponto C, 500 kPa, é que se estabelece uma adesão perfeita entre os dois elementos, prosseguindo-se com o incremento de pressão até aos 2500 kPa, ponto D.

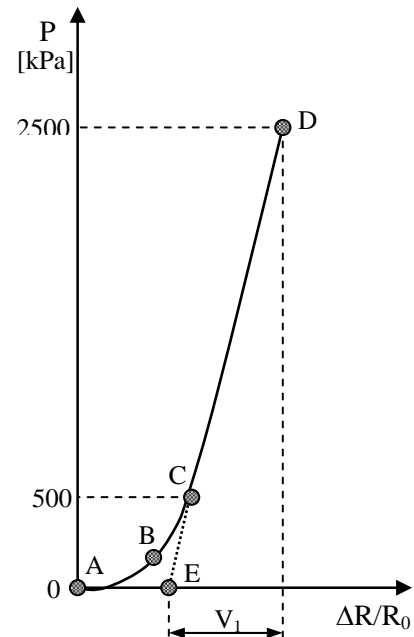


Fig. 11 – Verificação da saturação e fugas

Considera-se que o sistema não apresenta fugas e que está correctamente desareado se o volume V_1 , indicado na Fig. 11, é inferior a 0,1% do volume nominal da sonda em vazio V_0 para uma pressão de 100 kPa. Caso não se consiga obter esta tolerância então é porque o sistema apresenta bolhas de ar, e se se verificar que realmente a saturação é completa então significa que será necessário utilizar um tubo menos deformável.

O volume V_1 dado pela diferença entre o volume para $P = 2500$ kPa e o volume correspondente ao ponto E, o qual é obtido da intersecção da tangente à curva no ponto C com a recta horizontal para uma pressão de 0 kPa.

4.2 – VOLUME INICIAL (ZERO) DA SONDA

O estabelecimento do valor correspondente ao zero de volume da sonda é extremamente importante porque todos os ensaios têm de começar com o mesmo volume em vazio da sonda. O procedimento para a determinação deste valor parte do final da fase da verificação da saturação e fugas, sendo o passo seguinte o esvaziamento da sonda ou seja

diminuição da pressão, a qual se encontrava a 2500 kPa. Uma vez atingido um volume que permita a saída da sonda do tubo de calibração apenas com a ajuda das mãos, então esse será o valor do volume inicial (zero) de partida da sonda antes de um ensaio. O procedimento é rápido e simples, mas só é válido se se verificar a condição imposta em 4.1.

Estando estabelecido o volume zero da sonda, a origem da escala dos volumes é considerada nesse ponto e para se colocar o volume da sonda com o valor inicial correcto será apenas necessário adicionar ou retirar água

4.3 – SISTEMA DE COMPRESSIBILIDADE

Por forma a efectuar a calibração do sistema de compressibilidade, ou seja a calibração do volume de perdas do sistema, a sonda é colocada mais uma vez no tubo de calibração procedendo-se de novo ao incremento de pressão.

A pressão é levada aos 500 kPa, 1500 kPa e 2500 kPa, permanecendo 30 segundos em cada um dos patamares de pressão indicados e retirando-se o valor do volume no final do tempo referido. Com estes valores traça-se a curva pressão-volume da Fig. 12, sendo a curva da perda de volume obtida com base nesta. Assim, e para uma determinada pressão P, o volume V_2 corresponde à perda de volume que ocorre durante a expansão do sistema pressiométrico.

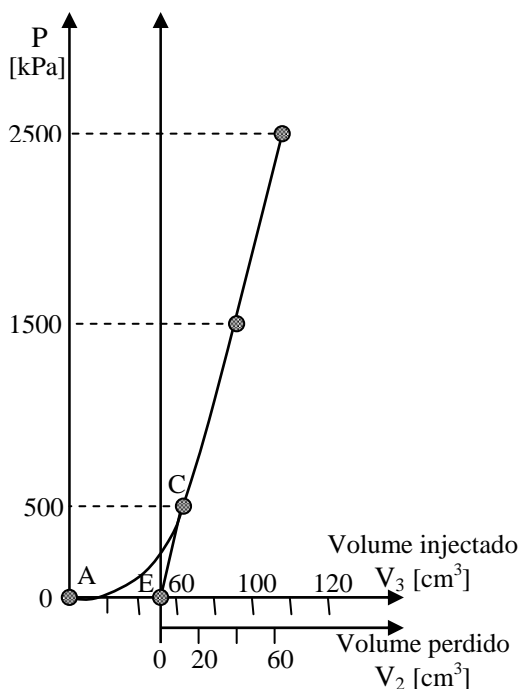


Fig. 12 – Curva de correcção do sistema de compressibilidade

Deste modo o volume V_2 que é injectado no sistema, não provoca nenhum incremento de volume na sonda dado que a esta se encontra dentro do tubo de aço rígido, e conseqüentemente também não provocará um aumento de volume da cavidade no solo durante o ensaio. Como tal este valor de volume V_2 deve ser descontado ao valor do volume lido ou registado V_3 durante a realização do ensaio pressiométrico.

A calibração do sistema de compressibilidade é muito similar à verificação da saturação e fugas, aplicando-se também para este a mesma condição que para o indicado em 4.1.

4.4 – CALIBRAÇÃO DA MEMBRANA

No final da calibração do sistema de compressibilidade a sonda é esvaziada até ser restabelecido o volume V_0 da mesma e é retirada do tubo. De seguida e antes de se proceder à calibração da resistência que a membrana opõe ao movimento/dilatação, a qual é realizada à pressão atmosférica e ao nível a que estão situados os manómetros de pressão, obriga-se a membrana a trabalhar. Para tal realizam-se no mínimo três expansões e descompressões da sonda.

Quanto ao procedimento propriamente dito, este consiste na expansão da sonda até ao seu máximo valor de volume, quer por iguais incrementos de pressão (método A), quer por iguais incrementos de volume (método B). No método A serão utilizados incrementos de 10 kPa, enquanto que no método B os incrementos de volume serão de 10% do volume V_0 . Cada patamar de pressão ou volume são aplicados durante 1 minuto, sendo as leituras de pressão e volume correspondente efectuadas no final de cada passo. Com base neste ensaio obtém-se a curva da Fig. 13, na qual para um dado volume V_4 está-lhe associada uma pressão P_4 .

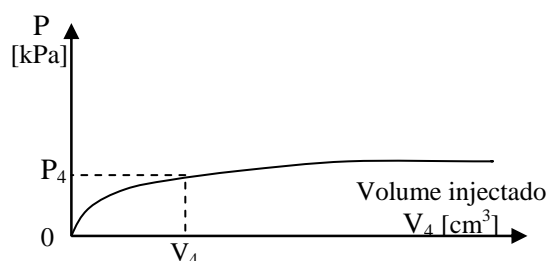


Fig. 13 – Calibração da membrana

Esta pressão existirá dentro da sonda, mas não fora dela, dado que a mesma está apenas em contacto com o ar, e assim sendo, a pressão P_4 deve ser subtraída ao valor da pressão P_3 lida durante a execução do ensaio pressiométrico, uma vez que na

realidade está não está a ser exercida contra as paredes da cavidade.

Um valor corrente da resistência que uma membrana opõe à deformação, numa sonda submetida ao seu valor máximo de dilatação, é de aproximadamente 100 kPa.

5 – METODOLOGIA DO ENSAIO

Após efectuada a calibração do equipamento procede-se à realização do ensaio pressiométrico, sendo a profundidade ou cota deste correspondente à profundidade a meio da sonda. Durante o ensaio, e tal como referido na calibração da membrana, a sonda pode ser expandida em séries de incrementos de igual pressão (método A) ou de igual volume (método B). No caso de se utilizar o método A então será necessário antecipar a pressão máxima que o solo a ensaiar pode suportar, a qual pode ser estimada com base no Quadro I.

Os incrementos de pressão deverão ser todos iguais, sendo o seu valor de sensivelmente um dez avos (1/10) do valor estimado para a máxima pressão aplicável ao solo. Cada incremento de pressão ΔP é aplicado durante 1 minuto, além do tempo necessário para que ele atinja o patamar de pressão pretendido, o que significa que teoricamente o ensaio estaria concluído ao fim de aproximadamente 10 minutos. Na realidade verifica-se que a pressão máxima do solo é atingida entre os 7 e 14 incrementos.

Solos		PMT P [MPa]	N _{SPT} [panc./30cm]	Su (corte UU) [kPa]
Areia	Solta	0 – 0,5	0 – 10	
	Média	0,5 – 1,5	10 – 30	
	Densa	1,5 – 2,5	30 – 50	
	Muito densa	> 2,5	> 50	
Argila	Mole	0 – 0,2		0 – 25
	Firme	0,2 – 0,4		25 – 50
	Rija	0,4 – 0,8		50 – 100
	Muito rija	0,8 – 1,6		100 – 200
	Dura	> 1,6		> 200

Quadro I – Estimativa do valor da pressão máxima de um solo (Briaud, 1992)

As leituras do volume injectado correspondentes a cada ΔP deverão ser efectuadas aos 30 segundos V_{30} e 60 segundos V_{60} (1 min). Destas leituras resultarão dois gráficos, em que um deles traduz a relação entre a pressão aplicada e o volume final injectado V_{60} , e o outro traduz a relação entre a pressão e a diferença de volume registada entre os 60 e 30 segundos ($V_{60} - V_{30}$).

Deste último gráfico – Fig. 14, o que indica a evolução de $V_{60} - V_{30}$ com o nível de pressão, é possível retirar o valor de pressão para o qual o solo entra em cedência P_y , que tem início quando a curva sofre um aumento significativo de $V_{60} - V_{30}$ (ponto A).

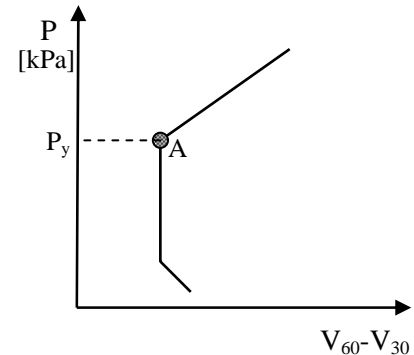


Fig. 14 – Relação de P com $V_{60} - V_{30}$

No caso do método B, os incrementos de volume são iguais a um quarenta avos de V_0 ($V_0/40$), sendo o tempo de aplicação de cada patamar de volume de 15 segundos, além do tempo necessário para que seja atingido o volume pretendido. Para cada incremento de volume faz-se a leitura da pressão correspondente ao fim dos 15 segundos P_{15} , e com estes valores traça-se a curva que traduz a evolução do volume injectado com a pressão. A sonda atinge o dobro do seu volume inicial após 40 incrementos de volume, ou seja passados aproximadamente 10 minutos ($40 \times 15s = 600s$).

Faz ainda parte do procedimento habitual efectuar-se um ciclo de descarga-recarga na parte final do troço linear da curva pressiométrica, a qual é perceptível se se tiver em atenção a evolução dos incrementos de volume ΔV_{60} no caso do método A, ou os incrementos de pressão ΔP_{15} no caso do método B. Estes incrementos mantêm-se sensivelmente constantes durante a fase de ensaio que corresponde à parte linear da curva, sofrendo um aumento ou decréscimo assim que ocorra a cedência do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM Standard D4719-87. (1988). "Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soils". Annual book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials. Vol. 04.08. Philadelphia.
- Baguelin F.; Jézéquel J.F.; Shields D.H. (1978). "The Pressuremeter and Foundation Engineering". Series on Rock and Soil Mechanics - Vol. 2, nº4 - first edition. Trans Tech Publications.

- Briaud J. L.** (1979). *"The Pressuremeter: Application to Pavement Design"*. PH.D. Dissertation, Civil Engineering. University of Ottawa.
- Briaud J. L.** (1992). *"The Pressuremeter"*. Published by Balkema, Rotterdam.
- Jézéquel J.F.; Lemasson H.; Touze J.** (1968). *"Le pressiometre Louis Ménard: Quelques Problemes de Mise en Oeuvre et leur Influence sur les Valeurs Pressiométriques"*. Bulletin Liaison Laboratoire Routiers des Ponts et Chaussées, n°32.
- Ménard L.** (1963). *"Calcul de la Force Portante des Fondations sur la Base des Resultats des Essais Pressiométriques"*. Sols-Soils, vol. 2, n° 5 (Junho).
- Oyo Corporation** (1983). *"Lateral load tester (LLT) - Operation Manual"*. Internal document, Houston.
- Oyo Corporation** (1983). *"Elastmeter 100 - Operation Manual"*. Internal document, Houston.
- Wroth C.P.** (1982). *"British Experience With the Selfboring Pressuremeter"*. Symposium on the Pressuremeter and Its Marine Applications. Institut Français du Pétrole. April. Paris.
- Wroth C.P.; Hughes J.** (1973). *"An Instrument for the In Situ Measurements of the Properties of Soft Clays"*. International Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow.