

AValiação Numérica da Importância da Variabilidade Espacial do Terreno nos Resultados dos Ensaios Pressiométricos de Ménard em Areias

NUMERICAL EVALUATION OF THE GROUND SPACIAL VARIABILITY INFLUENCE ON THE RESULTS OF MÉNARD PRESSUREMETER TESTS IN SANDS

Bilé Serra, João, *LNEC, Lisboa, Portugal, biles@lnec.pt*
Miranda, Luís, *LNEC, Lisboa, Portugal, lmiranda@lnec.pt*

RESUMO

A simplicidade das condições de fronteira práticas em torno da cavidade de ensaio pressiométrico, permite o uso de técnicas interpretativas algébricas baseadas na teoria da expansão da cavidade cilíndrica, admitindo a homogeneidade do terreno. Para avaliar a importância da heterogeneidade nos resultados do ensaio em terrenos arenosos, começa-se por analisar, para um meio homogéneo, a sensibilidade aos parâmetros do modelo de resistência de Mohr-Coulomb e aos de deformabilidade. Elaborou-se um modelo axissimétrico de deformação plana com o programa FLAC. A hipótese da homogeneidade é seguidamente relaxada com consideração de campos estocásticos gaussianos com correlação espacial dos parâmetros mais influentes. A dependência dos resultados do ensaio pressiométrico relativamente às características daquela variação é, então, avaliada.

ABSTRACT

During a pressuremeter test the relative simplicity of the practical boundary conditions around the cavity allows the use of interpretative techniques based on the theory of expansion of cylindrical cavity. However, one of the fundamental underlying assumptions is the homogeneity of the ground. To assess the importance of ground heterogeneity in the case of coarse dense ground on the results of the test the authors address, for a homogeneous medium, the sensitivity of the results to the variation of both the parameters of the Mohr-Coulomb model and those of deformability. For that, an axisymmetric plane strain model was used with the program FLAC. The hypothesis of homogeneity is then relaxed with consideration of Gaussian stochastic fields with negative exponential spatial correlation of the most influential parameters. The dependence of pressuremeter test results for the characteristics of those stochastic fields is then evaluated.

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios pressiométricos de Ménard constituem, a par dos ensaios CPTu, uma das vias mais ricas para a caracterização geotécnica dos terrenos. A relativa simplicidade das condições de fronteira teóricas – admitidas – em torno da cavidade possibilita o recurso a soluções analíticas muito potentes e bastante flexíveis para a interpretação dos resultados. No entanto, subjacentes a estes métodos encontram-se duas hipóteses fundamentais: a homogeneidade do terreno e a altura infinita da cavidade pressiométrica. Considerando que a razão altura/diâmetro da sonda pressiométrica de Ménard é próxima de seis, a validade da segunda hipótese é parcialmente questionável, em especial em terrenos brandos ou fracamente sobre-consolidados. A validade da primeira hipótese depende das condições de formação do terreno ensaiado. A presente

comunicação versa a influência da heterogeneidade nos resultados do ensaio pressiométrico, concretamente, a forma da curva de ensaio, o ângulo de resistência interna e o módulo de deformabilidade inicial.

2. BREVE DESCRIÇÃO DO ENSAIO PRESSIOMÉTRICO

O pressiómetro de Ménard permite obter a resposta de um maciço a uma variação de pressão na parede dum furo, o que se traduz numa curva pressão vs. variação volumétrica. O pressiómetro é constituído por uma sonda cilíndrica para aplicação duma pressão uniforme à parede da cavidade em que é colocado, uma haste, um cabo e equipamento à superfície (fonte de pressão, unidade de controlo e *data logger*). Este equipamento inclui-se na classe dos pressiómetros pré-perfurados (PBP), instalados em cavidades especialmente criadas para o ensaio de pressiómetro a partir da base de um furo de sondagem. Contém 3 células de expansão: uma célula central de ensaio que é cheia de água e 2 células de guarda pressurizadas a ar, para assegurar que a expansão da célula de ensaio não seja afectada pelos efeitos de fronteira. A capacidade de deformação volumétrica é de 53%, com um diâmetro de 74 mm e a razão L/D é igual a 6.5.

O ensaio é constituído por 3 fases: fase de carga virgem, fase de descarga-recarga e fase de descarga final. Na zona linear da fase de carga virgem, é possível obter o valor do módulo pressiométrico de Ménard. A fase de descarga-recarga tem como objectivo primordial a obtenção da rigidez de corte do solo na gama de distorção envolvida no ciclo. As grandezas medidas durante o ensaio deverão ser corrigidas, para ter em consideração a pressão hidrostática confinante, a leitura inicial, a compressibilidade do sistema e a rigidez da membrana. O ensaio de Ménard é usado para obter os seguintes parâmetros empíricos de projecto: o módulo pressiométrico de Ménard e a pressão limite. Para além dos parâmetros do método directo de projecto, em areias permite estimar o módulo de distorção na descarga-recarga, o ângulo de resistência interna e o ângulo de dilatância.

A expansão do pressiómetro é assimilada à expansão dum cilindro infinitamente longo numa massa de solo infinita. Na prática, a primeira premissa é uma aproximação devido ao comprimento finito do pressiómetro, mas permite simplificar o problema teórico interpretativo do ensaio com pressiómetro.

3. O PROBLEMA DA EXPANSÃO DA CAVIDADE CILÍNDRICA E SUAS SOLUÇÕES ANALÍTICAS

A teoria da expansão de cavidade é particularmente relevante em Geotecnia. Trata do estudo da variação do estado de tensão, da pressão intersticial e dos deslocamentos causados pela expansão duma cavidade cilíndrica ou esférica. No âmbito da interpretação do problema da cavidade cilíndrica possui especial relevância para o ensaio pressiométrico. Dele são conhecidas diversas soluções, distinguíveis entre si pelo tipo e pelas hipóteses de base: soluções algébricas ou numéricas, e soluções com ou sem assunção de linearidade mecânica e/ou geométrica.

As soluções algébricas do problema da expansão da cavidade cilíndrica radicam na admissão de algumas hipóteses simplificativas, concretamente: (1) que o terreno é um meio contínuo, homogéneo e isotrópico, (2) que o estado de tensão inicial é hidrostático, (3) que a cavidade tem comprimento infinito e (4) que a expansão se processa a taxa suficientemente lenta para permitir dissipação integral da variação da pressão intersticial induzida pela expansão (situação drenada). No âmbito destas hipóteses, a expansão duma cavidade cilíndrica em solos é um problema de valores de fronteira com simetria radial em torno do eixo vertical, por conseguinte abordável em

termos de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) . A equação de equilíbrio radial reduz-se à consideração das tensões radial e circunferencial, sujeitas às duas condições de fronteira na parede da cavidade ($r = a$) e para qualquer distância fora da influência da cavidade ($r \rightarrow \infty$):

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \sigma_r = 0 \quad r = a; \sigma_r \rightarrow p_0 \quad r \rightarrow \infty \quad [1]$$

Se admitida a hipótese de linearidade geométrica, o estado de deformação fica definido pelas extensões lineares, em que u corresponde ao deslocamento radial total,

$$\varepsilon_r = -\frac{du}{dr}; \varepsilon_\theta = -\frac{u}{r}; \varepsilon_z = 0 \quad [2]$$

Tendo em conta a prevalência das condições de deformação plana, a variação da componente σ_z fica totalmente dependente da tensão normal média no plano horizontal.

Em domínio elástico, a solução do problema é clássica (Timoshenko e Goodier, 1970):

$$\sigma_r(r) = p_0 + (p - p_0) \left(\frac{a}{r}\right)^2; \sigma_\theta(r) = p_0 - (p - p_0) \left(\frac{a}{r}\right)^2; u(r) = \frac{p - p_0}{2G} \left(\frac{a}{r}\right)^2 r \quad [3]$$

As extensões radial e circunferencial são simétricas, pelo que a deformação se processa a volume constante. As variações de tensão, relativamente ao estado geo-estático são dadas por

$$\Delta \sigma_r(r) = 2G \varepsilon_c \frac{a_0 a}{r^2}; \Delta \sigma_\theta(r) = -\Delta \sigma_r(r) \quad [4]$$

Na parede da cavidade cilíndrica, é válida a seguinte expressão aproximada:

$$\Delta \sigma_r \approx 2G \varepsilon_c \Leftrightarrow G = \frac{1}{2} \frac{dp}{d\varepsilon_c} = V_0 \frac{dp}{dV} \quad [5]$$

em que ε_c representa a extensão ε_θ na parede, denominada extensão da cavidade,

$$\varepsilon_c = \varepsilon_\theta(r = a_0) = \frac{a - a_0}{a_0} = \frac{1}{2} \frac{dV}{V_0} \quad [6]$$

Diversas soluções algébricas podem ser encontradas na bibliografia para a expansão elasto-plástica da cavidade recorrendo ao critério de Mohr-Coulomb (M-C). Na sua grande maioria, o estado de deformação é assumido como exclusivamente plástico, face à supostamente reduzida expressão relativa da parcela elástica de deformação. Também, maioritariamente é admitida a hipótese dos pequenos deslocamentos, impondo que o deslocamento radial da parede da cavidade $u(r = a)$ seja pequeno em comparação com o raio inicial a_0 . Neste grupo podemos encontrar as soluções de Vesic (1972), Hughes *et al.* (1977) e Carter *et al.* (1986). O terreno é assumido como sendo isotrópico, elasto-perfeitamente plástico com critério de cedência M-C. Previamente à cedência-plastificação o comportamento elástico segue a lei de Hooke.

Hughes *et al.* (1977) apresentaram uma formulação de pequenas deformações para determinação dos ângulos de resistência interna ϕ e de dilatação ψ a partir dos resultados do ensaio pressiométrico e do conhecimento do ângulo de atrito da areia no estado crítico. Baseia-

-se na hipótese de invariância de ϕ e ψ durante a expansão, apesar da variação do índice de vazios da areia. Deduziram uma forma teórica linear para a equação da curva experimental bi-logarítmica, com ordenada na origem A e declive S relacionado com ϕ e ψ pela equação [9]

$$\ln p' = S \ln \varepsilon_c + A \quad [7]$$

$$S = (1 + \sin \psi) \frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad [8]$$

Recorreram à lei de dilatação de Rowe (Rowe, 1966) para relacionar ϕ e ψ através do ângulo de atrito no estado crítico, ϕ_{cv} , pelo que, sendo este conhecido ou estimado, se pode escrever

$$\sin \phi = \frac{S}{1 + (S - 1) \sin \phi_{cv}} \quad [9]$$

$$\sin \psi = S + (S - 1) \sin \phi_{cv} \quad [10]$$

A razão comprimento/diâmetro típica dos pressiómetros é próxima de 6, pelo que os efeitos bi-dimensionais num ensaio pressiométrico podem não ser desprezáveis. A forma mais conveniente de o fazer é através de modelos axi-simétricos (bidimensionais) com consideração explícita da geometria do pressiómetro.

4. SENSIBILIDADE DA CURVA PRESSIOMÉTRICA RELATIVAMENTE AOS PARÂMETROS DO MODELO MOHR-COULOMB. CASO DE ESTUDO

Com a finalidade de identificar os parâmetros mais influentes na resposta pressiométrica em areias, idealizou-se um cenário de referência com parâmetros M-C indicados no Quadro 1, o qual poderá corresponder a uma areia fina, de grão arredondado quartzítica. O ângulo de resistência interna no estado crítico, ϕ_{cv} , é igual a 30°. Os valores de ϕ (ou, equivalentemente, os valores de ψ) foram estimados pela relação

$$\phi = \phi_{cv} + 0.8 \psi \quad [11]$$

O índice de vazios da areia é igual a 0.65 e o peso volúmico é igual a 16.23 kN/m³. No estado de tensão inicial (isotrópico), o valor da tensão efectiva isotrópica p_0 é de 81 kPa, correspondendo ao peso das terras à profundidade de ensaio de 5 m. Consideram-se, ainda, os cenários 0 e 2, correspondentes, respectivamente, a estados menos e mais denso do que o de referência, caracterizam-se pelos valores também apresentados no Quadro 1. Uma nota importante reside no facto de entre as variações reportadas no Quadro 1, a variação do módulo de Young corresponder a um desvio estatístico de maior significado do que os restantes.

Quadro 1- Gama de Valores dos Parâmetros Mohr-Coulomb

Cenário\Parâmetro	ϕ (°)	ψ (°)	ν	E (MPa)
Valores inferiores (0)	32.4	3	0.35	110.8
Referência (1)	35.6	7	0.35	138.5
Valores superiores (2)	39.6	12	0.35	173.1

Apresentam-se resultados de 7 cálculos, com os parâmetros indicados no Quadro 2. A designação dos cálculos resultam da composição de três algarismos para formar códigos abc, em que cada algarismo corresponde, pela mesma ordem, a cada um dos elementos do conjunto (ϕ, ψ, E). Assim, por exemplo, o cálculo 112 foi efectuado com os valores do cenário 1 (de

referência) de ϕ e de ψ e com o valor de E do cenário 2. É de referir que não se pretende com estes cálculos averiguar as diferenças de resposta entre os três cenários. Antes, se pretende avaliar a influência relativa da alteração exclusiva de cada parâmetro relativamente ao estado de referência. Por outras palavras, os cálculos não correspondem a situações verosímeis: por exemplo, ao aumento de ϕ deverão corresponder aumentos dos valores de ψ e de E , uma vez que os três parâmetros são condicionados pela densidade relativa da areia e pelas propriedades no estado crítico.

Quadro 2- Códigos e Valores dos Parâmetros nos Cálculos

Cálculo	ϕ (°)	ψ (°)	E (MPa)	ν	Código gráfico
111	35.6	7	138.5	0.35	—
011	32.4	7	138.5	0.35	- -
211	39.6	7	138.5	0.35	—
101	35.6	3	138.5	0.35	- -
121	35.6	12	138.5	0.35	—
110	35.6	7	110.8	0.35	- -
112	35.6	7	173.1	0.35	—

De acordo com a hipótese sobre o comprimento infinito da cavidade, o problema possui simetria radial homogênea (não varia com a cota z) pelo que é passível de análise por um modelo numérico uni-dimensional axissimétrico, com validade da condição de deformação plana em planos horizontais (Miranda e Serra, 2010). Para esse efeito recorreu-se a uma malha de diferenças finitas com largura igual a 60 vezes o raio de 37 mm da cavidade (cf. Figura 2) e ao programa FLAC. Na Figura 2 ilustra-se a largura da zona plastificada, cerca de 10 vezes o raio da cavidade, para o cálculo 011.

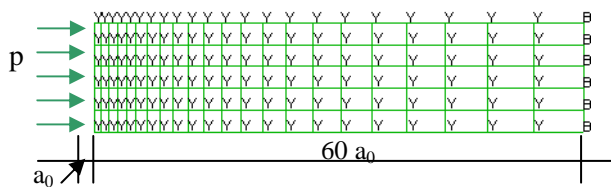


Figura 1 – Malha de Diferenças Finitas com Indicação das Restrições Impostas ao Deslocamento (Y- Vertical e B- Horizontal e Vertical)

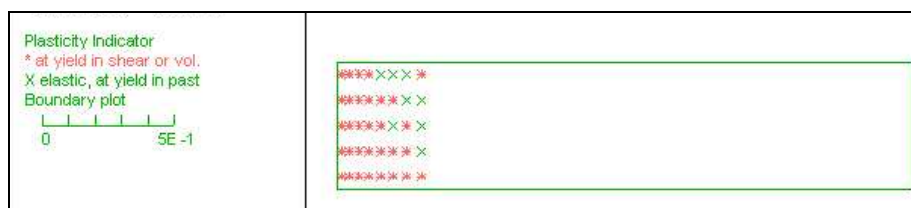


Figura 2 – Zona de Plastificação em Torno da Cavidade (Cálculo 011)

A Figura 3 representa a curva adimensionalizada $(u/a_0, p/p_0)$ para os diversos cálculos, sendo a situação de referência representada pela curva azul. O código de cores, legenda das curvas desta figura, é o indicado no Quadro 2. As curvas na Figura 3 ilustram a influência nos resultados dos ensaios pressiométricos em areias de qualquer dos parâmetros considerados. Na variação aqui considerada foi preservada a hipótese fundamental de homogeneidade do “terreno” Uma vez certificada aquela influência, afigura-se pertinente abandonar esta hipótese e substituir a variação discreta individual e arbitrária – embora judiciosa – dos parâmetros pela respectiva variabilidade espacial.

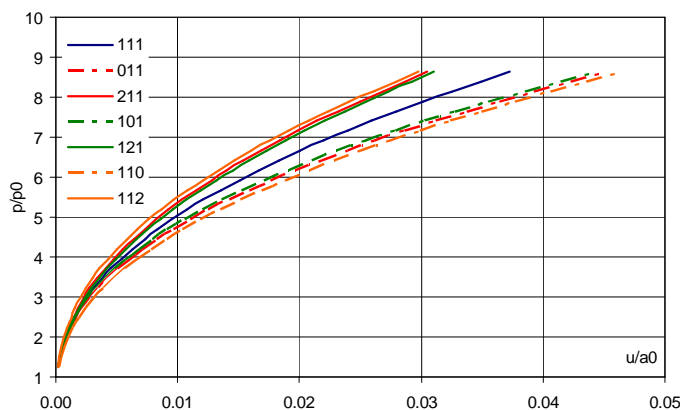


Figura 3 – Curvas Pressiométricas Adimensionalizadas ($u/a_0, p/p_0$): a) Efeito de Variação de ϕ , b) Efeito de Variação de ψ , e c) Efeito de Variação de E (cf. Quadro 1 para Código de Cálculos).

5. CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA AREIA EM TORNO DA CAVIDADE PRESSIOMÉTRICA

A natureza tendencialmente contínua dos processos físico-químicos e mecânicos de gênese e de evolução dos terrenos favorece a existência de correlação espacial entre os valores de qualquer grandeza geotécnica. Por esta razão, torna-se imperioso incluir a correlação espacial no modelo de variabilidade espacial pretendido. Cada terreno, isto é, o conjunto de valores das grandezas geotécnicas, pode ser interpretado como uma realização dum processo estocástico, para cujo estudo a Teoria dos Campos Aleatórios (Vanmarcke, 1984) constitui uma das vias preferenciais. Esta via tem sido levada à prática através de diversas formulações teóricas, de que se destacam as baseadas na transformada rápida de Fourier espacial (Fenton, 1990).

5.1. Medianização de Parâmetros

A resposta do terreno no decurso da expansão pressiométrica é primeiramente condicionada pelas características médias em torno da cavidade em detrimento do condicionamento pelos valores pontuais. Considere-se, então, o processo estocástico escalar $e(x)$, em que x representa a posição, com propriedades, habituais no domínio do estudo dos campos aleatórios: homogeneidade, isotropia, ergodicidade e estacionaridade de 2ª ordem. Os seus parâmetros são, assim, a média μ_e , a variância σ_e^2 e a função de auto-correlação espacial $R_e(\tau)$ (Baecher e Christian, 2003). O processo média espacial na janela de medianização $[0, X]$ é definido por:

$$M_X(e(x)) = \frac{1}{X} \int_0^X e(x) dx \quad [12]$$

Os respectivos momentos ordinários de ordem um e dois podem ser determinados a partir das respectivas média e variância, dadas por

$$E[M_X] = \mu_{M_X} = \frac{1}{X} \int_0^X \mu_e dx = \mu_e \quad [13]$$

$$\sigma_{M_X}^2 = \frac{2}{X^2} \int_0^X (X - \tau) C_e(\tau) d\tau \quad [14]$$

em que $\tau = |x - x'|$ representa a distância entre os pontos x e x' e $C_e(\tau)$ representa a função de auto-covariância de $e(x)$. O processo média no comprimento de referência X é um recurso indispensável na modelação em Geotecnia para a definição de sub-domínios “homogéneos”. Introduce um alisamento nas propriedades estudadas, que se manifesta pela diminuição da dispersão e pelo aumento da correlação espacial do processo média relativamente ao processo pontual $e(x)$. A redução de dispersão devido à medianização pode ser caracterizada pela função de redução de variância do processo média,

$$\Gamma_e^2(X) = \frac{V[M_X(e(x))]}{V[e(x)]} \quad [15]$$

cujos valores decorrem directamente da função de auto-correlação $R_e(\tau)$ e da largura da janela de medianização X :

$$\Gamma_e^2(X) = \frac{2}{X^2} \int_0^X (X - \tau) R_e(\tau) d\tau \quad [16]$$

É, assim, indispensável definir a forma da correlação espacial para determinar $\Gamma_e^2(X)$. De entre as possíveis opções a correlação exponencial negativa é a mais utilizada, dada a simplicidade da sua estimativa experimental. Neste caso (Vanmarcke, 1984), tem-se como parâmetro a distância de correlação espacial δ , vindo a função $\Gamma_e^2(X)$ definida por [19]

$$R_e(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau}{\delta}\right) \quad [17]$$

$$\Gamma_e^2(X) = 2\left(\frac{\delta}{X}\right)^2 \left(\frac{X}{\delta} - 1 + \exp^2\left(-\frac{X}{\delta}\right)\right) \quad [18]$$

A escala de flutuação ou distância (efectiva) de correlação θ_e do processo $e(x)$ representa a distância acima da qual a função $R_e(\tau)$ decai para valores inferiores a $1/e^2$.

5.2. Variabilidade Reportada na Bibliografia

Uma das dificuldades práticas para a implementação dos métodos baseados em campos aleatórios na Geomecânica é a caracterização experimental da variabilidade. Apesar do sistemático enviesamento por excesso – fruto de se englobar na variabilidade espacial, a dispersão devida a outras causas – as fontes de informação bibliográfica são, para aquele fim, indispensáveis.

Phoon e Kulhawy (1999) referem valores estatísticos relativos ao ângulo de resistência interna ϕ e à sua tangente, e que no intervalo $[35^\circ, 41^\circ]$ o coeficiente de variação se situa entre 5% e 11%. A informação publicada sobre a escala de flutuação é significativamente mais reduzida do que a relativa ao coeficiente de variação. No entanto, Phoon e Kulhawy (1999) evidenciam que a escala de flutuação na direcção horizontal é cerca de uma ordem de grandeza superior à da direcção vertical, confirmando que a variabilidade vertical é mais importante que a variabilidade horizontal. Ainda, segundo Harr (1987) citando Schultze (1972), o coeficiente de variação do ângulo de resistência interna em areias é de 12%. A variabilidade dos ângulos ϕ e ψ está intimamente ligada, dada a relação física entre ambos.

6. CASO DE ESTUDO COM VARIABILIDADE LOCAL GAUSSIANA E CORRELAÇÃO ESPACIAL DO TIPO EXPONENCIAL

Para avaliar a importância da heterogeneidade de parâmetros na curva pressiométrica adoptou-se um modelo de variabilidade local gaussiana e de correlação espacial exponencial negativa. Para tal, considerou-se um campo escalar estocástico $z(x)$ gaussiano com média nula e variância unitária e comprimento de flutuação θ_z . Foram geradas cem realizações de $z(x)$, a partir das quais foram gerados os campos $\phi(x)$ e $E(x)$ por translação de média e escalonamento do desvio padrão. Exemplificando, para $\phi(x)$ tem-se

$$\phi(x) = \mu_\phi (1 + z(x) cv_\phi) \quad [19]$$

em que μ_ϕ e de cv_ϕ representam a média e o coeficiente de variação de $\phi(x)$. Foram considerados dois cenários de intensidade de dispersão pontual: baixa e intermédia. Os valores médios dos parâmetros correspondem ao cenário de referência (1) (cf. Quadro 1). Os respectivos coeficientes de variação (cf. Quadro 3) são estabelecidos de acordo com a revisão bibliográfica acima referida.

Quadro 3- Média e Coeficiente de Variação dos Campos Aleatórios

Parâmetro\Variabilidade	Baixa		Intermédia
	μ	cv (%)	cv (%)
$\phi(x)$ (°)	35.6	5	8
$E(x)$ (MPa)	138.5	8	12

No que respeita à correlação espacial adoptou-se o comprimento de flutuação θ de 4 m para ambos os parâmetros. Afigura-se como razoável que θ dependa do parâmetro em consideração. Optou-se, por simplificação, que seriam iguais. O campo de valores de cada parâmetro foi gerado por um processo sequencial de alisamento por média móvel e por seccionamento por blocos. Inicia-se pela geração duma realização com um espaçamento de 10 cm, seguida da aplicação duma média móvel homogénea de raio 2 (alisamento). Finalmente, foram definidos os valores dos parâmetros pela escolha dum valor representativo para os blocos delimitados sucessivamente pelas distâncias 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.8 e 2.2 m, como se ilustra na Figura 4 para a definição da realização 7 (dispersão intermédia) do ângulo ϕ .

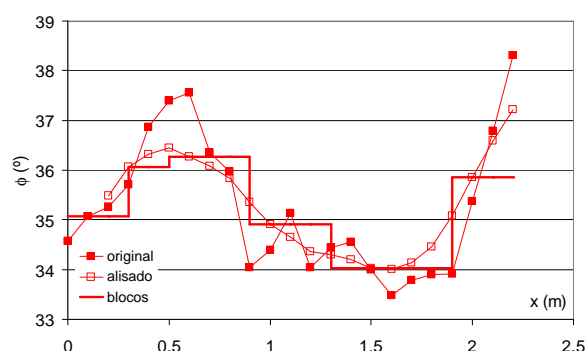


Figura 4 – Ilustração do Processo de Alisamento e Seccionamento por Blocos

Num ensaio pressiométrico de Ménard a realização do pré-furo causa perturbação na areia, pelo que será de esperar que na proximidade imediata do furo se encontrem valores mais altos de índice de vazios e, por conseguinte, mais baixos de rigidez e de resistência. Por este motivo, na

selecção das realizações dos três parâmetros em análise, foi dada preferência às realizações em que nas primeiras dezenas de centímetros ocorressem valores inferiores à respectiva média.

Apresentam-se nas Figuras 5 a 7 as curvas correspondentes a três tipos distintos de realizações de parâmetros ϕ , ψ e E , numeradas de acordo com a selecção efectuada. Nelas, os gráficos à direita (b) correspondem à situação de variabilidade intermédia. Admitindo que a variabilidade assumida para cada parâmetro espelha a variabilidade – ao menos relativa – dos parâmetros analisados, podem formular-se algumas observações úteis.

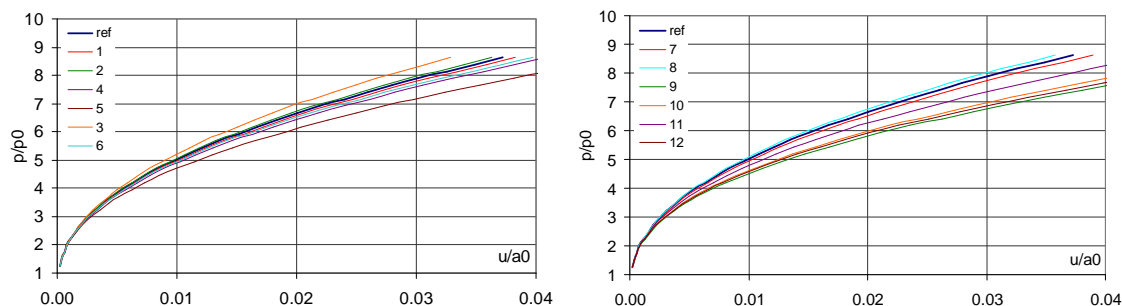


Figura 5 – Curvas Pressiométricas com Realizações de ϕ e ψ : a) Var. Reduzida e b) Var. Intermédia

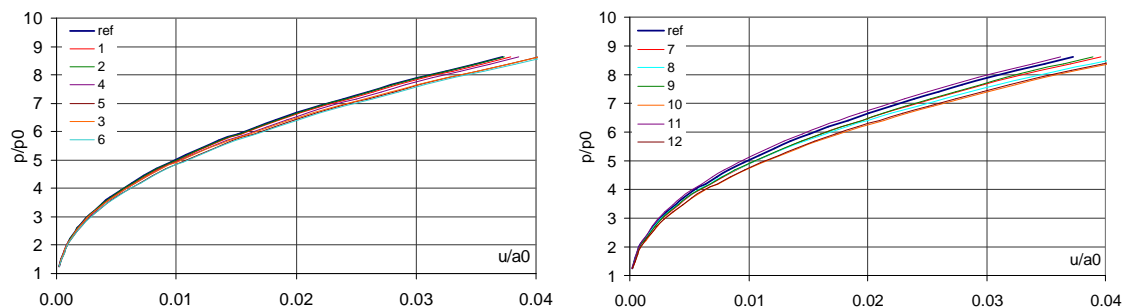


Figura 6 – Curvas Pressiométricas com Realizações de E : a) Var. Reduzida e b) Var. Intermédia

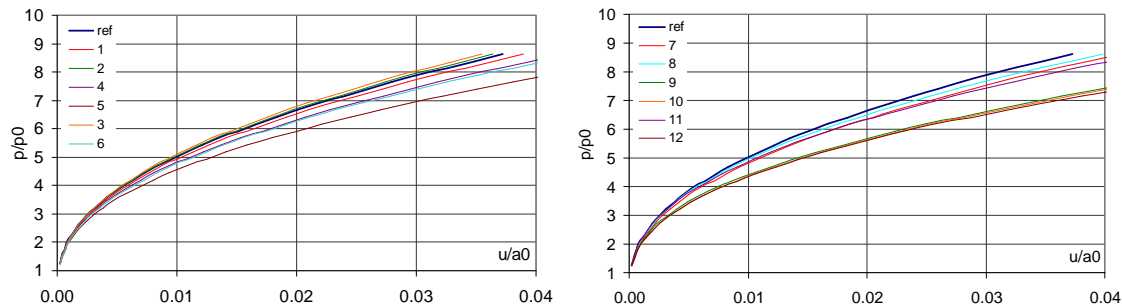


Figura 7 – Curvas Pressiométricas com Realizações de ϕ , ψ e E : a) Var. Reduzida e b) Var. Intermédia

A variação, relativa à situação de referência (1), das curvas pressiométricas obtidas com as realizações estocásticas dos ângulos ϕ e ψ é mais expressiva do que a correspondente às realizações do módulo E . Esta conclusão é válida para ambas as intensidades de variação consideradas. No caso dos terrenos arenosos, a variabilidade destes parâmetros da mineralogia, da forma e dimensão dos grãos – aspectos condicionantes do estado crítico do solo – e da densidade relativa – condicionante do ângulo de resistência interna e do ângulo de dilatação. Assumindo que num dado enquadramento geológico os primeiros aspectos sejam invariáveis, resta como causa de variabilidade a densidade relativa, que influencia os valores de ϕ , ψ e E . Deste modo, a consideração simultânea de realizações de ϕ , ψ e E , deverá corresponder

melhor à realidade. Foram estimados os valores de ϕ e de E , cujos intervalos de variação para as curvas apresentadas na Figura 7 são resumidos no Quadro 4

Quadro 4 – Intervalos de Variação dos Parâmetros Interpretados

Parâmetro\Variabilidade	Baixa		Intermédia	
	min	max	min	max
ϕ (°)	31.9	33.7	31	33
E (MPa)	115	147	103	140

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente comunicação abordou-se a problemática da interpretação de ensaios pressiométricos de Ménard em areia densa, considerando variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos ângulo de resistência interna de Mohr-Coulomb, ângulo de dilatância e módulo de Young em elasticidade isotrópica. Ilustrou-se a sua influência na curva pressiométrica através do recurso a soluções analíticas recentes e a um modelo numérico com assunção de material elasto-perfeitamente plástico de Mohr Coulomb com elasticidade linear e fluxo não associado.

A remoção da hipótese da homogeneidade do terreno, motivou o recurso à Teoria dos Campos Aleatórios para gerar realizações de parâmetros M-C, com base nas quais foi possível avaliar a importância da variabilidade do terreno, sempre no âmbito duma distribuição gaussiana desses parâmetros. Com base em fontes bibliográficas da especialidade, foram adoptados dois cenários de dispersão (reduzida e intermédia) com um comprimento de flutuação constante de 4 m. Os cálculos efectuados com um modelo axissimétrico de deformação plana em planos horizontais permitiu ilustrar a influência relativa da dispersão com correlação espacial de cada um dos parâmetros referidos. Esta influência foi analisada no que se refere à curva pressiométrica no domínio das pequenas deformações e no valor estimado do ângulo de resistência interna e do módulo de deformabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baecher, G. B., Christian, J. T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA
- Carter, J. P., Booker, J. R., Yeung, S. K. (1986). Cavity expansion in cohesive frictional soils. *Geotechnique* 36, No. 3, pp. 349-358.
- Fenton, G (1990). *Simulation and Analysis of Random Fields*, Ph. D. Thesis, Princeton University, Princeton, New Jersey.
- Harr, M. E. (1987). *Reliability based design in civil engineering*. McGraw Hill, N. York.
- Hughes, J. M., Wroth, C. P., Windle, D. (1977). Pressuremeter tests in sands. *Geotechnique* 27, No.4, pp. 455-477.
- Miranda, L., Serra, J. Bilé (2010). *Modelação numérica do ensaio pressiométrico de Ménard*, Relatório DG-xxx/2010, LNEC, Lisboa.
- Phoon, K-K., Kulhawy, F. H (1999). *Characterization of geotechnical variability*. Canadian Geotechnical Journal, 36, pp. 612-624.
- Rowe, P. (1966). *The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact*. Proc. Royal Soc. London. Series A, Vol. 269, N 1339, pp. 500-527.
- Timoshenko, S. e Goodier, J. N. (1970) *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, 3rd edition.
- Vanmarcke, E. (1984). *Random Fields: Analysis and Synthesis*, MIT Press, Cambridge. MA.
- Vesic, A. S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97 (9), pp. 1183-1205.