

CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO “AREOLAS DA ESTEFÂNIA” A PARTIR DA MODELAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO PRESSIOMÉTRICO

Characterization of “Areolas da Estefânia” formation from the numerical modelling of the pressuremeter test

Pedro Guedes de Melo*

RESUMO – Apresenta-se uma metodologia, baseada no método dos elementos finitos, para a modelação numérica do ensaio pressiométrico de Ménard. Pretende-se, com esta metodologia, calibrar modelos de comportamento de solos mais elaborados que os correntemente utilizados no Projecto Geotécnico em Portugal. Para o efeito são realizadas várias análises numéricas de sensibilidade e vários estudos paramétricos procurando, por ajustes progressivos, identificar os valores dos principais parâmetros do modelo que melhor reproduzem as curvas de ensaio. A metodologia é aplicada à caracterização da formação miocénica “Areolas da Estefânia”, sendo utilizados para o efeito vários resultados de ensaios pressiométricos de Ménard realizados em vários locais da cidade de Lisboa. O modelo de comportamento obtido por esta via é comparado com resultados de ensaios realizados na mesma formação com o pressiómetro auto-perfurador de Cambridge. No final discutem-se as principais vantagens e limitações da metodologia apresentada.

SYNOPSIS – A methodology, based on the finite element method, for the numerical modelling of the Ménard pressuremeter test is presented. This methodology aims to allow the calibration of more complex soil models than the ones currently used in geotechnical practice in Portugal. With this purpose, several numerical sensitivity analyses and parametric studies are carried out in order to identify, from progressive adjustments, the values for the main parameters of the soil model that better reproduce the test curves. This methodology is applied to the characterization of the Miocene formation “Areolas da Estefânia”. Several Ménard pressuremeter test curves, obtained for this formation in several places of Lisbon, were used for this purpose. The soil model obtained with this methodology is compared with results obtained, for the same formation, from the Cambridge self boring pressuremeter. In the end the main advantages and limitations of the proposed methodology are analysed.

PALAVRAS CHAVE – Pressiómetro; modelação numérica; Areolas da Estefânia.

1 – INTRODUÇÃO

A generalização da aplicação de programas de cálculo em tensão-deformação no domínio da Geotecnia tem levado ao desenvolvimento de modelos de comportamento dos solos cada vez mais elaborados, que pretendem traduzir, entre outros aspectos, a não linearidade desse comportamento. A caracterização completa destes modelos exige, na maioria dos casos, a realização de campanhas de ensaios de laboratório, para as quais são necessárias amostras de boa qualidade. Para certas formações, a obtenção dessas amostras de boa qualidade é tarefa de grande complexidade. É o caso, por exemplo, das formações sobreconsolidadas ocorrentes na zona de Lisboa.

Em muitas situações, tem-se verificado que a contribuição dos ensaios in situ se resume à estimativa de valores dos principais parâmetros de cálculo com base em correlações, muitas vezes definidas para condições geotécnicas particulares.

* Engenheiro Civil, CONSULGEO, Consultores de Geotecnia Lda. E-mail: consulgeo@mail.telepac.pt.

O objectivo do trabalho é a caracterização de modelos de comportamento de solos a partir da modelação numérica de ensaios pressiométricos de Ménard (ensaio MP). Estes ensaios são frequentemente realizados em Portugal para a caracterização de solos mas dos seus resultados são, em regra, apenas estimados valores de módulos de deformabilidade e, em certos casos, tirando partido de algumas correlações, valores de parâmetros de resistência ao corte, conduzindo, deste modo, à caracterização de modelos de comportamento relativamente simples, do tipo elástico linear, perfeitamente plástico. A metodologia proposta visa calibrar modelos de comportamento de solos mais elaborados, recorrendo para o efeito às mesmas curvas de resultados de ensaios MP correntemente utilizadas.

Pretende-se, assim, apresentar uma contribuição no sentido de permitir a adopção, no domínio do Projecto Geotécnico corrente, de modelos de comportamento do solo onde, por exemplo, seja possível ter em conta a não linearidade desse comportamento.

Neste âmbito é caracterizado o comportamento das “Areolas da Estefânia”, formação miocénica ocorrente na região de Lisboa. Para efeitos da modelação numérica, é utilizado o programa de elementos finitos PLAXIS (PLAXIS, 2002), de uso já razoavelmente generalizado no Projecto Geotécnico em Portugal.

Os resultados do modelo numérico calibrado são no final comparados com os resultados obtidos de ensaios realizados com o pressiómetro autoperfurador de Cambridge (ensaio CSBP), reconhecidamente uma das melhores vias para a caracterização deste tipo de formações (nomeadamente na definição do estado de tensão em repouso) mas de custo inabarcável para a maioria dos estudos geotécnicos correntes.

2 – MODELAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO MP

O esquema de modelação adoptado para o ensaio MP é relativamente simples e para o efeito foi utilizado um dos programas mais utilizados em Portugal no Projecto Geotécnico: o programa PLAXIS. Trata-se de um programa baseado no método dos elementos finitos, permitindo, na sua versão mais simples (a 2D), cálculos admitindo estados planos de deformação ou axissimetria, sendo possível a realização de análises em condições não drenadas, drenadas ou envolvendo processos de consolidação. É um programa de cálculo particularmente vocacionado para a resolução de problemas geotécnicos envolvendo processos construtivos mais ou menos complexos.

A modelação do ensaio MP foi feita em axissimetria. A sequência dos passos de cálculo considerados é seguidamente descrita. Após ser instalado o estado de tensão inicial no maciço, é simulada a abertura do furo, tal como na realização do ensaio. Isso foi feito simplesmente removendo os elementos que ocupavam o interior do furo. No caso presente o furo foi simulado como tendo 6cm de diâmetro. Tal como na abertura de um furo para a realização deste tipo de ensaios, também no modelo numérico pode ser necessário evitar o colapso das paredes do furo, sobretudo junto à superfície do terreno. Nestes casos deverá ser prevista no modelo a aplicação de uma tensão sobre as paredes do furo (com um valor máximo próximo da tensão em repouso), que evite esse colapso.

Após a abertura do furo é activada uma tensão uniformemente distribuída nas paredes do furo simulando a pressão de expansão do pressiómetro. Esta pressão é aplicada num troço de furo com 50cm de altura, correspondente à altura do pressiómetro, à profundidade do ensaio realizado.

Com o aumento da pressão em sucessivos passos de cálculo, vão sendo medidos deslocamentos horizontais em 5 pontos da malha situados na parede do furo (ver Figura 1). Estes pontos, ali-

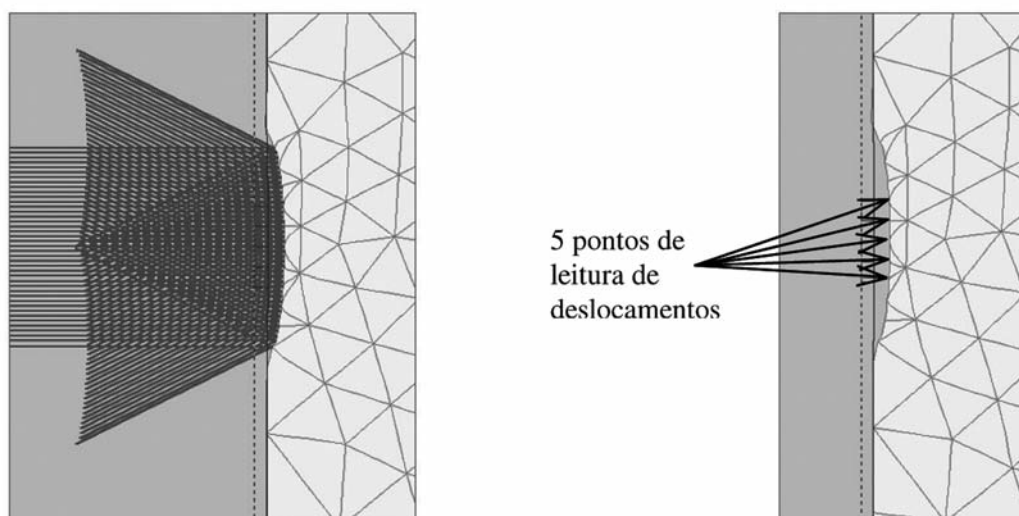


Fig. 1 – Modelação do ensaio pressiométrico: aplicação da pressão de expansão e localização dos pontos de leitura de deslocamentos horizontais na célula central.

nhados segundo a mesma vertical, estão igualmente espaçados numa altura de 20cm, equivalente ao comprimento da célula central do pressiómetro. O volume de expansão da cavidade correspondente a esta célula central é calculado a partir dos deslocamentos radiais dos referidos 5 pontos.

Tendo em conta a magnitude dos deslocamentos associados à expansão da cavidade, os cálculos foram realizados no âmbito da teoria das grandes deformações. Para o efeito é seleccionado no programa PLAXIS a “*updated mesh analysis*”. Tendo em conta o procedimento adoptado, para determinar os valores reais da pressão que em cada passo de cálculo são aplicados às paredes do furo é necessário corrigir o valor da tensão uniformemente aplicada da relação entre a área da superfície da cavidade expandida e a área da superfície dessa cavidade antes do ensaio.

A pressão de expansão é inicialmente aumentada de zero até ao valor estimado para a tensão em repouso. Atingido esse valor é feito o cálculo do volume da cavidade na zona da célula central do pressiómetro. Em seguida a pressão é aumentada até atingir o máximo desejado. Nestes casos esse máximo deve corresponder, pelo menos, a valores iguais aos máximos atingidos nos ensaios cujos resultados são utilizados para calibrar o modelo.

O objectivo deste trabalho é a aplicação da metodologia de modelação do ensaio apresentada para calibrar um modelo de comportamento de um solo. Este processo passa pela realização de estudos paramétricos e análises de sensibilidade dos principais parâmetros que definem o modelo, procurando reproduzir, de forma tão próxima quanto possível, as curvas de ensaio. A metodologia numérica é constituída, assim, por um conjunto de análises onde vão sendo introduzidos ajustes progressivos aos valores dos principais parâmetros de cálculo.

A “convergência” de todo o processo depende fundamentalmente da sensibilidade que for ganha à variação de cada parâmetro, da qualidade dos resultados de ensaio que servem para calibrar o modelo e do conhecimento prévio que poderá existir sobre o comportamento mecânico dos materiais em causa. Relativamente a este último ponto, o processo de “convergência” será considera-

velmente acelerado se o primeiro conjunto de valores adoptados para calibrar o modelo for já bastante próximo daquele que virá a calibrar o modelo final. Para tal poderá recorrer-se, num caso geral, à experiência adquirida em estudos geotécnicos envolvendo os materiais em estudo ou a resultados disponíveis relativos a outro tipo de ensaios.

Para a definição dos valores que calibram o modelo final foi seguida uma metodologia de ajuste directo dos valores dos principais parâmetros, cabendo ao utilizador, em cada passo do cálculo, a definição de qual o parâmetro a corrigir e qual a magnitude dessa correcção. O processo é, no entanto, relativamente simples uma vez que rapidamente é ganha a sensibilidade necessária para identificar quais as correcções adequadas. Ao fim de poucas iterações, a ordem de grandeza dos valores dos principais parâmetros fica definida, passando-se em seguida a eventuais ajustes de pormenor.

3 – MODELO DE COMPORTAMENTO CONSIDERADO

Um dos objectivos deste estudo é apresentar uma metodologia que possa ser aplicada numa prática corrente de Projecto Geotécnico. Nesse sentido foi utilizado, como referido, o programa PLAXIS.

Como modelo de comportamento adoptou-se para as “Areolas da Estefânia” o “*Hardening Soil Model*”, modelo já implementado no referido programa. A escolha deste modelo prende-se com uma das principais contribuições que se pretende dar com este trabalho, que é mostrar que com os resultados dos ensaios MP é possível caracterizar materiais com modelos mais elaborados que os do tipo elástico linear, perfeitamente plástico, e para o estudo dos quais a não linearidade do comportamento pode ser importante.

O “*Hardening Soil Model*” é um modelo avançado de comportamento de solo do tipo elástico não linear, perfeitamente plástico, baseado numa relação hiperbólica entre a deformação vertical e a tensão deviatórica, a qual deriva, não da consideração explícita duma lei hiperbólica tradicional, mas sim da adopção duma lei de endurecimento plástico que reproduz a referida relação. De entre as principais características, são ainda de destacar o facto da rigidez do solo ser dependente do estado de tensão e da trajectória de tensão, o facto de ter em consideração a dilatação do solo e o facto de adoptar o critério de rotura de Mohr-Coulomb.

Neste modelo são considerados, de forma distinta, o endurecimento por corte e o endurecimento em compressão (o primeiro é considerado na definição das deformações associadas a tensões deviatóricas e o segundo é considerado na definição das deformações associadas a tensões de compressão em carregamento isotrópico e em condições edométricas). Deste modo, são, considerados dois tipos distintos de rigidezes, ambos traduzidos por módulos de deformabilidade dependentes do estado de tensão:

- módulo de deformabilidade E_{50} , associado a carregamento em ensaio triaxial drenado e correspondente a um incremento de tensão de 50% da tensão deviatórica na rotura, definido por

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cot \phi' - \sigma_3'}{c' \cot \phi' + p^{\text{ref}}} \right)^m \quad (1)$$

- módulo de deformabilidade edométrico, E_{oed} , definido por

$$E_{\text{oed}} = E_{\text{oed}}^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cot \phi' - \sigma_3'}{c' \cot \phi' + p^{\text{ref}}} \right)^m \quad (2)$$

onde E_{50}^{ref} e E_{oed}^{ref} são, respectivamente, os valores de E_{50} e E_{oed} associados a uma tensão de confinamento p^{ref} , c' é a coesão efectiva do solo e ϕ' o ângulo de resistência ao corte efectivo e m o expoente da relação hiperbólica.

Para as situações de descarga e recarga o modelo considera um outro módulo de deformabilidade, também dependente do nível de tensão, definido, de forma análoga aos anteriores, ou seja:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c' \cot \phi' - \sigma_3'}{c' \cot \phi' + p^{ref}} \right)^m \quad (3)$$

Para a definição completa do modelo é necessário conhecer:

- peso volúmico, γ ;
- módulo de deformabilidade secante obtido em ensaio triaxial drenado, E_{50}^{ref} (associado a p^{ref});
- módulo de deformabilidade tangente obtido em ensaio edométrico, E_{oed}^{ref} (associado a p^{ref});
- módulo de deformabilidade em descarga/recarga, E_{ur}^{ref} (associado a p^{ref});
- expoente da relação de dependência dos módulos de deformabilidade do nível de tensão, m ;
- coeficiente de Poisson em descarga/recarga, ν_{ur}
- ângulo de resistência ao corte efectivo, ϕ' ;
- coesão efectiva, c' ;
- ângulo de dilatação, ψ ;
- pressão de referência, p^{ref} ;
- coeficiente de impulso em repouso, K_0 ;
- coeficiente de rotura, R_f .

4 – ENSAIOS REALIZADOS SOBRE AS “AREOLAS DA ESTEFÂNIA”

Para aplicação da metodologia anteriormente referida escolheu-se uma formação miocénica ocorrente na região de Lisboa – “Areolas da Estefânia” – formação de difícil caracterização dado, por um lado, não ser possível obter resultados a partir de ensaios *in situ* correntes, como o SPT ou CPT (dada a baixa deformabilidade e elevada resistência dos materiais), e por outro, por ser difícil obter amostras de boa qualidade para a realização de ensaios laboratoriais.

As “Areolas da Estefânia” são frequentemente descritas como areias densas, de granulometria variável, areias siltosas e areias argilosas, exibindo uma certa cimentação carbonatada que pode originar desde finas lenticulas a camadas calcárias com mais de 1m de espessura.

Para a realização do estudo reuniram-se os resultados de 27 ensaios pressiométricos de Ménard (ensaio MP) realizados na referida formação em várias zonas de Lisboa. Estas curvas são representadas na Figura 2. Nesta figura p é a pressão aplicada pelo pressiómetro, p_0 é a tensão horizontal em repouso, V é, em cada instante, o volume da célula central do pressiómetro, V_0 é o volume da célula central do pressiómetro quando p_0 é aplicada e V_s é o volume da célula central do pressiómetro em repouso (isto é, antes do ensaio).

Da análise dessas curvas, da sua forma e do comportamento que revelam quando confrontadas com a profundidade a que foi realizado o ensaio, fica bem patente a heterogeneidade já referida destes materiais. Foi, assim, necessário identificar, de entre as curvas disponíveis, aquelas que são características do comportamento global da formação.

Em materiais bastante heterogéneos, tal tarefa pode envolver alguma complexidade, não sendo, no entanto, num grau superior ao que estaria associado à análise de resultados de outro tipo de ensaios.

O primeiro passo que deve ser dado é fazer intervir, em gráficos do tipo do da Figura 2, o valor da tensão efectiva à profundidade a que foi realizado o ensaio. Pode, assim, reproduzir-se o gráfico dessa Figura 2, considerando em ordenadas o parâmetro $(p-p_0)$ dividido pela tensão efectiva vertical à profundidade a que foi realizado o ensaio. Neste tipo de representação, as curvas associadas a um mesmo material tenderão a agrupar-se, revelando um comportamento razoavelmente semelhante e coerente entre si. Para além disso, devem ainda ser analisados os resultados obtidos em todos os ensaios em termos do módulo de Ménard, E_M , e da pressão limite, p_{lim} . Também neste caso os resultados devem ser analisados fazendo intervir o valor a tensão efectiva vertical à profundidade a que foi realizado o ensaio. Num gráfico em função dessa tensão, estes dois parâmetros devem revelar uma mesma tendência de variação com o aumento dessa tensão.

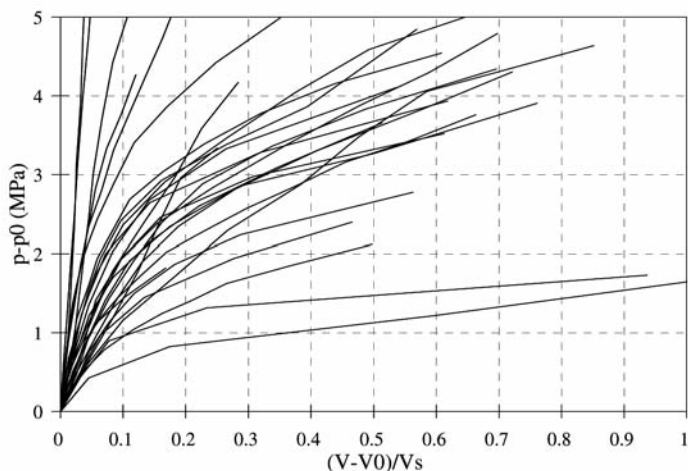


Fig. 2 – Curvas do ensaio MP analisadas.

Na Figura 3 indicam-se as 15 curvas (das 27 iniciais) que se considera reproduzirem o comportamento dos materiais da matriz de base da formação miocénica.

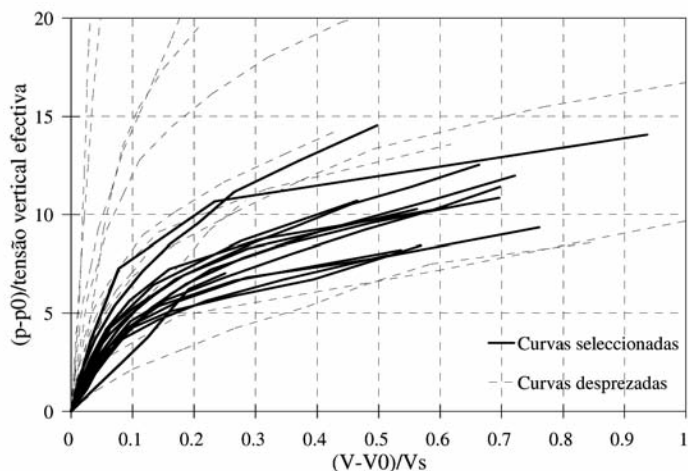


Fig. 3 – Curvas do ensaio MP seleccionadas para o estudo.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os valores disponíveis de E_M e p_{lim} determinados nos ensaios, em ambos os casos em função da tensão vertical efectiva à cota em que foi realizado cada ensaio. Em cada uma dessas figuras são evidenciados os valores correspondentes às curvas seleccionadas para o estudo.

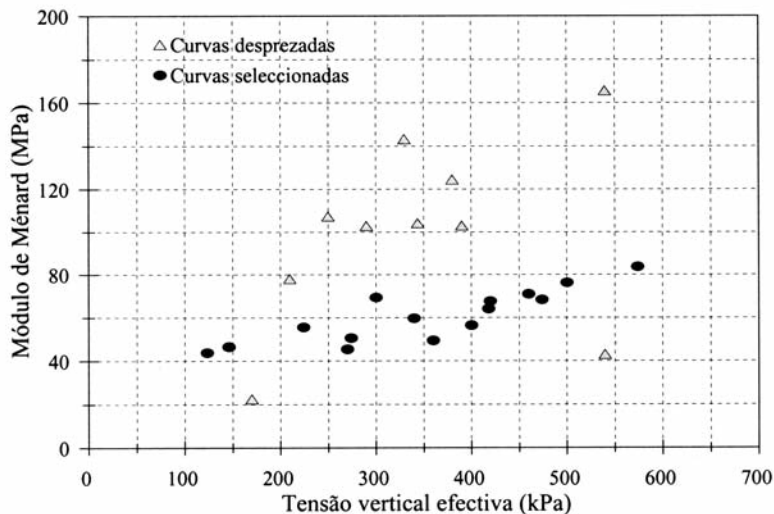


Fig. 4 – Módulos de Ménard obtidos dos ensaios MP.

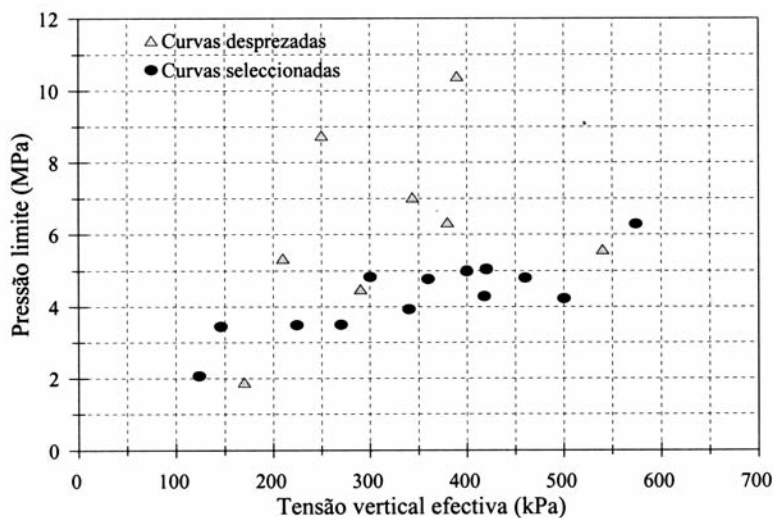


Fig. 5 – Pressões limite obtidas dos ensaios MP.

Importa referir que dos 27 ensaios que constituem a amostra total considerada no estudo, existem alguns para os quais não foram indicados os valores de E_M e p_{lim} . Tal facto fica a dever-se, em regra, a uma de duas razões: ou a execução do ensaio (principalmente do furo para a instalação do pressiómetro) conduziu a uma excessiva perturbação do solo que origina um andamento da cur -

va anormal ou a pressão aplicada no ensaio ficou aquém do necessário para determinar os referidos valores. Este último aspecto tem-se revelado o principal factor condicionador da obtenção de bons resultados neste tipo de formações, com as empresas de prospecção a limitarem as pressões máximas aplicadas com o receio que a membrana do pressiómetro possa ficar danificada.

Da Figura 4 verifica-se que as curvas seleccionadas para a análise apresentam valores dos módulos de Ménard bastante consistentes, exibindo um aumento de valor com a tensão vertical (ou, indirectamente, com a profundidade). Dos valores excluídos, a grande maioria refere-se a materiais de maior rigidez que a do material base da formação, certamente associados a zonas de maior cimentação ou mesmo à presença de cascos calcários.

Do mesmo modo, também na Figura 5 se verifica haver uma certa consistência relativamente aos valores das pressões limites obtidas nas curvas seleccionadas para a análise, embora neste caso não seja por vezes tão clara a diferença para os valores obtidos nas curvas que foram excluídas da análise.

5 – RESULTADOS DA MODELAÇÃO NUMÉRICA

Como metodologia para a realização das análises numéricas optou-se por modelar a realização do ensaio pressiométrico a profundidades correspondentes a tensões verticais efectivas variáveis entre 100kPa e 550kPa, com intervalos de 50kPa, correspondendo a um total de 10 ensaios modelados. Os resultados de cada ensaio modelado foram então comparados com os resultados dos ensaios realizados a profundidades onde a tensão vertical efectiva correspondente se situava no intervalo -25kPa a +25kPa relativamente à tensão do ensaio modelado: por exemplo, os resultados do ensaio modelado para uma profundidade correspondente a 300kPa de tensão vertical efectiva foram comparados com os resultados dos ensaios realizados a profundidades correspondentes a tensões verticais efectivas entre 275kPa e 325kPa.

Tendo em conta as características dos materiais da formação em estudo, todos os cálculos foram realizados considerando condições drenadas.

Para a identificação, através da modelação numérica do ensaio, dos valores dos principais parâmetros que definem o modelo de comportamento adoptado é necessário, como já foi referido, realizar vários estudos paramétricos para no final determinar o conjunto de valores que melhor permite reproduzir o comportamento observado nos vários ensaios seleccionados para o estudo. O processo de determinação desses valores consiste, assim, na introdução de ajustes progressivos ao modelo, apresentando-se neste trabalho apenas os resultados correspondentes à solução final.

Nas Figuras 6 a 15 apresenta-se a comparação entre os resultados numéricos e os resultados obtidos nos ensaios para cada modelação realizada. Como se pode observar, o ajuste entre o modelo numérico final e os resultados de ensaios é, globalmente, bastante bom.

Dado o número de parâmetros do modelo e o tipo de ensaio que é aqui usado para o calibrar, não é possível proceder à definição por ajuste de todos os valores desses parâmetros. Por um lado alguns parâmetros têm efeito muito semelhante no andamento das curvas dos ensaios modelados e por outro alguns parâmetros são impossíveis de determinar a partir dos resultados disponíveis dos ensaios MP (caso do módulo de descarga/recarga). Deste modo apenas os parâmetros mais relevantes foram objecto de estudo detalhado, definindo-se à partida, de forma ponderada, os valores para os restantes parâmetros. Do estudo realizado foram objecto de ajuste progressivo os seguintes parâmetros, para os quais se obtiveram os valores indicados:

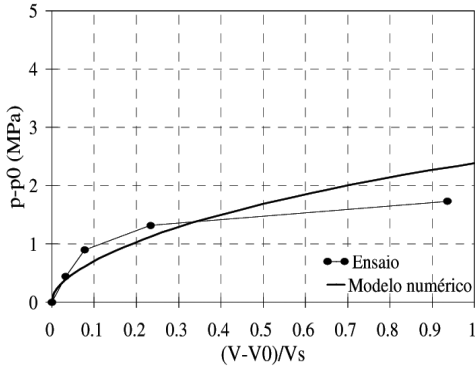


Fig. 6 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 100kPa.

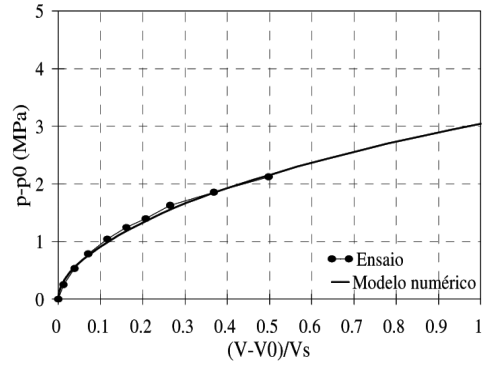


Fig. 7 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 150kPa.

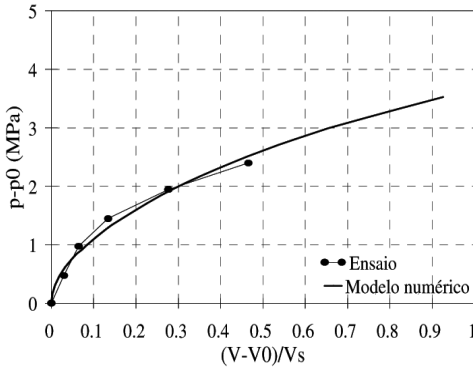


Fig. 8 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 200kPa.

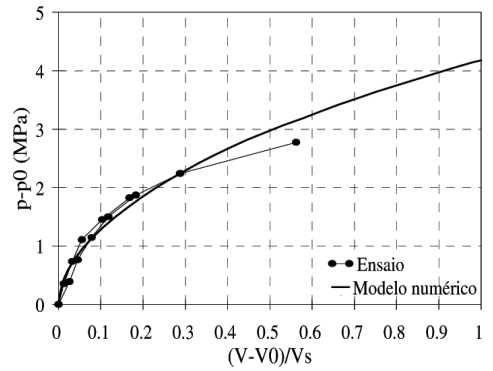


Fig. 9 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 250kPa.

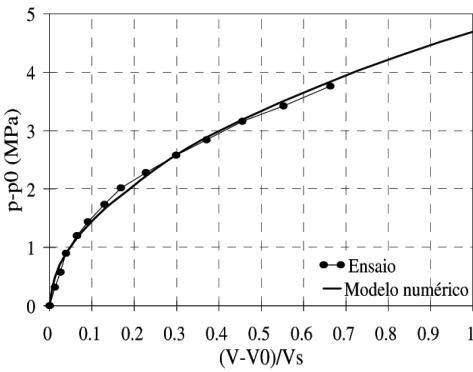


Fig. 10 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 300kPa.

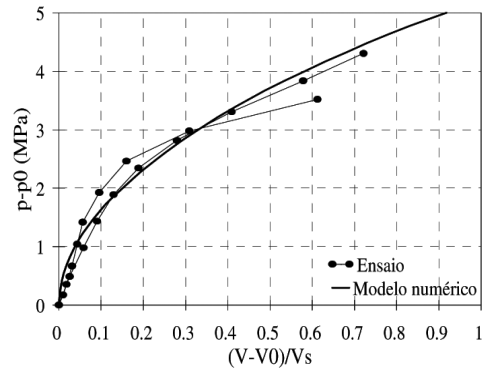


Fig. 11 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 350kPa.

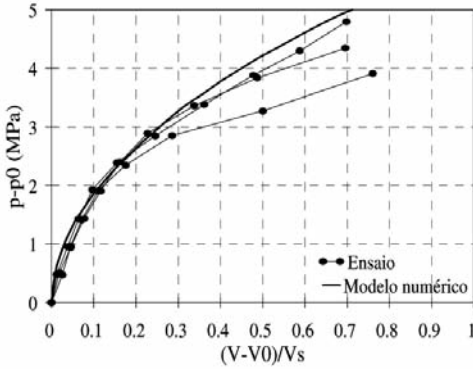


Fig. 12 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 400kPa

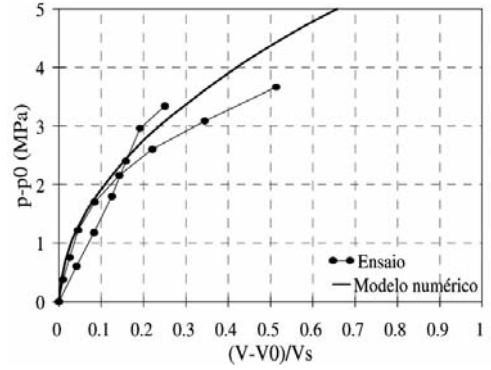


Fig. 13 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 450kPa.

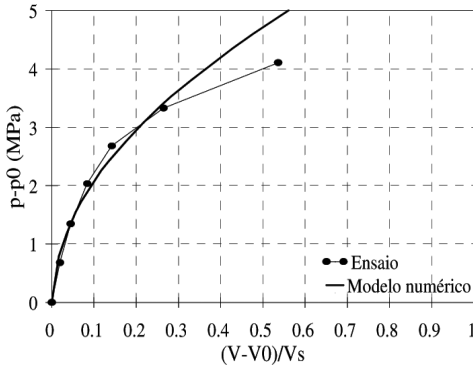


Fig. 14 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 500kPa.

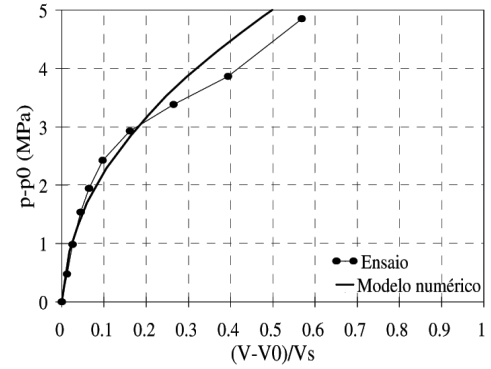


Fig. 15 – Resultados da modelação para uma tensão vertical efectiva de 550kPa.

- $E_{50}^{\text{ref}} = 90 \text{ MPa}$ (associado a $p^{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$)
- $m = 0.5$
- $\phi' = 39^\circ$
- $\psi = 5^\circ$
- $K_0 = 0.8$

No modelo foram à partida assumidos os valores para os seguintes parâmetros:

- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = E_{50}^{\text{ref}}$ (por se tratar de material predominantemente arenoso)
- $\nu_{\text{ur}} = 0.2$
- $c' = 10 \text{ kPa}$ (por se tratar de um material com cimentação)
- $R_f = 0.95$

Relativamente ao valor da coesão efectiva utilizado para reproduzir os efeitos da cimentação do material, importa referir que os estudos paramétricos levados a cabo mostraram haver, para valo-

res de c' até 30kPa, uma reduzida influência deste parâmetro no comportamento das curvas de modelação do ensaio.

Tendo em conta que os ensaios MP não apresentam resultados para ciclos de descarga/recarga, o valor do módulo E_{ur}^{ref} teria que ser estimado, utilizando-se, de acordo com a bibliografia (PLAXIS, 2002), um factor de 3 para a relação entre este e o módulo E_{50}^{ref} . Como se verá adiante, resultados experimentais obtidos para a mesma formação com outros ensaios que não o MP conduziram a

- $E_{ur}^{ref} = 270\text{MPa}$ (associado a $p^{ref} = 100\text{kPa}$)

correspondente a $3E_{50}^{ref}$.

6 – COMPARAÇÃO DO MODELO COM RESULTADOS DO CSBP

A utilização de um conjunto tão significativo de curvas de ensaio (15 curvas seleccionadas para o estudo), obtidas para profundidades correspondentes a tensões verticais efectivas variáveis entre 100 e 550kPa (profundidades de 5m a 27.5m), associada ao tipo de ajuste que foi possível obter entre modelo numérico e resultados de ensaios, pode ser encarada, só por si, como auto validadora do modelo que acaba de ser definido.

Embora considerando que a mais valia apresentada pela metodologia proposta reside na calibração de todo um modelo de comportamento e não apenas na identificação de valores para parâmetros geotécnicos isolados, procurou-se comparar, para alguns desses parâmetros, os valores obtidos pela metodologia proposta com aqueles obtidos por uma via distinta. Dos poucos resultados disponíveis sobre a caracterização da formação em estudo destacam-se aqueles obtidos com o pressiómetro autoperfurador de Cambridge (ensaio CSBP). Trata-se de um ensaio pressiométrico que, por ser autoperfurador, não tem as desvantagens de perturbação dos materiais a ensaiar associadas à prévia abertura do furo, tal como os ensaios com o pressiómetro de Ménard. Este é um aspecto que, reconhecidamente, o torna um dos melhores ensaios para a determinação do coeficiente de impulso em repouso.

Existe em Portugal apenas um equipamento deste tipo, pertencente ao LNEC. O custo da realização destes ensaios torna-os incomportáveis para projectos de engenharia correntes mas existem alguns resultados de ensaios realizados com este equipamento principalmente associados a obras do Metropolitano de Lisboa. Destes encontraram-se 15 ensaios realizados na formação das “Areolas da Estefânia” (LNEC, 1996a; LNEC, 1996b; LNEC, 1996c; LNEC, 1996d; LNEC, 1996e). Os resultados destes ensaios são de seguida comparados com o modelo numérico anteriormente definido. Por se considerar fora do âmbito do presente trabalho, não será referida a metodologia pela qual são obtidos, a partir dos resultados dos ensaios CSBP, os valores dos parâmetros geotécnicos seguidamente analisados. Essas metodologias são apresentadas nas referências bibliográficas anteriormente citadas.

a) Coeficiente de impulso em repouso

Na Figura 16 apresenta-se a distribuição dos valores do coeficiente de impulso em repouso obtidos dos resultados dos ensaios CSBP, em função da tensão vertical efectiva à profundidade a que foi realizado cada um dos ensaios. Apesar da dispersão de valores obtida, estes resultados mostram uma certa tendência para a redução do coeficiente de impulso em repouso com o aumento da tensão vertical efectiva. Dos valores obtidos, a maioria conduz coeficientes de impulso em repouso na gama de 0.6 a 1.0.

Do modelo numérico foi inferido um valor de 0.8, representando uma situação intermédia no intervalo anteriormente referido.

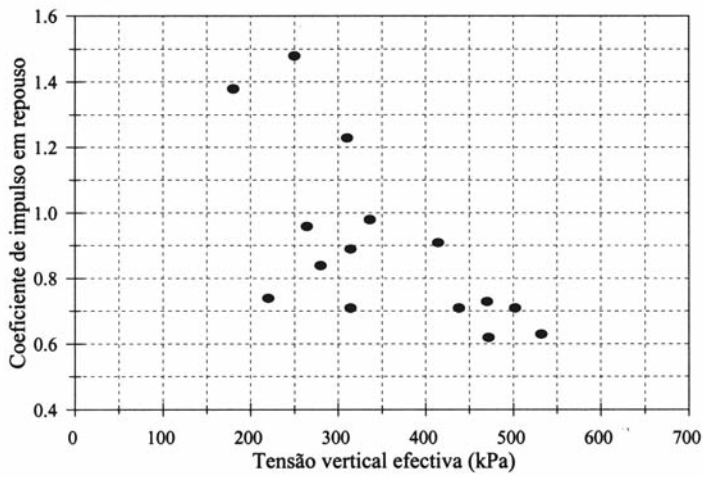


Fig. 16 – Coeficientes de impulso em repouso obtidos dos ensaios CSBP.

b) Ângulo de resistência ao corte efectivo

Na Figura 17 são apresentados os valores obtidos dos resultados dos ensaios CSBP relativamente ao ângulo de resistência ao corte efectivo dos materiais. Como se pode observar existe alguma dispersão de valores, a qual estará naturalmente associada à heterogeneidade característica desta formação e à metodologia adoptada para a sua determinação. A maioria dos valores indicados situa-se entre 38° e 45°.

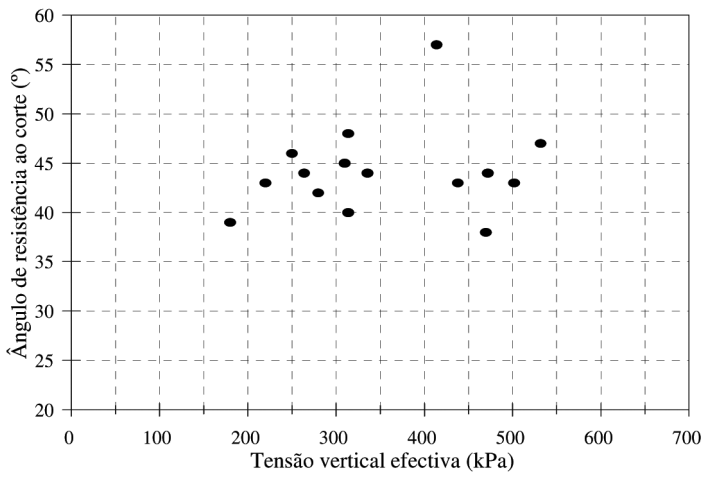


Fig. 17 – Ângulos de resistência ao corte obtidos dos ensaios CSBP.

O modelo numérico conduziu a um valor do ângulo de resistência ao corte efectivo de 39° , valor que se enquadra na gama anteriormente apontada. De notar que neste modelo numérico se adoptou uma coesão efectiva de 10kPa para simular a cimentação característica destes materiais, facto que não é considerado na metodologia que permite estimar o ângulo de resistência ao corte a partir dos resultados dos ensaios CSBP. É por isso natural que o valor obtido por via numérica seja ligeiramente inferior aos determinados a partir do referido ensaio.

c) Ângulo de dilatância

Na Figura 18 são apresentados os valores dos ângulos de dilatância obtidos para os mesmos materiais e com o mesmo equipamento de ensaio CSBP. Um vez mais existe uma certa dispersão de resultados, estando a maioria concentrada entre 5° e 15° .

Do modelo numérico foi inferido para este ângulo de dilatância um valor de 5° , valor correspondente ao limite inferior da gama anteriormente referida.

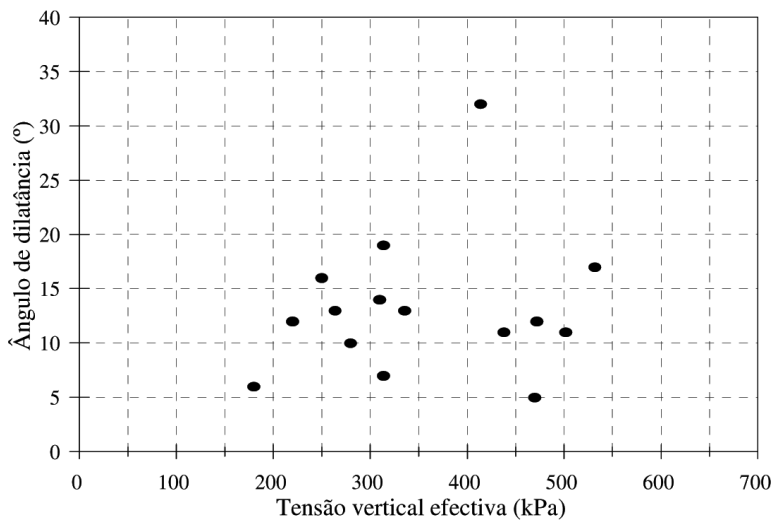


Fig. 18 – Ângulos de dilatância obtidos dos ensaios CSBP.

d) Módulo de deformabilidade em descarga/recarga

Na Figura 19 são apresentados os módulos de deformabilidade determinados para ciclos de descarga/recarga nos ensaios CSBP. Apesar de uma certa dispersão de valores, procurou-se definir uma lei de evolução do seu valor com a tensão efectiva, semelhante à apresentada em (3). Esta lei de evolução é indicada na referida figura e a ela corresponde um valor de E_{ur}^{ref} de 270MPa, para uma tensão de referência de 100kPa.

Relativamente a este parâmetro, não se dispõe de resultados de ciclos de descarga/recarga nos ensaios pressiométricos de Ménard. Contudo é importante notar que o valor de E_{ur}^{ref} anteriormente definido corresponde a 3 vezes o valor de E_{50}^{ref} inferido do modelo numérico.

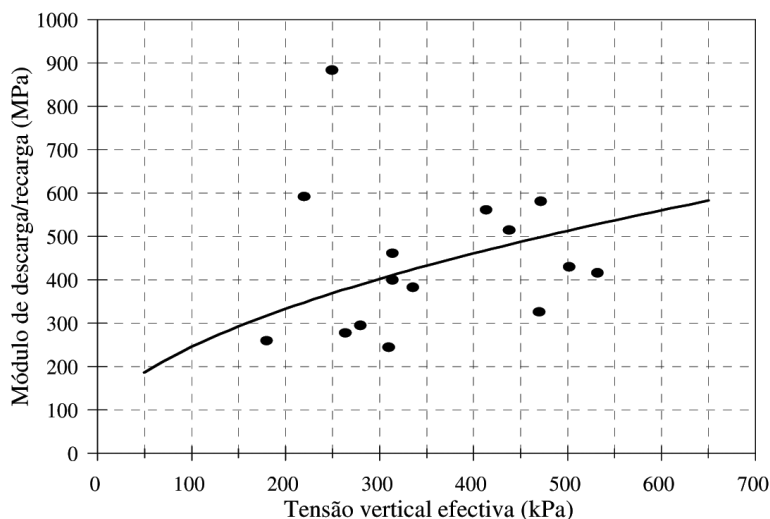


Fig. 19 – Módulos de descarga/recarga obtidos dos ensaios CSBP.

7 – COMPARAÇÃO DO MODELO COM RESULTADOS DO MP

As curvas do ensaio pressiométrico de Ménard foram utilizadas anteriormente para calibrar o modelo de comportamento das “Areolas da Estefânia”. Importa agora comparar esse modelo com os valores obtidos directamente dos referidos ensaios MP para o módulo de Ménard e para o ângulo de resistência ao corte.

a) Módulo de Ménard

Na Figura 4 foram já apresentados os valores do módulo de Ménard inferidos das curvas dos ensaios consideradas neste estudo. Tendo por base o modelo de comportamento adoptado, e em particular a definição do módulo de deformabilidade apresentada em (1), indica-se na Figura 20 a curva que se considera representar a evolução do módulo de Ménard com a tensão efectiva vertical. A esta curva corresponde um módulo de Ménard de referência, E_M^{ref} (definido para uma tensão de referência de 100kPa) de 40MPa.

Comparando este valor com o módulo definido no modelo verifica-se que a relação obtida entre eles é a seguinte:

$$E_{50}^{\text{ref}} = 2.25E_M^{\text{ref}} \quad (4)$$

b) Ângulo de resistência ao corte efectivo

A partir dos resultados dos ensaios MP, nomeadamente do conceito de pressão limite, é possível estimar directamente o valor do ângulo de resistência ao corte, segundo proposta do Centre d’Etudes Ménard (Baguelin et al, 1978):

$$p_{lim} - p_0 = 2.5 \times 2^{\frac{\phi' - 24}{4}} \quad (\text{com } p \text{ em kgf/cm}^2) \quad (5)$$

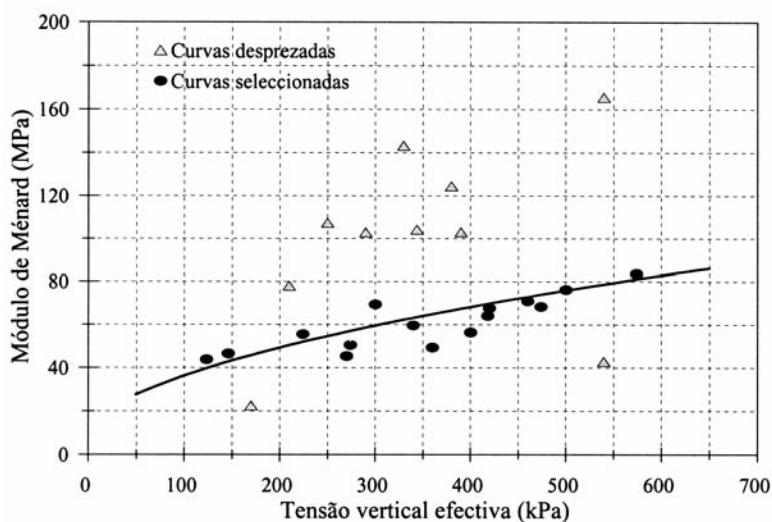


Fig. 20 – Módulos de Ménard obtidos dos ensaios MP.

Seguindo esta metodologia obtêm-se os valores do ângulo de resistência ao corte que se apresenta na Figura 21. Esta figura mostra uma reduzida dispersão de valores, estando estes praticamente concentrados entre 38° e 41°. Comparando estes valores com os obtidos no modelo numérico e com os obtidos dos ensaios CSBP verifica-se que todos eles apresentam a mesma ordem de grandeza.

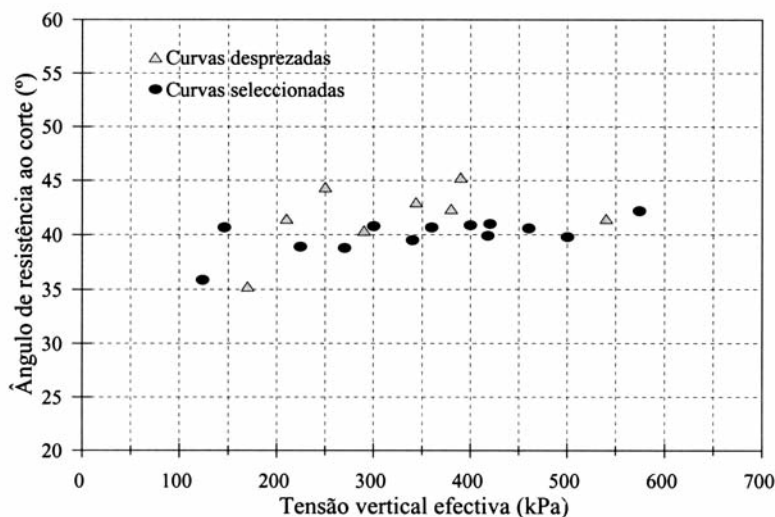


Fig. 21 – Ângulos de resistência ao corte obtidos dos ensaios MP.

8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se uma metodologia baseada na modelação numérica do ensaio pressiométrico de Ménard que permite calibrar modelos de comportamento de solos. Pretende-se, deste modo, contribuir para uma melhoria da qualidade dos modelos que são utilizados na prática corrente do Projecto Geotécnico, mostrando que é possível, com um ensaio corrente como o pressiómetro de Ménard, calibrar esse tipo de modelos.

A opção pela escolha do ensaio pressiométrico de Ménard para calibrar esses modelos prende-se com várias razões. Em primeiro lugar trata-se de um ensaio *in situ*, o que permite a caracterização de materiais sem que seja necessária a colheita de amostras. Este aspecto é particularmente relevante pois de entre os materiais passíveis de serem caracterizados pela metodologia proposta neste trabalho encontram-se materiais predominantemente arenosos, com algum grau de cimentação e por vezes situados abaixo do nível freático, para os quais a obtenção de amostras de boa qualidade é, em regra, extremamente difícil.

Em segundo lugar, trata-se de um ensaio que é possível realizar em materiais de elevada resistência e baixa deformabilidade, ao contrário de outros ensaios *in situ* como o SPT, que nestes casos conduz, em regra, a valores de “nega”, ou o CPT, cuja ponteira dificilmente penetra neste tipo de materiais.

Em terceiro lugar, o ensaio pressiométrico é um ensaio correntemente utilizado no Projecto Geotécnico em Portugal, embora dele apenas sejam retirados, em regra, valores para parâmetros associados a modelos elásticos lineares, perfeitamente plásticos.

Por último, trata-se de um ensaio passível de ser modelado numericamente, podendo essa modelação ser feita em axissimetria, o que a torna possível de realizar na maioria dos programas de elementos finitos disponíveis.

Importa também clarificar as principais limitações desta metodologia quando se recorre à utilização do ensaio pressiométrico de Ménard para calibrar um modelo de comportamento de um solo. Em primeiro lugar deve ser referida a perturbação causada no solo pela abertura do furo para a realização do ensaio e a sua influência no comportamento inicial da curva de resultados, a qual é o principal obstáculo à obtenção de bons resultados para calibrar um modelo de comportamento, sobretudo no domínio das muito pequenas deformações.

Um segundo aspecto prende-se com o facto de o ensaio ter associado apenas um tipo de trajectória de tensões, o que constitui uma limitação à caracterização completa dum modelo de comportamento de um solo, sobretudo se este pretender ter em conta aspectos como a anisotropia.

Por outro lado, nalguns modelos é possível que dois ou mais parâmetros tenham efeito semelhante no andamento das várias curvas que simulam os ensaios, facto que poderá impossibilitar a identificação de um único conjunto de valores dos parâmetros definidores do modelo. Nestes casos, tendo uma noção da ordem de grandeza dos valores de alguns dos parâmetros, poderão ser ajustados no modelo valores para outros parâmetros mais difíceis de dominar.

Um outro aspecto prende-se com a aplicabilidade desta metodologia à caracterização de materiais de baixa permeabilidade. Nestes casos a abordagem poderá não ser directa pois os resultados dos ensaios com pressiómetro de Ménard poderão não corresponder a análises verdadeiramente drenadas nem não drenadas, envolvendo, por isso, estudos de maior complexidade.

Por último, a metodologia, baseando-se num conjunto de estudos paramétricos e análises de sensibilidade relativamente aos principais parâmetros do modelo, pode ter um processo de “con -

vergência” lento, sobretudo se as curvas utilizadas para calibrar o modelo reflectirem uma elevada heterogeneidade dos materiais.

Ponderando as vantagens e limitações anteriormente referidas, considera-se que esta metodologia e este ensaio pressiométrico de Ménard têm potencialidades suficientes para permitir calibrar modelos de comportamento de solos bastante mais elaborados que os utilizados na prática de Engenharia Geotécnica.

No estudo apresentado foi calibrado com sucesso um modelo de comportamento para a formação miocénica “Areolas da Estefânia”, formação para a qual poucos são os resultados de caracterização fundamentada conhecidos. Para esta formação foi possível identificar parâmetros como o coeficiente de impulso em repouso e aqueles definidores da deformabilidade, parâmetros estes na maioria dos casos difíceis de avaliar em estudos correntes.

Finalmente, é de realçar o facto de, para a formação miocénica analisada – “Areolas da Estefânia” –, ter sido identificado, com a metodologia proposta, um conjunto único de valores dos parâmetros de cálculo do modelo constitutivo adoptado, que permitiu reproduzir numericamente, de forma bastante próxima, um número muito significativo de curvas do ensaio pressiométrico de Ménard, obtidas nesta formação para profundidades até cerca de 30m.

9 – AGRADECIMENTOS

O autor agradece à empresa Metropolitano de Lisboa a autorização para a publicação dos resultados dos ensaios pressiométricos apresentados.

10 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baguelin, F.; Jézéquel, J.F.; Shields, D.H. (1978). The pressuremeter and foundation engineering. Trans Tech Publications.
- LNEC (1996a). Ensaios pressiométricos na zona da Estação Baixa/Chiado. Relatório 190/96 NF.
- LNEC (1996b). Ensaios pressiométricos na zona da Estação da Alameda, Local: Alameda/IST. Relatório 221/96 NF.
- LNEC (1996c). Ensaios pressiométricos na zona da Estação da Alameda, Local: Alameda/Império. Relatório 225/96 NF.
- LNEC (1996d). Ensaios pressiométricos no Convento do Carmo, Local: Igreja do Carmo. Relatório 226/96 NF.
- LNEC (1996e). Ensaios pressiométricos no Convento do Carmo, Local: Quartel da GNR. Relatório 227/96 NF.
- PLAXIS (2002). Plaxis - Finite Element Code for Soil and Rock Analysis, 2D version 8. Manual. Balkema