

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DO LOCAL EXPERIMENTAL DA QUINTA DO FOJA, SITUADO NO DEPÓSITO DE SOLOS MOLES DO BAIXO MONDEGO

Geological and geotechnical characterization of the test site of Quinta do Foja, located in the soft soil deposit of Baixo Mondego

Paulo Alexandre L. F. Coelho *

Luís Joaquim Leal Lemos **

RESUMO - O depósito de solos moles do Baixo Mondego tem sido objecto de um vasto projecto de investigação dedicado à sua caracterização geológica e geotécnica. Este artigo apresenta as principais características geológicas do depósito, assim como as suas mais relevantes propriedades físicas, de identificação, de consolidação e tensão – deformação - resistência ao corte, determinadas no local experimental da Quinta do Foja. Os solos ensaiados apresentam várias características de comportamento aparentemente incoerentes, tais como uma grande variabilidade de propriedades físicas face a uma composição relativamente uniforme, uma plasticidade muito elevada que não se coaduna com a quantidade e tipo de minerais argilosos presentes, e ainda uma combinação relativamente invulgar de alta compressibilidade com alta resistência ao corte intrínseca. Sendo a matéria orgânica responsável maior por todas estas características originais de comportamento dos solos, ela pode ser encarada como o seu constituinte mais significativo, ainda que o respectivo teor em matéria orgânica seja relativamente baixo.

SYNOPSIS - The soft soil deposit of Baixo Mondego has been the object of a large research project devoted to its geological and geotechnical characterization. This paper presents the main geological features of the deposit as well as its most significant physical, identification, consolidation and stress – strain - shear strength properties, measured in the test site of Quinta do Foja. The soils tested show several apparently inconsistent characteristics of behaviour, such as a great variability of the physical properties against a relatively uniform composition, a very high plasticity that disagrees with the quantity and type of clayey minerals found and a quite unusual combination of high compressibility and high intrinsic shear resistance. Being organic matter the major source of all the original features of the soils' behaviour, it can be regarded as their most significant constituent, even if their organic content is relatively low.

1 - INTRODUÇÃO

O depósito de solos moles do Baixo Mondego, que se estende ao longo da extensa planície aluvionar do rio Mondego, tem sido objecto de um vasto projecto de investigação desenvolvido no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, dedicado fundamentalmente à sua caracterização geológica e geotécnica. Este projecto de investigação focou igualmente outros aspectos, como sejam a observação e a modelação numérica do comportamento de alguns importantes aterros construídos sobre o depósito de solos moles em estudo, pretendendo-se ainda, no futuro, reunir condições para a construção de um aterro experimental até à rotura.

* Assistente. Departamento de Engenharia Civil, FCT da Universidade de Coimbra. Email: pac@dec.uc.pt

** Professor Associado Agregado. Dep. de Engenharia Civil, FCT da Un. de Coimbra. Email: llemos@dec.uc.pt

Este artigo apresenta, para além das principais características geológicas do depósito, as propriedades físicas, de identificação, de consolidação e tensão – deformação - resistência ao corte mais relevantes dos solos ensaiados, medidas por diversos ensaios laboratoriais e de campo. Os solos moles do depósito do Baixo Mondego possuem algumas características geotécnicas pouco usuais, as quais resultam do efeito combinado das respectivas composições granulométrica, mineralógica e orgânica. A matéria orgânica é a responsável principal por algumas das características de comportamento aparentemente inexplicáveis dos solos, as quais são igualmente encontradas noutros depósitos de solos moderadamente orgânicos existentes no mundo. Ainda que a informação geotécnica aqui apresentada tenha sido recolhida no local experimental seleccionado (Quinta do Foja), ela foi qualitativamente confirmada pela obtida noutros locais do depósito, sendo por isso representativa do comportamento deste.

O estudo de depósitos de solos orgânicos continua a ter, ainda hoje, uma importância relevante na investigação no domínio da Geotecnia, uma vez que apesar dos evidentes avanços na compreensão do seu comportamento nem sempre as obras realizadas sobre estes depósitos se têm comportado de forma exemplar. Além disso, a investigação neste ramo da Geotecnia é fortemente incentivada pela crescente procura destes depósitos enquanto local de fundação, em consequência da progressiva escassez de locais com melhores características geotécnicas e da necessidade de adoptar soluções técnicas cada vez mais económicas.

2 - GEOLOGIA DO DEPÓSITO

Tal como em muitos outros depósitos aluvionares semelhantes existentes no mundo, a formação do depósito do Baixo Mondego ocorreu sob as condições geológicas existentes durante e após o último período glacial, em resultado de um processo de sedimentação que se mostrou estritamente controlado pelas flutuações do nível do mar verificadas durante os últimos 20 000 anos. Além disso, sendo do ponto de vista geológico muito recentes, estes depósitos não apresentam, salvo raras excepções facilmente compreensíveis, efeitos pós-deposicionais muito desenvolvidos.

2.1 - Formação

No auge do último período glacial, o nível do mar situava-se cerca de 120 m abaixo da sua posição actual (Fig. 1), uma vez que grandes quantidades de água estavam consignadas à formação de enormes glaciares cuja espessura atingia, em alguns locais, vários quilómetros. Em consequência da adaptação do sistema de drenagem a essas condições, as quais motivaram uma forte intensificação da acção erosiva no continente, em especial na zona mais próxima da foz dos rios, foram escavados vales muito profundos ao longo do curso dos rios. Desde esse período, as significativas alterações climáticas entretanto ocorridas produziram uma progressiva redução do volume dos glaciares, a qual induziu uma subida lenta mas sustentada do nível do mar até ao presente. Devido à subida do nível do mar e consequente diminuição da velocidade da corrente fluvial, nomeadamente junto à foz, o processo de sedimentação nos rios intensificou-se, levando à formação de muitos depósitos sedimentares nos vales anteriormente escavados. O aumento da salinidade das águas decorrente da maior influência de águas marinhas na foz dos rios contribuiu igualmente para acentuar a deposição de sedimentos durante esta fase. A formação, neste período, de importantes depósitos contendo matéria orgânica encontra-se por seu lado associada ao importante aumento da quantidade de substâncias orgânicas, tanto de origem vegetal como animal, em suspensão, uma vez que o aumento da temperatura entretanto verificado levou ao florescimento da vida biológica.

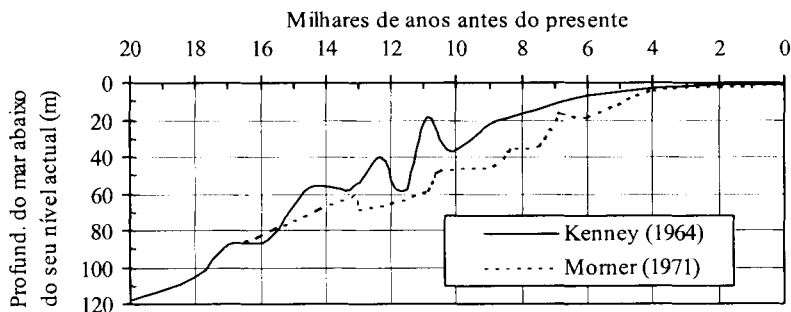


Fig. 1 - Variação da posição do nível do mar desde a última época glacial (Quigley, 1980).

O depósito de solos moles do Baixo Mondego formou-se com base no mecanismo geológico geral antes descrito, assumindo o rio Mondego a função de agente responsável pela escavação dos vales envolventes e pelo transporte dos sedimentos recolhidos a montante e posteriormente depositados na sua secção final. Estes sedimentos resultaram da degradação e alteração dos maciços rochosos, fundamentalmente graníticos, atravessados a montante pelo rio Mondego. Assim, do ponto de vista da composição mineralógica do depósito, a qual é determinada pela origem dos sedimentos depositados, o quartzo, as micas e a caulinite são os minerais predominantes, evidenciando as características da rocha-mãe. Relativamente à composição granulométrica, a qual é determinada pelas características do meio sedimentar, o silte assume-se como a fracção granulométrica dominante, sendo reservado um papel secundário à fracção argilosa. A presença significativa de matéria orgânica e de fragmentos de conchas de organismos marinhos enquadra-se nas características típicas do ambiente deposicional em que ocorreu a formação do depósito, tal como anteriormente descrito.

2.2 - Efeitos pós-deposicionais

Tal como noutros depósitos geologicamente recentes, os efeitos pós-deposicionais no depósito do Baixo Mondego não são, em geral, muito expressivos, ainda que existam alguns, como os resultantes dos processos de dessecação, flutuação sazonal do nível freático e consolidação secundária, que podem assumir alguma importância. Em consequência da acção combinada destes fenómenos, este tipo de depósitos exhibe frequentemente uma camada superficial sobreconsolidada relativamente consistente, vulgarmente designada por crusta dessecada, abaixo da qual se verifica que o grau de sobreconsolidação é pouco superior à unidade e, em princípio, relativamente uniforme em profundidade.

3 - CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DO DEPÓSITO

De modo a determinar as propriedades geotécnicas do depósito do Baixo Mondego, foram realizadas várias campanhas de prospecção *in situ*, nomeadamente no local experimental seleccionado (Quinta do Foja) e ainda ao longo do traçado do Itinerário Principal IP3, na secção em que este atravessa o depósito. Face à quantidade e à qualidade da informação geotécnica obtida no local experimental da Quinta do Foja, os resultados apresentados neste artigo provêm maioritariamente das campanhas de prospecção aí realizadas, embora a sua validade tenha sido qualitativamente confirmada noutros locais do depósito. A informação geotécnica aqui reproduzida foi obtida através de um número significativo de ensaios, incluindo ensaios de campo e de laboratório, realizados, neste último caso, tanto sobre amostras intactas como sobre amostras reconstituídas.

3.1 - Propriedades físicas e de identificação

As propriedades físicas e de identificação do depósito foram estabelecidas com base na combinação da informação proporcionada por ensaios realizados *in situ*, para medição do teor em água e do peso volúmico, por ensaios laboratoriais, para avaliação das características de identificação e da densidade das partículas sólidas, e ainda por relações matemáticas, para quantificação de propriedades físicas como o índice de vazios e o grau de saturação. A Fig. 2 apresenta os perfis de variação em profundidade das principais propriedades físicas e de identificação dos solos moles presentes no local experimental da Quinta do Foja, onde estes atingem uma espessura média de cerca de 20 m.

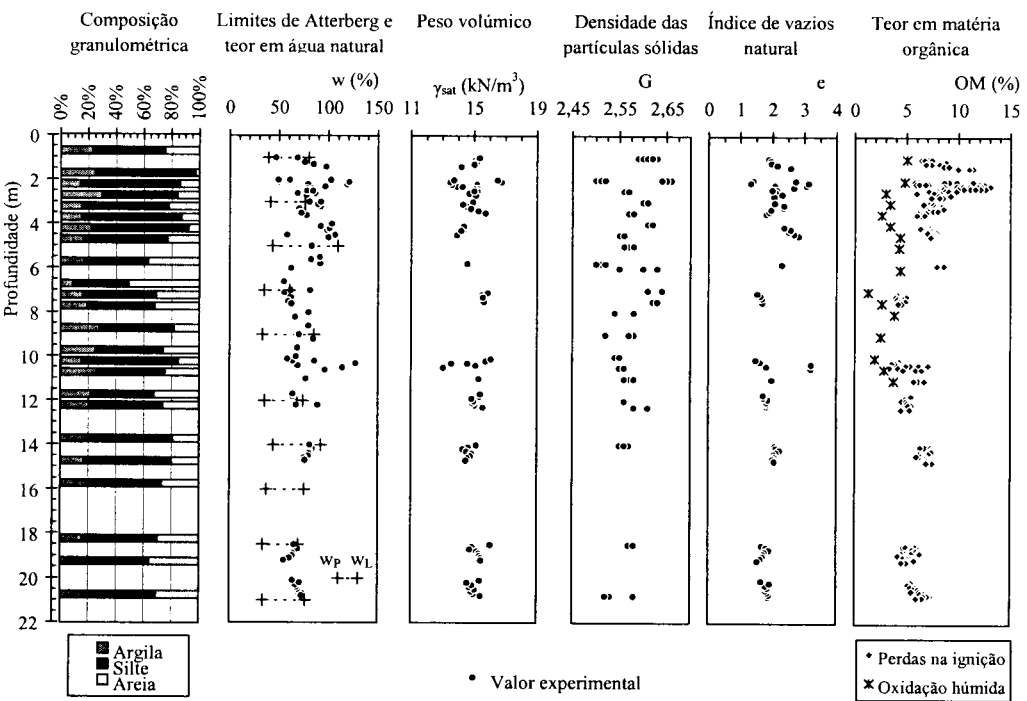


Fig. 2 - Propriedades físicas e de identificação do depósito do Baixo Mondego (Coelho, 2000).

Uma das características mais significativas do depósito é, tal como se pode observar na Fig. 2, a enorme variabilidade que afecta a quase totalidade das suas propriedades físicas e algumas das suas propriedades de identificação. De facto, os perfis determinados de variação em profundidade das propriedades físicas, dos limites de consistência e do teor em matéria orgânica, mostram que todas estas propriedades se revelam extremamente variáveis a igual profundidade. Como exemplo ilustrativo podem ser referidos o teor em água ou o índice de vazios que, à profundidade de cerca de 2 m, variam, respectivamente, entre 50 e 120 % e entre 1,2 e 3,1. A possibilidade de tal variabilidade resultar da insuficiente qualidade dos métodos de ensaio utilizados na avaliação das propriedades é excluída pelos seguintes factos: ela foi observada independentemente da técnica de ensaio alternativa utilizada e o valor do grau de saturação, avaliado com base noutros índices físicos, é uniforme em profundidade e, tal como esperado, muito próximo de 100 %. A variabilidade encontrada assume-se assim claramente como uma característica intrínseca do depósito (Coelho e Lemos, 2001a).

Outra característica bastante significativa do estado físico do depósito é a grandeza de algumas das suas propriedades físicas, como o teor em água, o peso volúmico ou o índice de vazios. De facto, para além da sua importante variabilidade, as propriedades físicas do solo destacam-se também por exibirem valores não muito usuais, como sejam valores do teor em água superiores a 100 %, do índice de vazios que por vezes excedem 3, do peso volúmico saturado raramente excedendo 15 kN/m³ ou mesmo da densidade das partículas sólidas que se situam, em média, abaixo do valor vulgarmente considerado mais comum (2,6). A grandeza das propriedades descritas torna-se particularmente significativa quando é confrontada com o facto de a fracção argilosa presente nos solos em causa ser, em geral, da ordem de 20 % do peso total das partículas e, além disso, ser constituída por minerais de baixa actividade.

A comparação da evolução média em profundidade e da própria variabilidade da maioria das propriedades, nomeadamente o teor em água, o peso volúmico e o índice de vazios, com o teor em matéria orgânica, permite estabelecer uma relação clara entre a matéria orgânica e as mais relevantes características do estado físico do depósito (Coelho e Lemos, 2001a).

As propriedades de identificação dos solos moles ensaiados apresentam igualmente características peculiares, nomeadamente quando tais propriedades são comparadas entre si e ainda com a composição mineralógica do depósito. Do ponto de vista da dimensão das partículas, a Fig. 2 mostra que a composição granulométrica dos solos é relativamente uniforme em profundidade, sendo o silte a fracção granulométrica dominante. A fracção argilosa, por seu lado, apresenta um desenvolvimento relativamente fraco, raramente excedendo 20 a 25 % do peso total das partículas. Em consequência do tipo de rocha e dos processos de alteração que estiveram na origem dos sedimentos que formam o depósito, esta fracção argilosa é constituída exclusivamente por caulinite, como se confirmou por ensaios de refracção de raio X. O teor em matéria orgânica, quantificado através das perdas por ignição a 400 °C e por oxidação húmida, utilizando H₂O₂, exhibe valores fortemente aleatórios no depósito, mesmo a igual profundidade e em amostras recolhidas com grande proximidade. Os valores obtidos pelo método das perdas por ignição, o qual se revelou ser o mais eficiente, variam entre valores extremos de 3 e 13 %, mas situam-se maioritariamente entre 5 e 10 %.

Qualquer que seja o termo de comparação adoptado, a grandeza da plasticidade do solo no seu estado natural excede largamente as expectativas estabelecidas com base no tipo e na quantidade de minerais argilosos presentes. Os valores mais elucidativos relativamente a esta discrepância foram os obtidos para a actividade (A) do solo no estado natural, a qual foi avaliada entre 1 e 4 e apresenta, por isso, valores absolutamente inesperados face à actividade característica do único mineral argiloso presente: a caulinite (A_{ca} ≈ 0,4). Esta inconsistência aparente é determinada pela presença da matéria orgânica, a qual contribui para um aumento significativo da plasticidade do solo natural através do desenvolvimento de uma componente adicional da plasticidade, de origem orgânica, totalmente independente das características de plasticidade dos minerais argilosos. A existência desta componente da plasticidade de origem não mineral é demonstrada pela expressiva redução da plasticidade do solo que ocorre durante a secagem do solo, a qual promove a degradação progressiva da matéria orgânica presente no solo (Fig. 3a)). Quando a secagem é realizada a 400 °C, temperatura para a qual se observa a eliminação quase total da matéria orgânica e é máxima a redução da plasticidade, verifica-se, como mostra a Fig. 3b), que a plasticidade do solo passa finalmente a ser relativamente consistente com o tipo de mineral argiloso presente, uma vez que a plasticidade do solo é, nessa altura, exclusivamente de origem mineral.

De referir ainda que, tal como expresso na Fig. 2, em quase todo o depósito se verifica que o teor em água natural dos solos moles se encontra próximo ou mesmo acima do respectivo limite de liquidez, o que demonstra inequivocamente a baixa consistência do depósito.

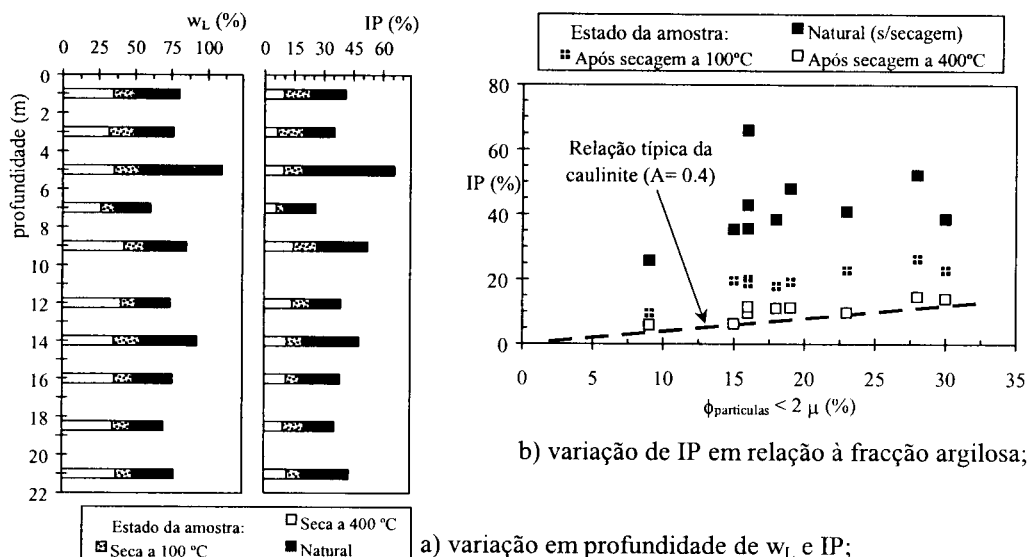


Fig. 3 - Variação das características de plasticidade com o estado das amostras (Coelho, 2000).

Embora tenham sido consideradas todas as características granulométricas e de plasticidade para a classificação dos solos moles presentes no local experimental, utilizando o Sistema de Classificação Unificada de Solos, na versão estabelecida pela ASTM, a classificação foi essencialmente determinada pela redução observada do limite de liquidez (w_L) durante a secagem dos solos a 100 °C. De facto, como se pode deduzir da Fig. 3a), verificou-se que a razão $w_L^{secagem(100^\circ C)} / w_L^{sem\ secagem}$ é, a qualquer profundidade, inferior a 0,75. Face a esta característica, e levando ainda em conta que o $w_L^{sem\ secagem}$ é sempre superior a 50 %, todos os solos ensaiados foram classificados como siltes e argilas orgânicas de alta plasticidade, sendo-lhes assim atribuído o símbolo de grupo OH. Esta classificação permite realçar, se tal não estivesse ainda nesta altura devidamente claro, a importância que a matéria orgânica exerce sobre o comportamento dos solos moles em estudo.

Os resultados dos ensaios apresentados até aqui, assim como a análise dos perfis de variação em profundidade das propriedades físicas e de identificação, no depósito provam claramente a influência da matéria orgânica sobre as propriedades dos solos estudados, tal como aliás se verificou noutros depósitos de características semelhantes existentes no mundo, nomeadamente no depósito inglês de Bothkennar (Hight, 1992; Hight *et al.*, 1992). De entre os efeitos mais significativos da presença de matéria orgânica, merecem destaque os importantes aumentos da variabilidade da maioria das propriedades físicas, em particular do teor em água e do índice de vazios, assim como da plasticidade, para além das significativas reduções dos valores do peso volúmico saturado e da densidade das partículas sólidas. Relações idênticas foram observadas noutros solos contendo matéria orgânica, sendo particularmente relevantes as estabelecidas por Hight *et al.* (1992), Amaryan (1993) e Haan e Amir (1994).

3.2 - Propriedades de compressibilidade e consolidação

As propriedades de compressibilidade e consolidação do depósito do Baixo Mondego, estabelecidas com base em ensaios edométricos realizados sobre amostras intactas recolhidas a diversas profundidade no local experimental da Quinta do Foja, são ilustradas na Fig. 4.

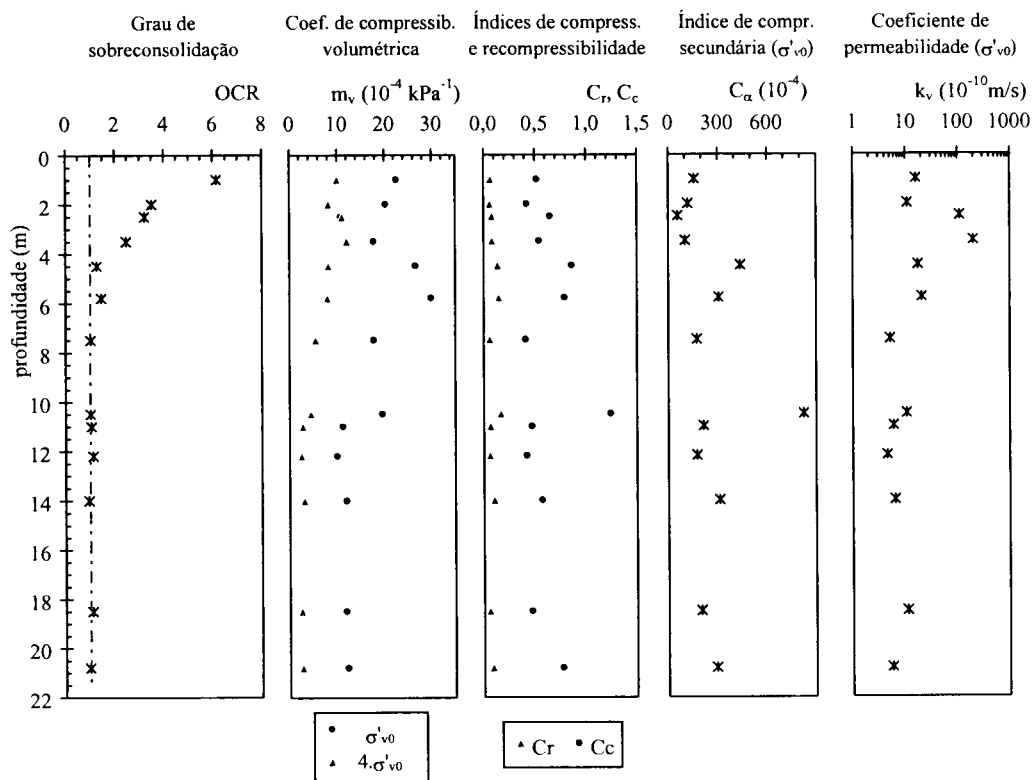


Fig. 4 - Propriedades de compressibilidade e consolidação do depósito do Baixo Mondego (Coelho, 2000).

Antes de proceder à análise da figura, é importante referir que os valores apresentados relativamente às propriedades assinaladas com (σ'_{v0}) , como o índice de compressibilidade secundária, C_α , ou o coeficiente de permeabilidade vertical, k_v , se referem aos valores medidos para uma tensão efectiva de ensaio idêntica à estimada *in situ*, no local de recolha da amostra. O coeficiente de compressibilidade volumétrica é expresso não só para a tensão referida (σ'_{v0}) mas também para uma tensão quádrupla desta ($4 \times \sigma'_{v0}$), ilustrando assim a dependência deste parâmetro relativamente ao estado de tensão efectiva de consolidação. Este esclarecimento é requerido pelo facto de os parâmetros referidos não serem parâmetros intrínsecos do solo.

A primeira conclusão importante que se destaca dos resultados obtidos é a confirmação da existência à superfície do depósito de uma camada sobreconsolidada de espessura algo significativa, a qual forma uma crosta dessecada exibindo um grau de sobreconsolidação decrescente em profundidade. Para profundidades superiores à zona de influência desta crosta, que atinge aproximadamente 5 m de profundidade, o depósito apresenta-se normalmente consolidado ou muito levemente sobreconsolidado, contrariamente às expectativas de que o grau de sobreconsolidação fosse superior, nomeadamente em consequência da ocorrência de consolidação secundária. De notar porém que os valores de OCR medidos podem encontrar-se afectados pela inevitável perturbação das amostras ensaiadas e ainda pelos efeitos da construção de um pequeno aterro auxiliar construído sobre o depósito, algum tempo antes da execução das sondagens, para permitir o transporte de equipamento. Ambos os factos podem contribuir para uma avaliação por defeito do OCR, sobretudo quando este esteja próximo de 1.

No que se refere aos parâmetros relativos à compressibilidade intrínseca dos solos moles presentes no local, verifica-se que estes apresentam valores elevados que revelam que o depósito é, de um modo geral, muito compressível. Relativamente à compressibilidade por consolidação primária, foram medidos valores para o índice de compressibilidade, C_c , bastante variáveis, com extremos de 0,41 e 1,24 (Fig. 4) embora com predominância mais acentuada no intervalo de 0,5 a 0,8. A razão C_r/C_c , por seu lado, foi estimada, em média, em 0,14. Se a razão C_r/C_c apresenta valores perfeitamente compatíveis com os usualmente encontrados na maioria dos depósitos naturais, a magnitude dos valores obtidos para C_c é anormalmente elevada e apenas compreensível face à composição orgânica dos solos que compõem o depósito. Apesar de ser inquestionável a relação entre os valores elevados de C_c e a presença de matéria orgânica, a verdade é que não se observou, nos solos ensaiados, nenhuma relação linear bem definida entre o teor em matéria orgânica e o índice de compressibilidade. De facto, como se ilustra na Fig. 5a), apenas se consegue estabelecer uma banda contendo cerca de 75 % dos resultados que sugere o crescimento de C_c com o teor em matéria orgânica, a partir de um determinado valor de OM. Esta interpretação é, no entanto, claramente subjectiva e não deve ser tida como válida com base no número de ensaios realizado, o qual foi apesar de tudo algo limitado. Ao contrário do que se poderia supor, foi observada uma relação linear relativamente bem definida entre C_c e o teor em água natural (Fig. 5b)). Tal observação sugere que os valores de C_c são determinados não só pela quantidade de matéria orgânica presente, mas também pela sua qualidade e ainda pela quantidade e tipo de minerais argilosos existentes no solo. Sendo o teor em água igualmente influenciado por todos os factores enunciados, pode assim de algum modo ser explicada a boa relação encontrada entre C_c e w_0 , como aliás havia já sido proposto por outros autores, alguns dos quais citados pelo CUR (1996).

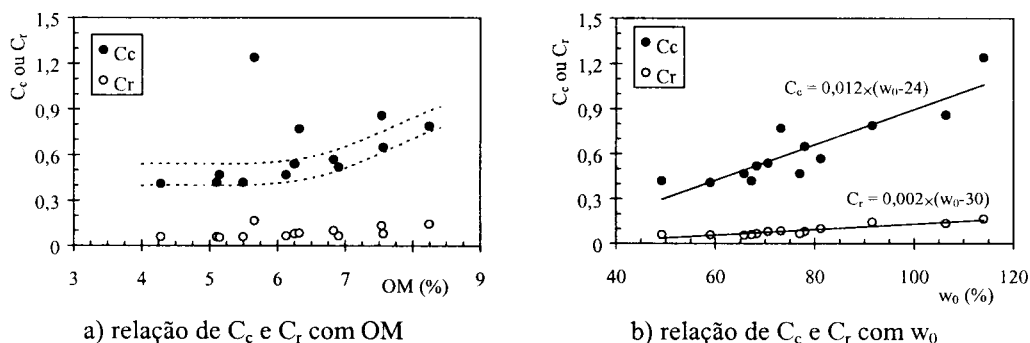


Fig. 5 - Relação da compressibilidade intrínseca por consolidação primária dos solos moles do Baixo Mondego com outras propriedades (Coelho e Lemos, 2001b).

A compressibilidade devida à consolidação secundária é também descrita por parâmetros que são relativamente elevados e bastante variáveis (Fig. 4). A quantificação da razão proposta por Mesri, C_α/C_i , onde C_i designa o declive da curva edométrica para uma dada tensão σ'_i e varia entre C_r e C_c , revelou-se a forma mais consistente de avaliar a compressibilidade associada à consolidação secundária (Fig. 6). Em cada amostra foram medidos valores médios para C_α/C_i no intervalo $0,05 \pm 0,01$, o qual é considerado por Mesri e Castro (1987) como característico de solos orgânicos de alta plasticidade. A grandeza dos valores encontrados para C_α/C_i reforça a suposição inicial de que, abaixo da crusta dessecada, seriam de esperar valores de OCR algo superiores, reflectindo assim os efeitos da ocorrência de consolidação secundária. Como previsto pelo autor, a razão de Mesri é variável em descarga (Coelho e Lemos, 2001b).

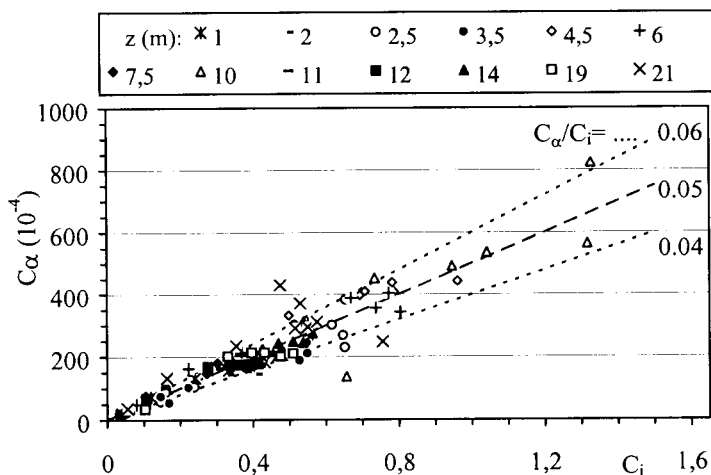


Fig. 6 - Avaliação da razão de Mesri C_α / C_i para todos os escalões de carga e recarga da totalidade dos ensaios edométricos realizados (Coelho e Lemos, 2001b).

A permeabilidade dos solos moles presentes na Quinta do Foja foi igualmente quantificada com base nos resultados de ensaios edométricos realizados sobre amostras intactas, os quais, como se sabe, para além de fornecerem informação exclusivamente sobre a permeabilidade do solo na direcção vertical, não permitem estabelecer com rigor as características de permeabilidade global do maciço. Não ignorando as limitações descritas, são apresentados na Fig. 4 os valores medidos nas amostras para k_v , para o estado de tensão *in situ* relevante, os quais se situam entre 5×10^{-10} e 200×10^{-10} m/s, aparentemente em concordância com o que se esperaria num solo altamente plástico e contendo argila, mesmo que numa proporção relativamente pequena.

De um modo geral, os resultados dos ensaios edométricos mostram a influência significativa da matéria orgânica sobre as características de compressibilidade intrínseca dos solos moles estudados, tanto no que respeita ao fenómeno de consolidação primária como ao fenómeno de consolidação secundária. De referir ainda que a compressibilidade do depósito natural, já de si elevada face às características de compressibilidade intrínseca dos solos, é agravada pelos baixos valores de OCR e do estado de tensão efectiva nele observados, como se comprova pelos reduzidos valores do coeficiente de compressibilidade volumétrico (m_v) medidos para o estado de tensão *in situ*, os quais são apresentados na Fig. 4.

3.3 - Comportamento tensão – deformação - resistência ao corte

Para a caracterização do comportamento tensão – deformação - resistência ao corte dos solos da Quinta do Foja foi adoptado um procedimento baseado na conjugação da informação obtida por diferentes meios, nomeadamente ensaios de campo, como o ensaio de molinete, e de laboratório, como o triaxial. A fim de maximizar as potencialidades de cada ensaio, procurou-se definir um modelo de comportamento global dos solos em estudo com base em diversos tipos de ensaios triaxiais, utilizando amostras intactas e amostras reconstituídas, tendo estas últimas sido produzidas por consolidação anisotrópica de material recolhido na Quinta do Foja e propositadamente remoldado. No final, a resistência não drenada normalizada determinada em laboratório foi comparada com a obtida no campo através de ensaios de molinete.

3.3.1 - Ensaios triaxiais

A fim de definir o modelo global de comportamento tensão – deformação - resistência ao corte do solo, foi primeiro estabelecido um modelo de comportamento baseado exclusivamente em ensaios triaxiais realizados sobre amostras reconstituídas, explorando assim as potencialidades experimentais proporcionadas por este tipo de amostras, que se distinguem pela sua homogeneidade. No entanto, como o processo de reconstituição de amostras não permite, em geral, reproduzir adequadamente a estrutura do solo intacto, o comportamento de amostras intactas foi posteriormente comparado com o modelo estabelecido com base nas amostras reconstituídas, a fim de verificar a capacidade do modelo estabelecido para descrever o comportamento do solo natural. Os ensaios triaxiais aqui apresentados foram conduzidos sempre com consolidação anisotrópica, tendo o corte sido produzido alternativamente em extensão e em compressão, em qualquer caso produzindo o aumento da tensão média e adoptando o método das tensões controladas. Com o objectivo de minorar os efeitos da perturbação das amostras intactas, foi sempre aplicada uma das duas técnicas de reconsolidação mais reconhecidas, nomeadamente a técnica de recompressão para as tensões *in situ*, preconizada pelo NGI, ou a técnica SHANSEP, desenvolvida no MIT. Os resultados obtidos em amostras idênticas utilizando estas técnicas foram qualitativamente semelhantes, o que sugere que o solo natural não tem uma estrutura muito marcada ou que, caso esta realmente exista, foi largamente destruída na fase de amostragem.

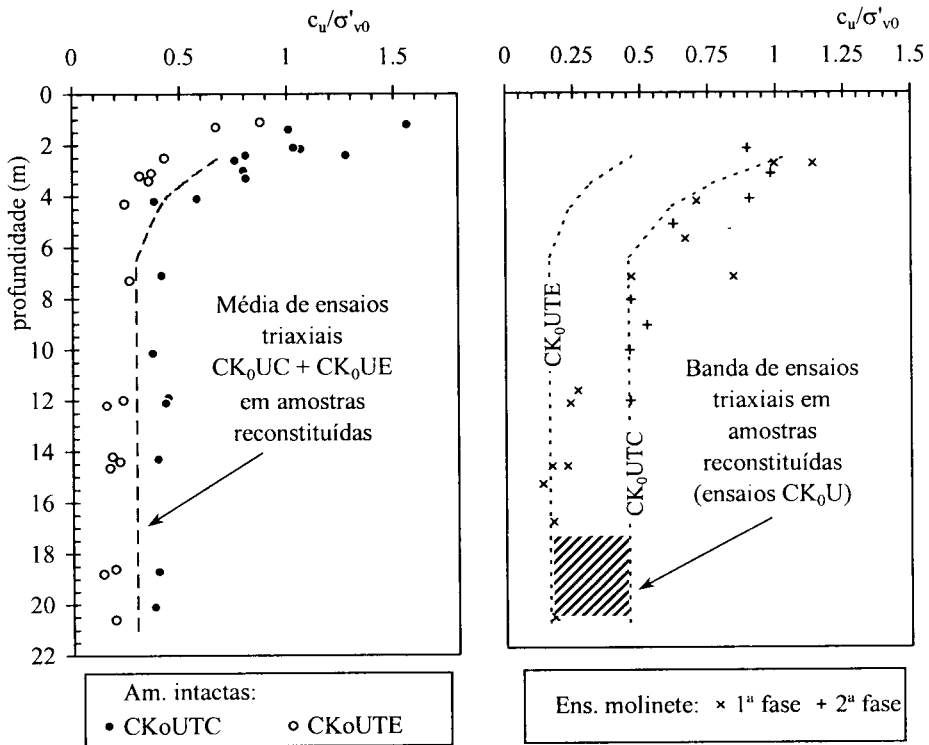
Antes de discutir os resultados, refira-se desde já que o modelo inicialmente estabelecido com base unicamente no solo reconstituído, aceitando os inevitáveis efeitos da variabilidade de composição das amostras intactas, mostrou ser válido para o solo natural, permitindo supor que a estrutura presente no solo no estado natural não é muito desenvolvida (Coelho, 2000). Este resultado não está porém totalmente de acordo com o observado noutros depósitos de solos moles semelhantes, como no depósito de Bothkennar (Allman e Atkinson, 1992), o que pode ser explicado pelas diferenças associadas ao processo de formação ou ainda pela menor importância e actividade da fracção argilosa presente na Quinta do Foja, factores que condicionam o desenvolvimento da estrutura do solo natural. As conclusões obtidas podem ainda ter sido deturpadas pela eventual perturbação que tenha afectado o comportamento das amostras intactas disponíveis para o estudo do depósito do Baixo Mondego.

Um dos mais interessantes e significativos resultados obtidos com os ensaios realizados foi a grandeza do ângulo de resistência ao corte, correspondente ao estado crítico, medido em termos de tensões efectivas (ϕ'_{cs}), cujos valores foram estimados entre 37,8°, em compressão, e 36,3°, em extensão. Ainda que estes valores reflectam apenas a análise experimental das amostras reconstituídas, eles estão, nas condições anteriormente expressas, qualitativamente de acordo com os resultados medidos em amostras intactas. O elevado valor médio medido para ϕ'_{cs} , situado em cerca de 37°, demonstra claramente a elevada resistência intrínseca dos solos moles presentes na Quinta do Foja, a qual parece assim ser exclusivamente determinada pela fracção granular (silte e areia) que domina a composição granulométrica destes solos. O facto de a grandeza de ϕ'_{cs} parecer à primeira vista incompatível com a elevada plasticidade dos solos, a qual recorde-se é determinada somente numa pequena parte pelos minerais argilosos presentes, é uma mera consequência dos efeitos da matéria orgânica. De facto, se a matéria orgânica for removida e a plasticidade do solo tratado reflectir apenas a presença dos minerais argilosos, o que resulta num IP médio da ordem de 10 %, o valor medido para ϕ'_{cs} revela-se muito mais consistente. O facto de a matéria orgânica poder contribuir para o aumento significativo da plasticidade de um solo sem afectar a sua resistência intrínseca, medida por exemplo através de ϕ'_{cs} , foi observada por outros autores em depósitos com características semelhantes, como por exemplo Hight *et al.* (1992). Outros autores, como Mesri (1993),

chegam mesmo a admitir a possibilidade de a matéria orgânica contribuir para aumentar a resistência dos solos, pelo menos quando esta seja quantificada através da respectiva resistência não drenada. A reforçar a hipótese de que a matéria orgânica possa aumentar a plasticidade de um solo sem afectar algumas das suas propriedades mecânicas, refira-se que a melhor estimativa experimental produzida para o valor de K_0^{nc} neste depósito, situada em 0,4, coincide quase exactamente com a que seria obtida por aplicação da correlação devida a Jaky ($K_0^{nc} = 1 - \sin \phi_{cs}^{TC}$), de aplicação muito popular em solos granulares, considerando $\phi_{cs}^{TC} = 37,8^\circ$. Pelo contrário, quaisquer estimativas de K_0^{nc} baseadas em correlações aplicáveis a solos plásticos e que considerem a plasticidade do solo natural mostram-se totalmente desajustadas.

Igualmente surpreendentes foram os valores medidos para as extensões axiais no estado crítico, os quais atingiram valores tão altos quanto 7 %, em compressão triaxial, e 14 %, em extensão triaxial. Embora muito superiores ao habitual, estes valores podem ser apesar de tudo justificadas pela elevada compressibilidade do solo, como foi já anteriormente analisada.

No que se refere à resistência não drenada normalizada, c_u/σ'_{v0} , característica do depósito do Baixo Mondego, a Fig. 7 ilustra o conjunto de resultados deduzidos dos ensaios de campo e de laboratório realizados no local experimental da Quinta do Foja.



a) resultados de ensaios triaxiais diversos usando amostras intactas e reconstituídas

b) comparação dos resultados de ensaios triaxiais e de molinete

Fig. 7 - Variação da resistência não drenada normalizada, c_u/σ'_{v0} , observada em profundidade na Quinta do Foja (modificada de Coelho, 2000, e Coelho e Lemos, 2001c).

A Fig. 7a) apresenta o perfil de variação de c_u/σ'_{v0} no depósito deduzido dos ensaios triaxiais de compressão e extensão realizados em laboratório sobre amostras intactas e reconstituídas, as quais mostraram, tal como em relação a outros parâmetros, possuir um comportamento semelhante. De facto, embora por uma questão de clareza se reproduzam na figura apenas os valores de c_u/σ'_{v0} correspondentes à média dos valores medidos em ensaios de compressão e extensão sobre amostras reconstituídas, verificou-se que os valores médios medidos, tanto em compressão como em extensão, em amostras intactas, são muito próximos dos obtidos, em amostras reconstituídas, em ensaios do mesmo tipo. Aliás, é por esta razão que a média dos resultados indicados para as amostras intactas coincide quase sempre com a linha apresentada como característica das amostras reconstituídas. Tal como em ocasiões anteriores, não é de excluir a possibilidade de a perturbação das amostras intactas disponíveis para ensaio ter condicionado os resultados obtidos.

Para além de ser idêntico o perfil de c_u/σ'_{v0} deduzido dos ensaios sobre amostras intactas e reconstituídas, é desde logo evidente que a evolução da razão c_u/σ'_{v0} em profundidade reflecte, como aliás seria de esperar, idêntica variação dos valores de OCR. Esta é a razão para a redução observada de c_u/σ'_{v0} em profundidade, uma vez que os valores mais elevados se situam na camada superficial sobreconsolidada por dessecação. Naturalmente que, em termos absolutos, o perfil de variação da resistência não drenada (c_u) em profundidade pode ser distinto, uma vez que esta depende fortemente da tensão efectiva de consolidação, a qual cresce inevitavelmente em profundidade.

Merece ainda destaque a elevada anisotropia de resistência, avaliada pela razão c_u^{TE}/c_u^{TC} , exibida pelos solos moles do depósito do Baixo Mondego, a qual mostrou ser muito significativa a qualquer profundidade ou, dito de modo equivalente, para qualquer valor de OCR. Embora não tenha sido observada nenhuma variação suficientemente consistente da razão c_u^{TE}/c_u^{TC} com OCR, os resultados obtidos sugerem que esta possa crescer ligeiramente com OCR, sobretudo para valores de OCR superiores a 2. Para a gama de valores de OCR adoptada nos ensaios, a razão c_u^{TE}/c_u^{TC} foi avaliada entre 0,4 e 0,5, aproximadamente.

Por fim, é particularmente interessante observar uma vez mais que a resistência intrínseca do solo, quando medida de uma forma independente do estado de tensão, nomeadamente pela razão c_u/σ'_{v0} , é relativamente elevada. De facto, para o solo normalmente consolidado, por exemplo, a razão c_u/σ'_{v0} varia entre 0,17, em extensão, e 0,42, em compressão, o que sugere que a hipótese de Mesri (1975) de existir uma razão constante e igual a 0,22 para c_u/σ'_p possa ser, neste caso, algo conservadora. Conclusões idênticas obtidas noutros depósitos levaram aliás este mesmo autor a rever a hipótese inicialmente estabelecida, modificando-a, sempre que estejam em causa solos orgânicos, para uma relação do tipo $c_u/\sigma'_p = 0,26$ (Mesri, 1993). De referir contudo que, em termos absolutos, a resistência não drenada do depósito em estudo não deixa de ser bastante reduzida, uma vez que o estado de tensão efectiva associado é caracterizado por tensões com valores bastante baixos.

Os resultados descritos provam que, ao contrário do inicialmente suposto, os solos moles da Quinta do Foja possuem resistência intrínseca elevada, qualquer que seja o parâmetro intrínseco tomado como referência. Numa perspectiva mais geral, tais resultados mostram ainda que, devido aos efeitos significativos mas pouco usuais da presença de matéria orgânica, os solos moles da Quinta do Foja exibem uma combinação algo invulgar de elevada resistência intrínseca com alta compressibilidade intrínseca e alta plasticidade natural.

3.3.2 - Ensaios de molinete

A Fig. 7b) permite comparar os valores da resistência não drenada normalizada, c_u/σ'_{v0} , medida no campo por ensaios de molinete com os valores deduzidos, em laboratório, a partir

dos resultados dos ensaios triaxiais de compressão e extensão. De modo a facilitar a análise dos resultados, apenas se reproduzem na figura os resultados dos ensaios CK₀UTC e CK₀UTE, isto é, ensaios triaxiais com consolidação anisotrópica (K₀) e corte não drenado, em compressão e extensão, respectivamente, realizados sobre amostras reconstituídas.

Conforme se pode observar na figura, os resultados dos ensaios de molinete confirmam qualitativamente o perfil de variação em profundidade da razão c_u/σ'_{v0} , inicialmente estabelecido através de ensaios triaxiais, ainda que os valores absolutos de c_u/σ'_{v0} medidos a cada profundidade apresentem frequentemente diferenças muito significativas, as quais requerem uma análise mais detalhada.

Na zona superficial, onde o depósito exibe uma crosta dessecada que por vezes se apresenta fortemente sobreconsolidada, os ensaios de molinete produzem valores para a resistência não drenada do depósito claramente superiores aos estabelecidos com base em ensaios triaxiais. De facto, verifica-se que os valores medidos por ensaios de molinete excedem, em geral, os fornecidos por ensaios CK₀UTC, os quais deveriam constituir, em princípio, um limite superior para a resistência não drenada global do depósito. Esta observação parece reforçar de algum modo as observações de Garga e Khan (1994), as quais sugerem que o uso do ensaio de molinete é particularmente desaconselhado na avaliação da resistência não drenada de solos sobreconsolidados, nomeadamente em crostas dessecadas, uma vez que, devido ao aumento das tensões horizontais resultantes do aumento de OCR, este ensaio tende a sobrestimar a resistência real do solo. Outra explicação plausível pode residir, pelo menos em alguns casos, no acréscimo de resistência induzido pela existência de fragmentos de conchas na zona da superfície de rotura determinada pela rotação das pás do molinete, nomeadamente entre as profundidades 2 e 12 m, onde a ocorrência de tais fragmentos, por vezes de grandes dimensões, é mais significativa. Esta não parece porém uma razão que justifique o sistemático diferencial de resistência não drenada observado na zona superficial entre os ensaios triaxiais e de molinete.

Ao contrário do que acontece na crosta dessecada, os resultados obtidos por ensaios de molinete a maiores profundidades tendem a aproximar-se dos medidos por ensaios CK₀UTE, o que sugere que a resistência não drenada global do depósito estimada pelos ensaios de campo é, por razões idênticas às anteriormente referidas, inferior à deduzida dos ensaios laboratoriais. Tendo em conta os relatos da empresa que executou os ensaios de campo, no que se refere à dificuldade de furação, estabilização do fundo do furo e realização dos ensaios de molinete a maiores profundidades, presumivelmente devido ao fluxo de água para o interior do tubo, este facto pode ser um efeito da perturbação do solo *in situ* previamente à realização do ensaio de molinete. De facto, face às características dos solos, nomeadamente à sua composição, OCR e presumível estrutura, não se encontra qualquer outra razão para a redução observada, entre 10 e 20 m de profundidade, dos valores de c_u/σ'_{v0} medidos por ensaios de molinete.

No seu conjunto, os resultados apresentados suscitam dúvidas relevantes sobre a validade da utilização do ensaio de molinete na caracterização da resistência não drenada do depósito de solos moles em estudo, onde, aparentemente, este ensaio encontraria um local de aplicação privilegiada. De facto, a sua utilização revelou dificuldades, ainda que por razões distintas, tanto na zona superficial dessecada e sobreconsolidada, onde aparentemente sobrestima a resistência do depósito, como a maiores profundidades, onde o solo se apresenta quasi normalmente consolidado e o ensaio parece subestimar a resistência do depósito.

4 - CONCLUSÕES

O depósito de solos moles do Baixo Mondego, tal como muitos outros depósitos aluvionares recentes existentes no mundo, deve a sua formação aos episódios geológicos e às

correspondentes flutuações do nível do mar que ocorreram durante os últimos 20 000 anos, cuja compreensão se revela fundamental para explicar algumas das características de comportamento do depósito que foram experimentalmente observadas. De facto, este depósito apresenta algumas características geotécnicas surpreendentes que se comprovou serem essencialmente determinadas pela presença de matéria orgânica, a qual, embora sendo um constituinte pouco significativo dos solos, nomeadamente em termos de peso, exerce uma influência absolutamente notável sobre quase todas as suas propriedades.

Do ponto de vista do comportamento geotécnico global dos solos ensaiados são identificadas várias inconsistências aparentes, sempre directamente ligadas à presença de matéria orgânica, entre as quais se destacam:

- a enorme variabilidade das propriedades físicas dos solos, a qual assume uma magnitude exagerada quando analisada exclusivamente face à relativa uniformidade das composições granulométrica e mineralógica;

- a grandeza da plasticidade do solo natural, a qual é muito superior à que seria previsível em solos contendo quantidades moderadas, geralmente da ordem de 20 %, de uma argila de baixa actividade (caulinite);

- a combinação pouco usual de elevada resistência intrínseca com compressibilidade e plasticidade elevadas.

É ainda particularmente relevante o facto de algumas das propriedades físicas dos solos, como sejam o teor em água, o índice de vazios ou o peso volúmico, apresentarem valores cuja grandeza se afasta dos valores usualmente observados em depósitos naturais inorgânicos, sobretudo se for tido em conta que a composição granulométrica dos solos é fundamentalmente controlada pelas fracções siltosa e ou arenosa, o que faz com que estes sejam solos claramente granulares. No que se refere à plasticidade dos solos, foram obtidos resultados que contribuem de forma significativa para, em solos orgânicos, prever a sensibilidade da plasticidade ao estado das amostras ensaiadas e ainda compreender as relações entre a plasticidade e as composições granulométricas e mineralógicas.

Do ponto de vista da compressibilidade, por seu lado, foi observado que os solos ensaiados são francamente compressíveis, o que não será de estranhar face à sua proveniência: um depósito de solos moles. No entanto, verificou-se que a elevada compressibilidade natural destes solos não resulta apenas de serem baixos os valores das tensões efectivas *in situ* e das tensões de pré-consolidação, mas também, e sobretudo, do facto de possuírem uma compressibilidade intrínseca muito significativa, tanto resultante da ocorrência de consolidação primária como de consolidação secundária. De facto, verificou-se serem muito elevados os valores típicos observados para o índice de compressibilidade, C_c , o qual excede frequentemente 0,5 e, ocasionalmente, atinge mesmo valores superiores à unidade, o que revela a importância das deformações associadas ao fenómeno de consolidação primária. Do ponto de vista da consolidação secundária, a medição de um valor médio para a razão C_α/C_c de 0,05, superior ao usualmente encontrado em depósitos naturais inorgânicos, mostra igualmente que este fenómeno assume uma expressão mais significativa neste depósito. De referir porém que embora seja inquestionável a relação entre a grandeza da compressibilidade intrínseca dos solos moles do Baixo Mondego e a presença de matéria orgânica, não foi observada nenhuma relação linear entre o teor em matéria orgânica, OM, e o índice de compressibilidade, C_c , o qual contudo se correlaciona bem com o teor em água natural, w_0 .

Ao contrário do que inicialmente se supôs, os solos moles ensaiados exibem uma resistência intrínseca elevada, a qual é revelada por um valor médio do ângulo de resistência ao corte em termos de tensões efectivas, no estado crítico, de 37°, ou ainda por uma resistência não drenada normalizada, c_u/σ'_{v0} , superior à usualmente encontrada noutros solos plásticos. Tais valores, ainda que perfeitamente compatíveis com a composição granular dos solos, são

inesperadamente elevados quando comparados com a sua plasticidade no estado natural. De recordar porém que a resistência não drenada absoluta medida *in situ* é, como aliás seria de esperar num depósito de solos moles, manifestamente baixa, em resultado da combinação dos baixos valores das tensões efectivas *in situ* e de pré-consolidação.

No que se refere à avaliação da resistência não drenada do depósito de solos moles do Baixo Mondego através de ensaios de molinete, foram obtidos alguns resultados algo inesperados e que colocam em causa a qualidade dos valores fornecidos por este ensaio neste tipo de depósitos. No entanto, a validade das conclusões formuladas e a sua generalização a outros depósitos requer uma análise mais cuidada baseada em maior número de resultados experimentais e, se possível, obtidos em condições de ensaio mais favoráveis.

Como conclusão geral, pode ainda referir-se que a análise dos resultados experimentais obtidos, os quais são típicos de solos moderadamente orgânicos, mostra a enorme influência que a matéria orgânica exerce sobre o comportamento dos solos, mesmo que, como acontece no depósito de estudo, a sua proporção em termos do peso de partículas seja relativamente pequena. Os resultados obtidos evidenciam ainda a impossibilidade de correlacionar a resistência intrínseca deste tipo de solos com a sua plasticidade natural, sobretudo se tal for tentado à custa de correlações estabelecidas com base em solos inorgânicos, onde a plasticidade tem origem exclusivamente nos minerais argilosos. Uma vez que, como se descreveu, a matéria orgânica controla fortemente as principais características de comportamento destes solos, ela deverá ser justamente encarada como um dos seus constituintes mais significativos.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar o seu reconhecido agradecimento às instituições que financiaram a investigação que produziu os resultados nos quais se baseia este trabalho, nomeadamente ao Centro de Investigação em Engenharia Civil (CIEC) e à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através do projecto PRAXIS/C/ECM/CEG/14259/98.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allman, M. A. e Atkinson, J. H. *Mechanical properties of reconstituted Bothkennar soil*. Géotechnique, vol. 42, Nº 2, pp. 289-301, 1992.
- Amaryan, L. S. *Soft soil properties and testing methods*. Geotechnika 7, R. B. Zeidler, Balkema, Rotterdam, 1993.
- Coelho, P. A. L. F. *Caracterização geotécnica de solos moles: estudo do local experimental da Quinta do Foja (Baixo Mondego)*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2000.
- Coelho, P. A. L. F. e Lemos, L. J. L. *On the physical and identification properties of a slightly organic deposit*. Proceedings 14th SEAGC- Southeast Asian Geotechnical Conference, vol. 2, pp. 1001-1004, Hong-Kong, China, 2001a.
- Coelho, P. A. L. F. e Lemos, L. J. L. *On the physical and identification properties of a slightly organic deposit*. Proceedings 3rd ICSSE- International Conference on Soft Soil Engineering, pp. 663-668, Hong-Kong, China, 2001b.
- Coelho, P. A. L. F. e Lemos, L. J. L. *Geological and geotechnical characterisation of a Portuguese deposit of soft soils*. Proceedings XVth ICSMGE- International Conference on Soils Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 1, pp. 389-162, Istanbul, Turkey, 2001c.
- CUR. *Building on soft soils*. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1996.

- Garga, V. K. e Khan, M. A. *Evaluation of K_0 and its influence on the field vane strength of overconsolidated soils*. Proceedings XIIIth ICSMGE- International Conference on Soils Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 157-162, New Delhi, India, 1994.
- Haan, E. J. D. e Amir, L. S. F. E. *A simple formula for final settlement of surface loads on peat*. Advances in Understanding and Modelling the Mechanical Behaviour of Peat, pp. 35-48 Haan, Termaat & Edil Editors, Balkema, Rotterdam, 1994.
- Hight, D. W. *Characterization of the Bothkennar clay: implications for site investigation practice*. Géotechnique, vol. 42, N° 2, pp. 377-378, 1992.
- Hight, D. W.; Bond, A. J. e Legge, J. D. *Characterization of the Bothkennar clay: an overview*. Géotechnique, vol. 42, N° 2, pp. 303-347, 1992.
- Mesri, G. *Discussion on New design procedure for stability of soft clays*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 101, pp. 409-412, 1975.
- Mesri, G. *Discussion on Initial investigation of the soft clay test site at Bothkennar*. Géotechnique, vol. 43, N° 3, pp. 503-504, 1993.
- Mesri, G. e Castro, A. *C_d/C_c concept and k_0 during secondary compression*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 113, N° 3, pp. 230-247, 1987.
- Quigley, R. M. *Geology, mineralogy and geochemistry of soft soils and their relationship to geotechnical problems*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 17, N° 2, pp. 261-285, 1980.