

PARÂMETROS FÍSICOS E DE IDENTIFICAÇÃO DAS ALUVIÕES SILTO-ARGILOSAS MOLES DE PORTUGAL

PHYSICAL AND IDENTIFICATION PARAMETERS OF SOFT SILTY-CLAYEY SOILS FROM PORTUGAL

Matos Fernandes, Manuel; *FEUP, Porto, Portugal, mfern@fe.up.pt*
Esteves, Elisabete; *ISEP, Porto, Portugal, efm@isep.ipp.pt*

RESUMO

As formações silto-argilosas moles ocorrentes nos vales aluvionares do continente Português são extremamente relevantes para a conceção, o projeto e a construção das mais diversas estruturas de engenharia civil. Nas últimas décadas foram construídas nessas formações numerosas obras de grande importância económica e social e considerável complexidade técnica, que implicaram estudos de caracterização geotécnica dos terrenos interessados, que na maioria dos casos incluem as referidas formações argilosas. Apesar do grande acervo de resultados experimentais de caracterização daqueles solos, está por realizar um tratamento do conjunto dos dados mais significativos. Este aspeto é tanto mais importante quanto é escassa a bibliografia técnico-científica existente sobre aqueles solos portugueses. A presente comunicação tem por objetivo ilustrar as principais características físicas e de identificação dos solos argilosos moles, apresentando-se inicialmente a metodologia que levou à criação da base de dados utilizada neste trabalho. Em seguida são apresentadas as características de identificação dos solos abrangidos pelo estudo, nomeadamente a composição granulométrica, a composição mineralógica, a estrutura, o teor em matéria orgânica, os limites de Atterberg e a atividade. São apresentados os índices físicos, designadamente o teor em água, o peso volúmico, a densidade das partículas sólidas, o índice de vazios e o grau de saturação. Para finalizar é apresentada a classificação destes solos baseada em critérios granulométricos, na consistência e na classificação unificada.

ABSTRACT

The study here presented is dedicated to the characterization of soft silty-clayey soils from Portugal, which mechanical and hydraulic behavior is extremely relevant to the design and construction of several civil engineering structures. Over the last decades, a considerable number of important and highly complex structures have been built, which implied numerous geotechnical studies of the surrounding ground, often involving those formations. As a result, a large and valuable volume of geotechnical data was created, which has not, until now, been systematically interpreted and analyzed. This aspect is particularly important since the literature on Portuguese soft silty-clays is scarce. This paper aims to illustrate the main physical characteristics of soft silty-clayey soils, initially presenting the methodology that led to the creation of the database used in this work. The identification characteristics of the soils covered by the study are presented, such as granulometric and mineralogical composition, structure, organic matter, Atterberg limits and activity. The following physical indexes are presented: water content, weight, density, void ratio and saturation. Finally, the classification of these soils based on granulometric criteria is presented.

1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo ilustrar as principais características físicas e de identificação dos solos argilosos moles que se formaram por sedimentação nos vales do litoral do continente português, apresentando-se inicialmente a metodologia que levou à criação da base de dados utilizada. Em seguida são apresentadas as características de identificação dos solos abrangidos pelo estudo, nomeadamente a composição granulométrica, a composição mineralógica, a estrutura, o teor em matéria orgânica, os limites de Atterberg e a atividade. São apresentados os índices físicos, designadamente o teor em água, o peso volúmico, a densidade das partículas sólidas, o índice de vazios e o grau de saturação. Para finalizar é apresentada a classificação destes solos baseada em critérios granulométricos, na consistência e na classificação unificada.

2 - METODOLOGIA ADOTADA PARA ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS

Para alcançar o objetivo proposto foi necessário efetuar uma pesquisa bastante abrangente das obras realizadas nestes solos. Depois de identificadas as obras interessadas no estudo, foram consultadas as empresas responsáveis pela realização dos ensaios geotécnicos no sentido de reunir a correspondente informação, o mais completa possível.

Neste processo foram coletados resultados de ensaios referentes a cerca de 762 amostras provenientes de 139 obras distintas. Depois de compilados os resultados gentilmente cedidos pelas empresas passou-se à organização dos mesmos através da realização de uma base de dados que permite de uma forma concreta a manipulação dos diversos objetos existentes.

Depois de coligidos os dados e organizados segundo os aspetos considerados relevantes foram calculados os parâmetros de identificação, como os índices de plasticidade (I_p), de consistência (I_c) e de liquidez (I_L), e os índices físicos complementares, como o índice de vazios (e) e o grau de saturação (S_r).

Depois de efetuados os cálculos descritos, verificou-se que havia amostras com grau de saturação (S_r) bastante baixo ou muito superior a 100%. O primeiro critério de rejeição consistiu em impor um intervalo de variação para este índice, considerando apenas resultados das amostras em que o grau de saturação estava compreendido entre 87% e 105%. Outro critério de rejeição consistiu em, depois de calcular o índice de consistência (I_c), eliminar as amostras que assumiam valores deste índice superior a 0,5, tendo em conta que se pretendia estudar solos moles.

A aplicação daqueles critérios de seleção originou uma diminuição do número de resultados de ensaios de identificação de 762 referentes a 139 obras distintas para 587 referentes a 120 obras.

3 - PARÂMETROS DE IDENTIFICAÇÃO

3.1 - Composição granulométrica

Os solos recebem designações segundo as dimensões das partículas compreendidas entre determinados limites convencionais. Em Portugal, segundo a especificação E196-1966 do LNEC, que regulamenta a análise granulométrica dos solos e reúne a aplicação dos processos de peneiração e sedimentação, é adotada a classificação dos solos de acordo com sua granulometria.

Na Figura 1 encontra-se representada a variação da composição granulométrica do solo em profundidade. Tendo em conta que das 446 amostras estudadas só 34 tinham sido submetidas ao ensaio de sedimentação, representa-se na Figura 1a a variação da composição granulométrica do solo em profundidade, considerando todas as amostras estudadas e representando em conjunto a fração fina (silte e argila), através da média aritmética dos resultados pontuais para as diversas profundidades. Embora sem carácter representativo para o universo de solos moles portugueses, representa-se na Figura 1.b a variação da composição granulométrica do solo em profundidade, considerando as 34 amostras em que foi efetuada a separação da fração fina do solo.

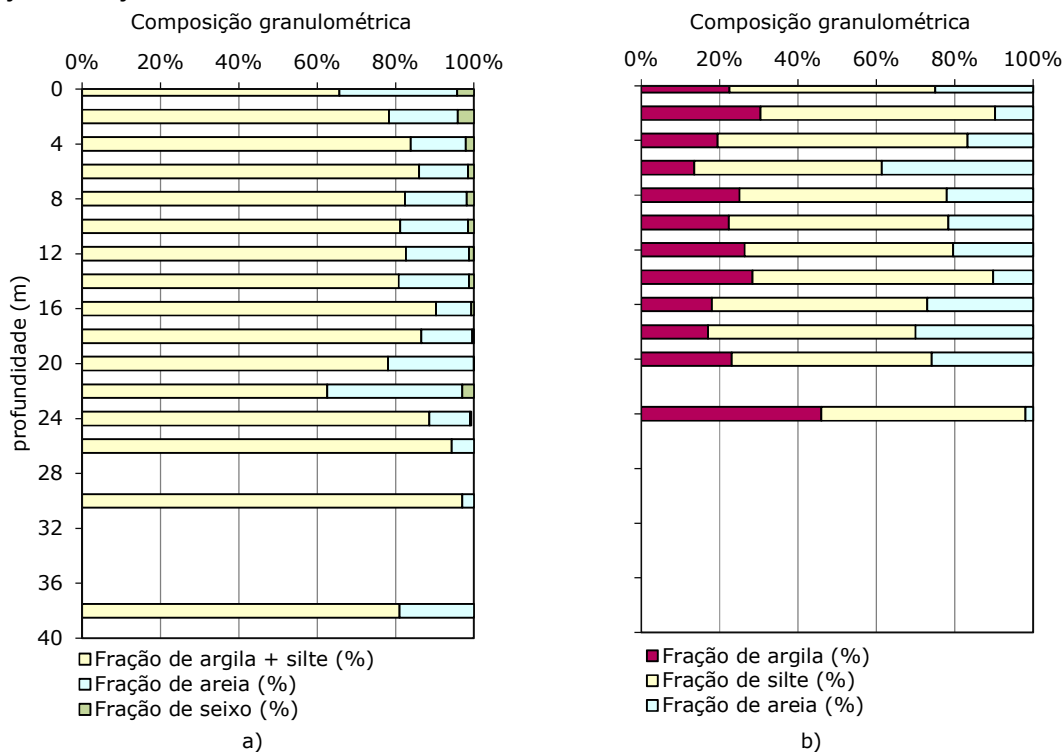


Figura 1 - Variação da composição granulométrica em profundidade: a) fração de argila + silte, areia e cascalho; b) fração de argila, silte, areia e cascalho.

Da análise da Figura 1 verifica-se que a fração fina (argila e silte) é preponderante, podendo mesmo representar 90% do solo. Analisando os resultados das várias amostras estudadas, verifica-se que, com exceção das amostras recolhidas a pequenas profundidades (até 4 m) e para a profundidade de 22 m, todas as restantes possuem uma percentagem igual ou superior a 80% do peso das partículas do solo. Analisando a Figura 1b, conclui-se que a fração de silte é preponderante (oscilando entre 50% e 65%), sendo que a fração de argila varia entre 20% e 45%. Como foi já analisado por Coelho (2000), verifica-se que há uma variação relativa das frações arenosa e argilosa em profundidade, isto é, ao aumento de uma corresponde uma redução sensivelmente igual da outra. Assim, a fração siltosa tende a ter a mesma representatividade às diferentes profundidades.

3.2 - Teor em matéria orgânica

Nos seus estudos, Oades (1996) refere que a presença de matéria orgânica no solo pode ser responsável pela alta plasticidade, alta compressibilidade, baixa condutividade hidráulica e baixa resistência. Também Coelho (2000), concluiu que a matéria orgânica exerce grande influência sobre as características físicas e de plasticidade. Pelo exposto, a quantificação deste parâmetro assume elevada importância na caracterização geotécnica dos solos objeto do presente estudo. Embora se reconheça essa importância, pode dizer-se que em Portugal os estudos sobre o tema são incipientes. Este fator deve-se em grande medida à dificuldade e à complexidade em estudar a matéria orgânica e as suas macromoléculas constituintes, as substâncias húmicas (ácido húmico, ácido fúlvico e humina) e também devido a alguma controvérsia relativamente à determinação experimental do seu valor.

Betelev (1995) classifica os diversos métodos utilizados para a determinação do teor em matéria orgânica em três grupos, que se distinguem pela forma como a matéria orgânica é eliminada do solo, sendo estes: o método de perdas por ignição, o método oxidimétrico e os métodos de oxidação seca. Kédzi (1980) considera ainda um outro grupo de métodos, os de oxidação húmida. Embora não exista um procedimento normalizado que defina as condições de ensaio no método de perdas por ignição, este é o mais utilizado em termos de engenharia. Neste trabalho, os resultados são apresentados em função do método utilizado para a determinação da matéria orgânica, dada a grande influência que essa determinação assume nos valores obtidos.

Analisando os valores obtidos nos resultados pontuais da variação do teor em matéria orgânica em profundidade, representados na Figura 2a, verifica-se que os mesmos assumem uma variação espacial significativa. Tendo em conta a influência deste parâmetro nas propriedades físicas e mecânicas do solo, os resultados observados permitem concluir sobre a responsabilidade desta na variação espacial observada para as restantes propriedades dos solos aluvionares ocorrentes no continente português. Verifica-se que, independentemente do processo utilizado para determinação do teor em matéria orgânica, este não apresenta uma evolução constante em profundidade, exibindo valores mais elevados à superfície (até 2 m de profundidade), o que parece inteiramente razoável. Com o objetivo de obter uma melhor perceção sobre a evolução média do teor em matéria orgânica, representa-se na Figura 2b o valor médio em profundidade para cada um dos diferentes processos de determinação deste parâmetro.

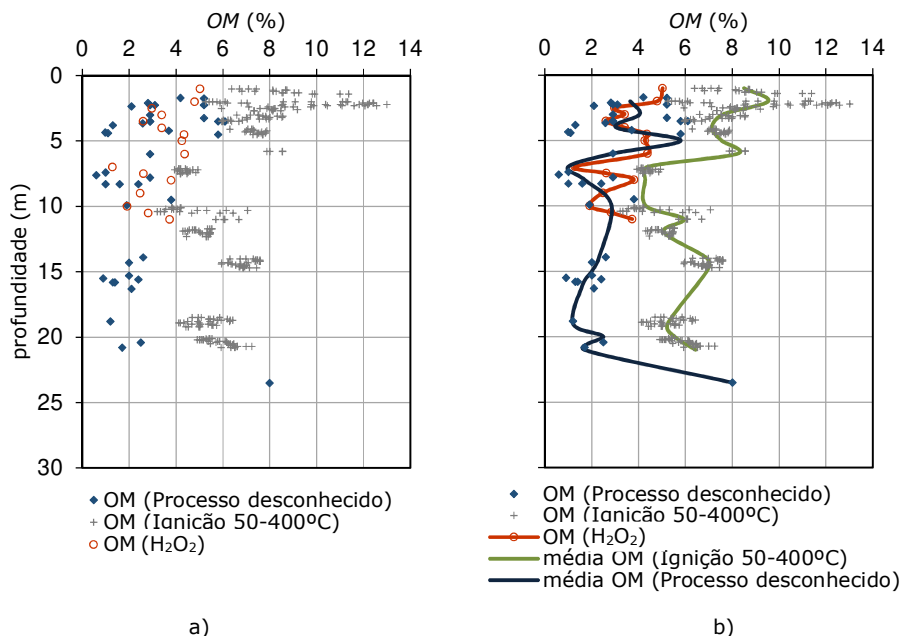


Figura 2 - Variação em profundidade do teor em matéria orgânica (OM): a) resultados pontuais; b) valores médios.

No método da ignição (50-400°C) verifica-se uma enorme dispersão quando se compara os valores pontuais com o valor médio, nomeadamente na zona mais superficial. Verifica-se que essa dispersão diminui em profundidade. Os valores obtidos nos ensaios das amostras por oxidação húmida apresentam sempre valores inferiores aos obtidos no método de ignição (50-400°C), eventualmente devido à limitada ação da água oxigenada na decomposição dos resíduos das plantas e das fibras orgânicas. Estes resultados corroboram os evidenciados por Soares (1995) e Coelho (2000) nos solos do Baixo Mondego.

3.3 - Limites de Atterberg ou de consistência

O modo de preparação **das amostras** é um **fator** que pode assumir bastante importância na determinação dos limites de Atterberg. Se em solos inorgânicos este fator não tem praticamente influência, nos solos orgânicos pode alterar significativamente os resultados, uma vez que a secagem da amostra origina uma diminuição da quantidade de matéria orgânica presente minorando consequentemente a capacidade de absorção de água. Desta forma, a fim de também tentar avaliar o impacto da secagem sobre as características de plasticidade do solo, serão apresentados os valores dos limites de Atterberg em função do modo de preparação da amostra.

3.3.1 - Limite de liquidez

Os resultados do limite de liquidez assumem variação espacial expressiva em profundidade, como ilustra a Figura 3a. Ainda que o número de ensaios disponíveis para profundidades maiores seja inferior, parece existir uma tendência para a banda de variação se estreitar em profundidade. Este facto poderá ser em parte explicado pelo facto de a quantidade de matéria orgânica também diminuir em profundidade como apresentado em 3.2.

Analisando os valores médios do limite de liquidez em profundidade, obtidos através da média aritmética dos resultados pontuais para as diversas profundidades, verifica-se que possuem pouca flutuação, assumindo valores que oscilam entre 40% e 60%, para as amostras secas ao ar, e entre 70% e 100%, para as amostras que se encontram no estado natural. Esses resultados podem ser observados na Figura 3b.

Outro fenómeno que pode ser observado, quer analisando os resultados pontuais quer analisando os valores médios, é a extraordinária redução da plasticidade do solo quando sujeito a secagem, produzindo um efeito notável sobre os valores obtidos na determinação do limite de liquidez.

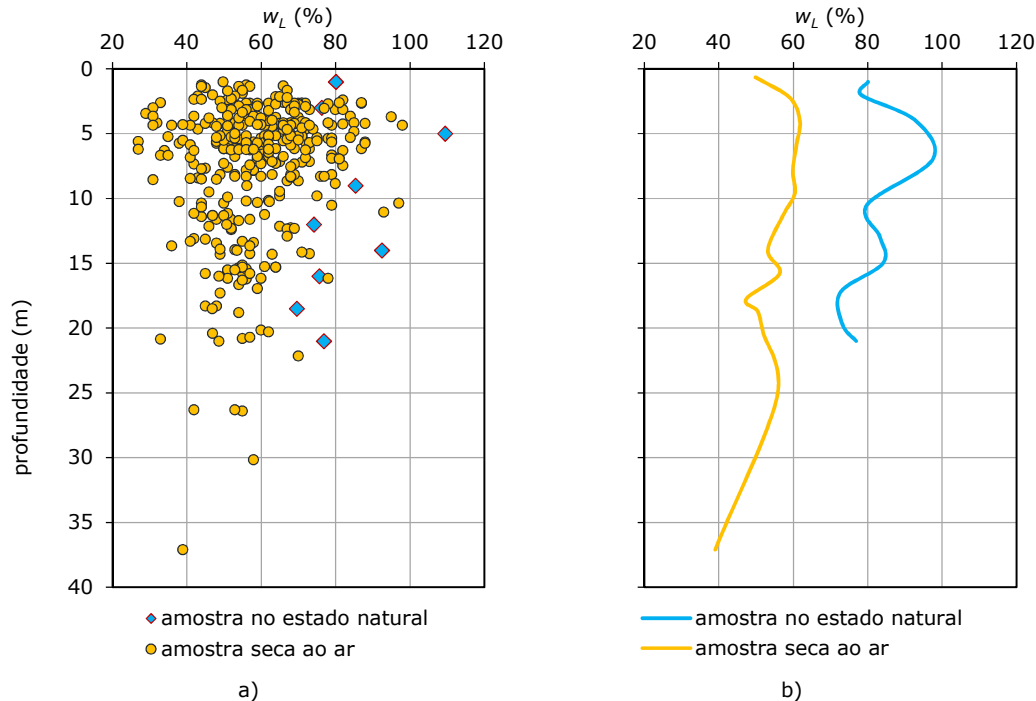


Figura 3 - Variação em profundidade do limite de liquidez (w_L): a) resultados pontuais; b) valores médios.

De acordo com a classificação das argilas quanto à plasticidade apresentada por Head (1980), pode concluir-se que as amostras secas ao ar possuem uma plasticidade média a extremamente alta, enquanto as amostras no estado natural têm plasticidade muito alta a extremamente alta.

3.3.2 - Limite de plasticidade e índice de plasticidade

Analisando a Figura 4a, onde se representa os resultados pontuais da variação do limite de plasticidade em profundidade, verifica-se que são mais constantes para maiores profundidades.

A Figura 4b permite concluir que, tal como constatado aquando da análise do limite de liquidez, os valores médios do limite de plasticidade em profundidade quando as amostras são previamente secas ao ar mostram pouca oscilação, apresentando aos 10 m e aos 23 m alguma variação pontual, normalizando novamente para maiores profundidades.

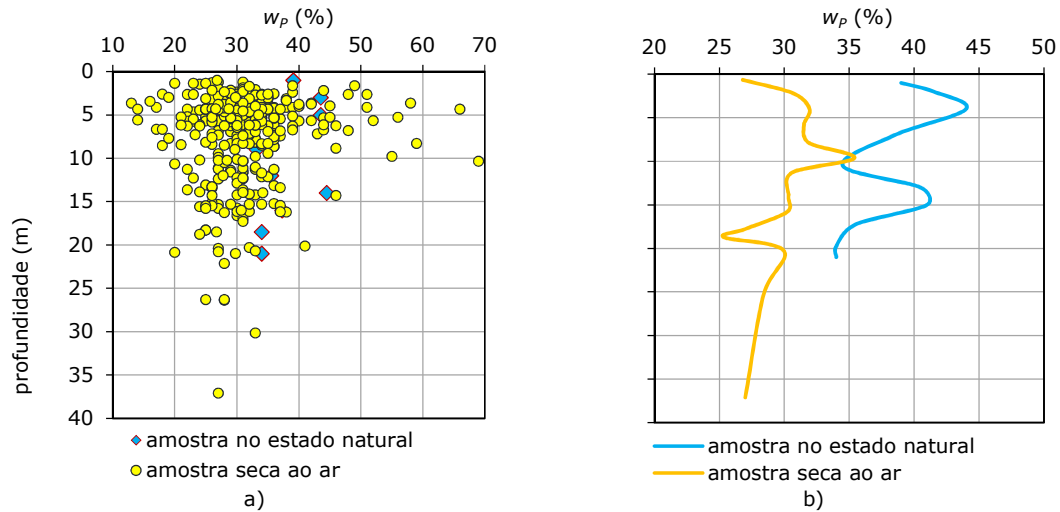


Figura 4 - Variação em profundidade do limite de plasticidade (w_p): a) resultados pontuais; b) valores médios.

Analisando a Figura 5a, onde se representa os resultados pontuais do índice de plasticidade em profundidade, verifica-se que, para a mesma profundidade, a variação é extremamente acentuada. No entanto, analisando a Figura 5b, onde se representa os valores médios para as mesmas profundidades, essa variabilidade não é tão expressiva quando as amostras são previamente secas ao ar.

À semelhança do que tinha sido observado quando se estudou a evolução em profundidade do limite de liquidez, quer analisando os resultados pontuais quer analisando os valores médios, é a extraordinária redução da plasticidade do solo quando sujeito a secagem, produzindo um efeito notável sobre os valores obtidos na determinação do índice de plasticidade. Verifica-se também que a banda de variação deste índice diminui em profundidade.

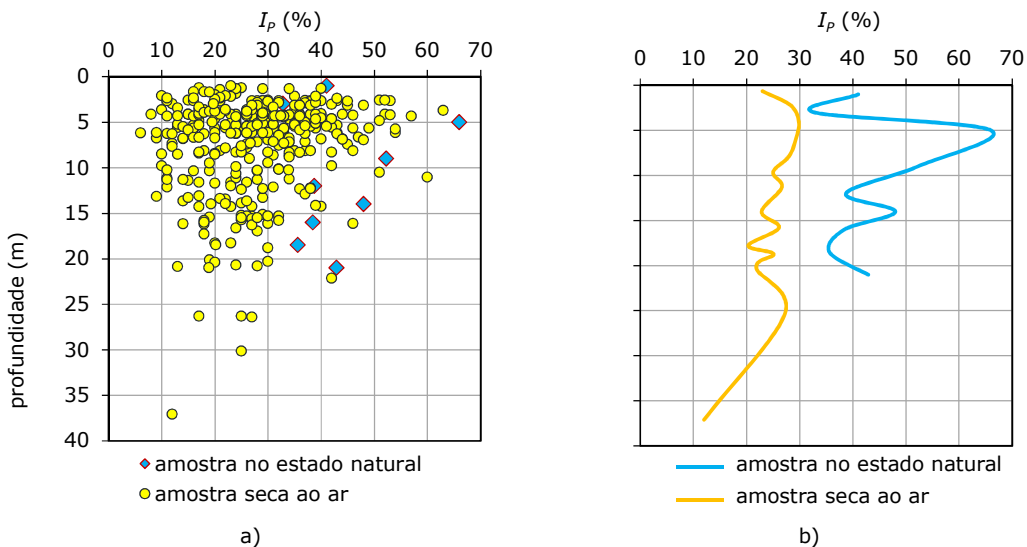


Figura 5 - Variação em profundidade do índice de plasticidade (I_p): a) resultados pontuais; b) valores médios.

4 - PARÂMETROS FÍSICOS

4.1 - Teor em água

Nos solos com matriz argilosa, o teor em água é o parâmetro físico fundamental para, de forma expedita, antecipar certas tendências do comportamento mecânico do solo, sobretudo quando comparado com os limites de Atterberg.

Analisando os valores pontuais do teor em água em profundidade, representados na Figura 6a, verifica-se que assumem uma variabilidade espacial muito significativa, como aliás seria de esperar. Como também seria de esperar, observa-se uma clara tendência para a progressiva redução do teor em água em profundidade, como ilustra a Figura 6b. Ainda que o número de ensaios disponíveis para profundidades maiores seja inferior, parece existir uma tendência para a banda de variação do teor em água se estreitar em profundidade. Este estudo corrobora o observado por Coelho (2000) nos estudos efetuados sobre solos com características semelhantes aos solos objeto do presente estudo.

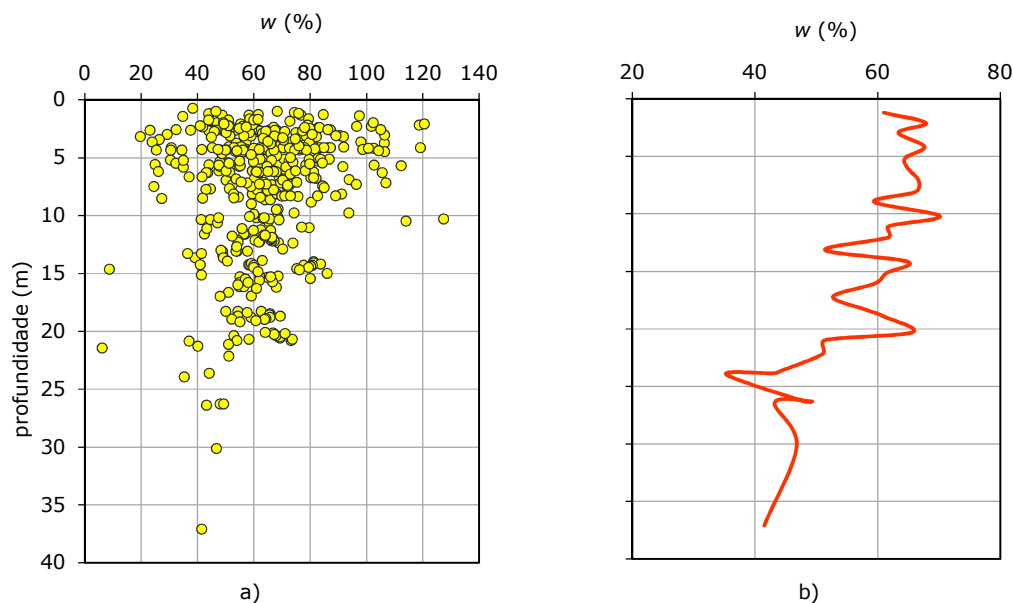


Figura 6 - Variação em profundidade do teor em água (w): a) resultados pontuais; b) valores médios.

4.2 - Índices de consistência e de liquidez

Analisando a Figura 7a, onde se representam os resultados pontuais do índice de consistência em profundidade, verifica-se que a variação do mesmo é significativa. Verifica-se que um grande número de resultados assume valores entre -1,5 e 0,5, significando que nesses casos se está perante solos com consistência muito mole e mole.

Analisando os valores médios representativos do índice de consistência, apresentados na Figura 7b, isto é, caracterizando o seu comportamento pela média aritmética, calculada por metro, dos respetivos valores determinados a cada profundidade, verifica-se que este assume quase sempre valores compreendidos entre 0,5 e -0,5.

A mesma conclusão pode ser retirada da análise da Figura 8a, onde se verifica que a posição relativa do teor em água médio do solo apresenta valores em muitos casos superiores ao limite de liquidez, o que está em coerência com os valores negativos obtidos para o índice de consistência.

Na Figura 8b pode verificar-se que para a grande generalidade dos resultados o valor do teor em água é superior ao limite de liquidez em cerca de 20% a 50%. Estes resultados têm a ver naturalmente com a

subestimação do limite de liquidez associado à secagem prévia das amostras na maior parte dos casos analisados, conforme foi já discutido.

É importante salientar que a observação atenta do conjunto de resultados das Figuras 7 e 8 mostra uma tendência para a redução do teor em água em relação ao limite de liquidez com o aumento da profundidade, o que seria razoável esperar.

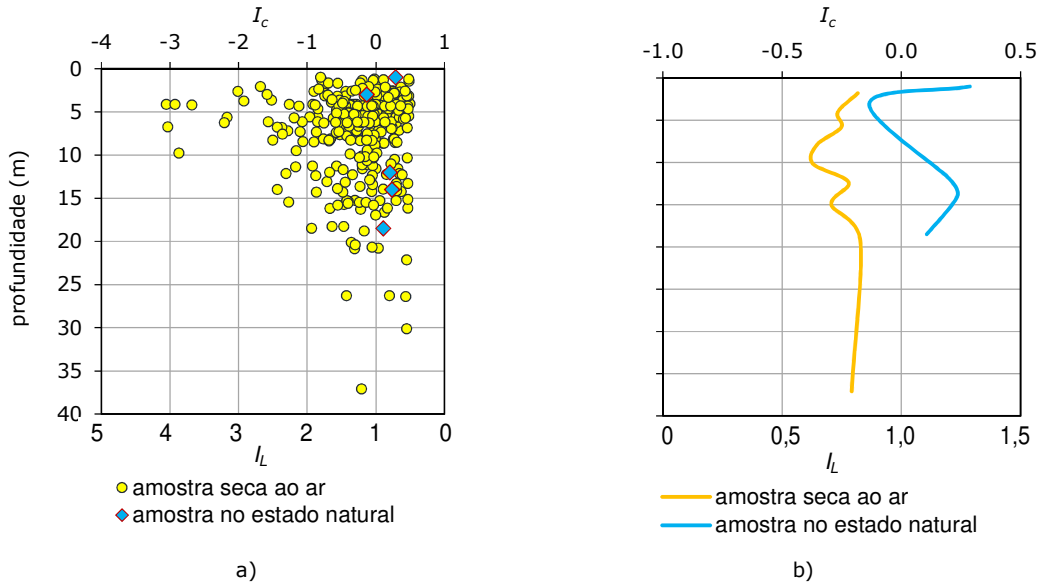


Figura 7 - Variação em profundidade do índice de consistência (I_c) e do índice de liquidez (I_L): a) resultados pontuais; b) valores médios.

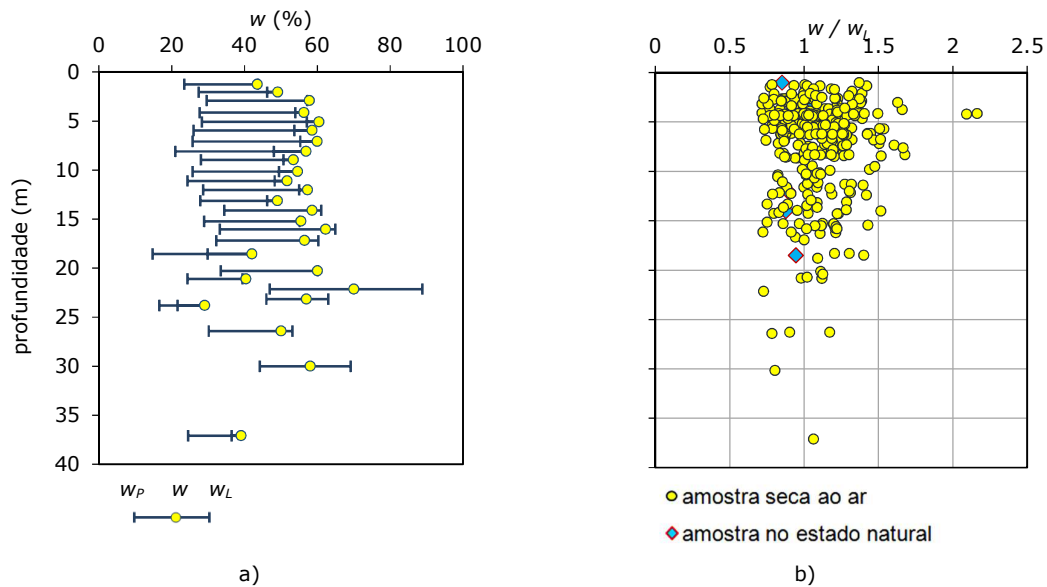


Figura 8 - Teor em água na comparação com os: a) limites de liquidez e de plasticidade (valores médios); b) limites de liquidez (valores pontuais).

4.3 - Peso volúmico

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos em profundidade na determinação do peso volúmico. A distribuição é em tudo semelhante ao já observado aquando do estudo do teor em água, isto é, não se evidencia nenhuma tendência bem definida de variação do peso volúmico em profundidade. Verifica-se que há uma dispersão de resultados maior para pequenas profundidades.

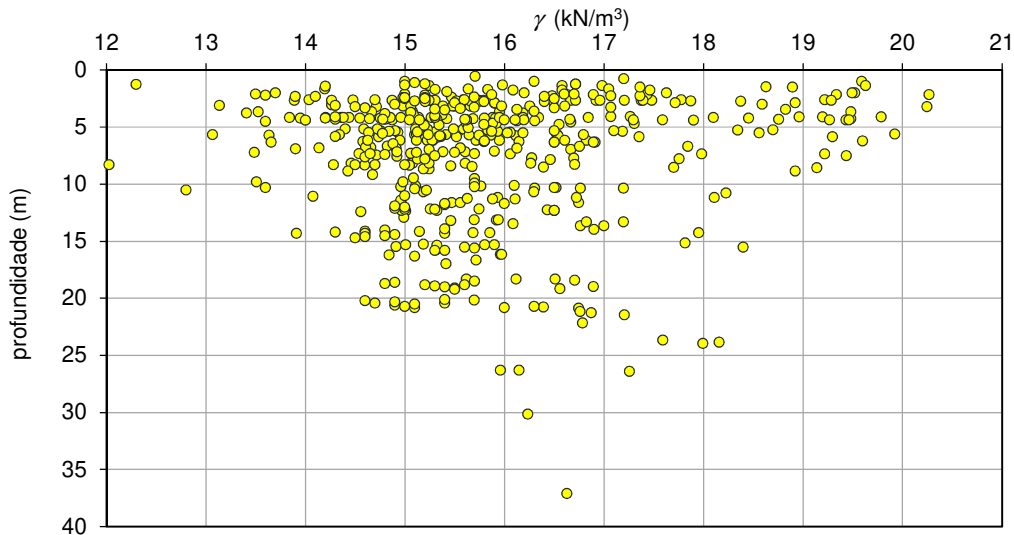


Figura 9 - Variação em profundidade do peso volúmico (γ).

4.4 - Índice de vazios

Apresenta-se na Figura 10 a variação do índice de vazios (e) em profundidade. Da análise da Figura 10a verifica-se que há uma grande dispersão de resultados, sendo mais acentuada na camada superficial. Em profundidade, ainda que o número de resultados seja consideravelmente menor, verifica-se uma tendência global para redução da dispersão e do valor absoluto do índice de vazios, o que seria de esperar. A Figura 10b, onde se representa a evolução do valor médio do índice de vazios em profundidade mostra uma tendência de diminuição em profundidade, como seria de esperar.

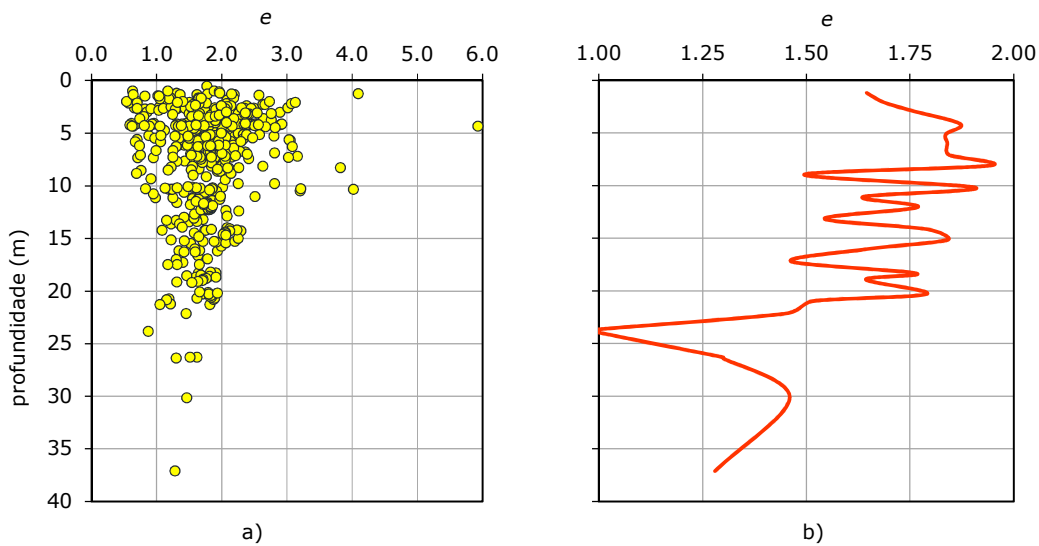


Figura 10 - Variação em profundidade do índice de vazios (e): a) resultados pontuais; b) valores médios.

5 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA

Na Carta de Plasticidade de Casagrande representada na Figura 11, a linha "A" é uma fronteira arbitrária entre argilas orgânicas (CL e CH), que estão acima daquela linha, e os siltes inorgânicos e argilas orgânicas (ML, MH, OL, e OH), que estão abaixo.

A aplicação da Carta de Plasticidade de Casagrande permite concluir que os solos são classificados como argila magra (CL), silte (ML) ou argila gorda (CH), caso sejam inorgânicos, e como argila orgânica (OH ou OL), caso sejam orgânicos. Uma vez mais existe uma grande variabilidade, sendo que a tendência média dos pontos está sempre próxima da linha "A".

Como já foi discutido, a secagem da amostra pode afetar de modo substancial a plasticidade do solo, influenciando pois a respetiva classificação. No presente caso a maioria dos resultados foi obtida após secagem da amostra ao ar.

Neste ponto foram separados os resultados considerando a influência da bacia hidrográfica onde as amostras foram recolhidas. No entanto, esta separação deve ser entendida com algumas reservas, pois não se conhece a constituição mineralógica e a datação exata dos solos para ser possível enquadrá-los na respetiva bacia hidrográfica aquando da sua formação.

Considerando a bacia hidrográfica com a constituição geológica atualmente aflorante e apenas considerando as argilas presentes provenientes dos minerais argilosos contidos nas rochas aflorantes e dos minerais de neoformação, as bacias hidrográficas foram agrupadas em quatro grupos, constituídos pelas bacias hidrográficas dos rios:

- Cávado, Leça, Douro e Guadiana, com uma contribuição predominante do soco ibérico, de granitos, de rochas metassedimentares xistentas e de minerais argilosos precipitados a partir das soluções aquosas veiculadas pelas redes hidrográficas;
- Vouga e Mondego, com contribuição mista de rochas hercínicas do soco ibérico e rochas sedimentares do secundário, de grés, de argilas e de calcários;
- Tejo e Sado, com contribuição, em posição distal, de rochas granitoides e metassedimentos xistentos e, em posição proximal, de sedimentos areno-argilosos do Terciário;
- Lis, Ribeiras do Oeste e Ribeiras do Algarve com predominância de rochas carbonatadas na bacia atual, essencialmente calcários do Jurássico e grés do Cretácico.

Na Figura 10 representa-se a classificação do solo em estudo através da Carta de Plasticidade de Casagrande considerando a bacia hidrográfica de onde provém a amostra.

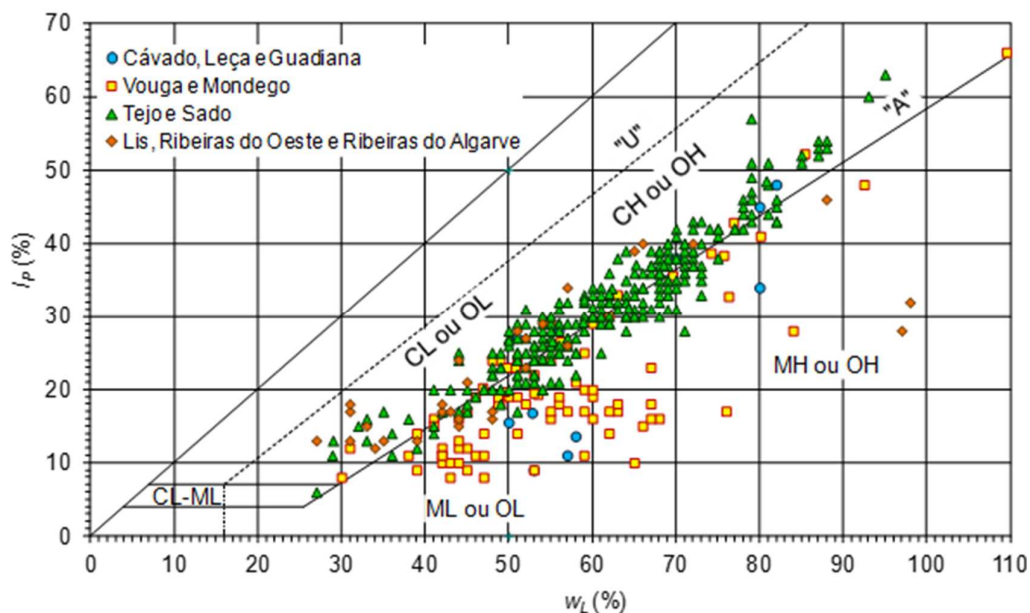


Figura 11 - Classificação do solo através da Carta de Plasticidade de Casagrande.

Embora os resultados continuem a ser bastante dispersos, pode encontrar-se alguns padrões de comportamento. Os solos provenientes das bacias hidrográficas do Cávado, do Leça, do Guadiana, Vouga e Mondego encontram-se localizados na sua maioria abaixo da linha "A" podendo ser classificados como siltes e argilas ML e MH, caso sejam inorgânicos ou OL e OH caso sejam orgânicos. A nuvem de pontos relativa às bacias hidrográficas do Tejo, do Sado, do Lis, das Ribeiras do Oeste e das Ribeiras do Algarve encontram-se concentradas sobre a linha "A".

Verifica-se também que os solos provenientes das bacias hidrográficas do Vouga e Mondego são os menos plásticos.

6 - CONCLUSÕES

A análise dos índices físicos dos solos moles ocorrentes nos vales aluvionares do continente português permitiu verificar que estes exibem uma elevada variabilidade espacial, que pode em parte ser justificada pela presença de quantidades e qualidades variáveis de matéria orgânica ou pela própria localização geográfica separada no presente trabalho pela bacia hidrográfica de onde as amostras são provenientes.

No global, será de referir que os solos em estudo se encontram praticamente saturados, apresentam teores em água elevados, baixos pesos volúmicos e elevados índices de vazios, características já observadas em depósitos aluvionares idênticos, tanto em Portugal como noutros países (Hight et al. 1987; Amaryan, 1993; Coelho, 2000).

As várias classificações propostas para os solos moles ocorrentes nos vales aluvionares portugueses permitem concluir que se trata de solos finos.

No que concerne à classificação granulométrica, as classificações de Feret e Unificada mostram unanimidade no destaque da composição predominante, sendo que o silte assume percentagens sempre superiores a 50%.

No que se refere ao comportamento mecânico pode antever-se que os solos moles em estudo terão comportamento deficiente, uma vez que exibem consistência muito mole a média, com valores do índice de liquidez entre 1,5 e 0,5.

É de salientar que não foi possível classificar o solo no que concerne à presença de matéria orgânica uma vez que só se dispunha de dados de três locais para essa classificação. Reconhece-se, no entanto, que a presença da mesma influencia grandemente a classificação unificada.

REFERÊNCIAS

- Amaryan, L.S. (1993) - Soft soil properties and testing methods. *Geotechnika 7*, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Betelev, N.P. (1995) - Determining of organic matter content in soils and rocks. The Interplay Between Geotechnical Engineering and Engineering Geology, *Proceedings XIth ECSMFE*, Copenhagen, 3: 3.13-3.18.
- Coelho, P. (2000) - Caracterização Geotécnica de Solos Moles. Estudo do local experimental da Quinta do Foja (Baixo Mondego). *Dissertação de Doutoramento*, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- E 196 (1966) - *Especificação do LNEC- Solos*, Análise granulométrica.
- Head, K. H. (1980) - Manual of Soil Laboratory Testing. Pentch, London, vol. 1.
- Hight, D.W., Jardine, R.J. & Gens, A. (1987) - The behaviour of soft clays. Embankments on soft clays. Special Publication, *Bulletin of the Public Works Research Center*, Athens.
- Kédzi, A. (1980) - *Handbook of Soil Mechanics*. Vol. 2, Soil Testing, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York.
- Oades, J. M. (1996) - An Introduction to Organic Matter in mineral Soils. Mineral Environments. 2^a ed. *SSSA Book*. Séries n. 1. Madison: Soil Science Society of America. p. 89-159.
- Soares, F.N.S.C. (1995) - Caracterização geotécnica de solos da baixa aluvionar do rio Mondego. *Dissertação de mestrado*. Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra.