

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE ALUVIÕES LODOSAS DO PORTO DE LEIXÕES E DA RIA DE AVEIRO

Geotechnical Characterization of Soft Soils from Leixões Harbour and Vouga Delta Aluvial Deposits

ALFREDO AGUIAR*

MANUEL DE MATOS FERNANDES**

RESUMO – Faz-se um levantamento da localização dos principais depósitos de solos moles em Portugal e uma recensão das mais importantes obras neles recentemente construídas ou em projecto. Apresentam-se dois casos práticos de caracterização geotécnica de solos moles do estuário do rio Leça (porto de Leixões) e da ria de Aveiro (canal de Esgueira) envolvendo essencialmente ensaios laboratoriais.

SYNOPSIS – A geological survey of the location of soft soils in Portugal is presented, together with a listing of important works on soft soils currently under construction or recently completed. Two practical case studies of geotechnical characterization of soft soils are presented, involving laboratory testing on undisturbed samples of aluvial deposits from the river Leça (Leixões harbour) and the Vouga delta near Aveiro.

1 – INTRODUÇÃO

Os solos moles de Portugal são depósitos aluvionares silto-argilosos, em geral com teor substancial em matéria orgânica, que se encontram à superfície ou a reduzida profundidade nas planícies e vales fluviais do litoral continental. Como todos os solos moles, exibem tipicamente elevada compressibilidade, baixa resistência ao corte e comportamento diferido no tempo.

Os maciços de solos moles em Portugal são terrenos formados nos últimos 10 000 anos (Holocénico), quando a subida regular do nível do mar após a última glaciação ocasionou a redução da velocidade dos cursos de água na região que actualmente constitui o litoral do continente, com o conseqüente preenchimento por aluviões finas dos vales, por vezes muito profundos, que haviam sido escavados nas fases regressivas anteriores.

A Fig. 1 ilustra de forma simplificada as zonas ocupadas por depósitos fluviais recentes, onde se incluem as principais ocorrências de solos moles em Portugal. Embora a área ocupada por estes depósitos seja modesta em relação à área total do país, a importância do conhecimento do seu comportamento mecânico é muito grande, já que eles se concentram nas regiões mais desenvolvidas e de maior densidade populacional, onde se têm vindo a construir obras de grande valor técnico-económico.

* Professor Auxiliar do ISEP.

** Professor Associado da FEUP.

A título de exemplo, o Quadro I inclui uma relação, que não pretende ser exaustiva, de importantes obras de engenharia realizadas no passado recente, em construção ou em projecto, localizadas em zonas de solos moles e nas quais a componente geotécnica é (ou foi) predominante ou, pelo menos, muito significativa.

QUADRO I

N.º*	OBRA Referência e aspectos fundamentais	Observações
1	Acessos à Ponte Internacional de Valença, sobre o rio Minho, com aterros sobre solos lodosos, consolidados com geodrenos.	Recentemente concluída
2	Acessos à nova Ponte de Viana do Castelo, sobre o rio Lima, com aterros sobre solos moles na margem direita consolidados com geodrenos.	Recentemente concluída
3	Porto de mar da Póvoa de Varzim, onde se executaram estacas de brita por vibrossubstituição em solos lodosos.	Executado em 1983
4	Porto de Leixões, na foz do rio Leça, onde ocorrem solos lodosos com espessura considerável. Especial referência para o Terminal de Contentores Sul, com uma área de 12 ha, sobre solos compressíveis com possanças entre 20 e 25 m consolidados com geodrenos e aterros de pré-carga.	Terminal de Contentores Sul recentemente concluído
5	IP5, lanço Aveiro-Albergaria, com 14 km de extensão e parte do traçado sobre aluviões lodosos da ria de Aveiro, consolidadas com estacas de areia e geodrenos.	Recentemente concluído. Em execução o prolongamento deste lanço até ao porto de mar de Aveiro
6	Dique de protecção contra as marés, no baixo Vouga lagunar, cuja construção está prevista numa extensão de 10 km, em aterro sobre solos moles.	Em projecto
7	EN 235-335 entre Aveiro e Mamodeiro, com aterros sobre solos moles consolidados com geodrenos.	Recentemente concluída
8	IC2, lanço Coimbra-Sargento-Mor, com atravessamento de baixas aluvionares lodosas, consolidadas com geodrenos.	Recentemente concluído
9	A1, Auto-Estrada do Norte, lanço Coimbra-Condeixa, com aterros e obras de arte sobre as aluviões do baixo Mondego numa extensão de cerca de 3 km.	Construído em 1980/81
10	IP3, lanço Figueira da Foz-St.ª Eulália, com aterros sobre solos moles numa extensão de 4 km, consolidados com geodrenos.	Em construção
11	Aproveitamento do baixo Mondego, com importantes obras sobre solos lodosos, merecendo especial referência o Açude-Ponte de Coimbra (caixões de paredes moldadas a 35 m), as estações elevatórias do Fojo e do Algueidão (estacas de 30 m), diques no leito central em aterro hidráulico, o canal condutor geral (em aterro após consolidação dos solos de fundação) e sifões (com substituição de solos e aplicação de geotêxtil).	Início da construção em 1973, com várias obras já concluídas
12	Nova travessia rodoviária do rio Tejo, em Santarém, com fundações profundas e acessos em aterro sobre solos moles.	Em projecto

* ver localização no mapa da Figura 1

QUADRO I (cont.)

N.º*	OBRA Referência e aspectos fundamentais	Observações
13	A1, Auto-Estrada do Norte, lanços Vila Franca – Carregado e Carregado – Aveiras de Cima, com aterros e obras de arte sobre lodos aluvionares da bacia do Tejo numa extensão de cerca de 6 km, consolidados por compactação dinâmica, estacas de areia e pré-carga.	Executados entre 1974 e 1978. Actualmente em construção o nó de Vila Franca, com consolidação acelerada com geodrenos
14	Projecto de rega e drenagem da Lezíria Grande de Vila Franca de Xira, que inclui importantes obras sobre solos moles da bacia do Tejo, sendo de destacar as estações elevatórias do Conchoso e do Ruiivo (para caudais de 6 m ³ /s), a tomada de água do Tejo (50 m ³ /s), com fundações por estacas a 40 m, pontões com estacas flutuantes, muros de suporte com estacas de madeira, bem como sifões, canais de rega, valas e drenos, cuja construção implica substituição de solos, aplicação de estacas associadas ou não a geotêxtil (e enrocamentos de protecção).	Em construção (por fases) desde 1985
15	Terminal Ferroviário de Bobadela, Sacavém, um aterro hidráulico de grandes dimensões, cerca de 2 000 000 m ³ numa área de 53 ha, sobre aluviões lodosas da bacia do Tejo consolidadas por compactação dinâmica e pré-carga.	1.ª fase – aterro hidráulico, executada em 1975/76; 2.ª fase – movimentação de 530 000 m ³ de aterros de pré-carga, recentemente concluída
16	Obras previstas para a Expo-98, que implicarão construção de edifícios e vias de comunicação em áreas consideráveis sobre solos compressíveis.	Em projecto e em início de construção
17	Extensão da rede do Metropolitano de Lisboa, do Cais do Sodré ao Terreiro do Paço e Expo-98.	Em construção
18	Nova ponte sobre o rio Tejo, com fundações profundas e acessos (na margem sul) em aterro sobre solos moles.	Em início de construção
19	Ponte sobre a ribeira das Enguias, em Alcochete (EN 118), com fundações profundas e, nos acessos, aterros sobre solos moles consolidados com estacas de areia e geodrenos.	Recentemente concluída
20	Obras para expansão da Fábrica do Seixal, da Siderurgia Nacional, nas margens do rio Coina, com aterros sobre solos compressíveis numa área de 55 ha, com destaque para a zona prevista para o novo parque de matérias-primas, onde se executaram 1 100 000 m de geodrenos associados e pré-carga e um aterro experimental.	Obra interrompida em 1985
21	Nova ponte de Alcácer do Sal, com fundações profundas e parte dos acessos em aterro sobre solos aluvionares da bacia do Sado	Recentemente concluída
22	Terminal da Carvão de Sines, sobre solos moles consolidados por compactação dinâmica.	Obra concluída
23	EN 125 – Variante de Portimão, incluindo as pontes do Boina e do Arade, com fundações profundas e aterros sobre solos moles consolidados com geodrenos.	Recentemente concluída
24	Porto de mar de Olhão, com infraestruturas sobre solos consolidados por compactação dinâmica, e superficialmente, com escoamento embutido.	Executado em 1983/84
25	Ponte do Gilão, em Tavira, com fundações profundas e, nos acessos, aterros sobre solos moles consolidados com geodrenos.	Recentemente concluída
26	Ponte Internacional do Guadiana, em V. R. de St.º António, com fundações profundas e aterros construídos sobre solos compressíveis consolidados com geodrenos.	Recentemente concluída

* ver localização no mapa da Figura 1

Não obstante a importância das obras referidas, logo da caracterização geotécnica dos maciços em que estão implantadas, é extremamente escassa a bibliografia nacional sobre este tema. É elucidativo o facto de, nos 69 números da revista GEOTECNIA publicados até à entrega deste trabalho, apenas um artigo abordar a caracterização de solos moles portugueses (Horta da Silva, 1984).

Com o presente trabalho pretende-se contribuir para um melhor conhecimento dos solos moles de Portugal, apresentando, da forma mais sucinta que se entendeu conveniente, os resultados da caracterização geotécnica em laboratório dos depósitos do estuário do rio Leça e da ria de Aveiro, com base em amostras indeformadas provenientes de trabalhos de prospecção para os projectos, respectivamente, de recuperação de um muro-cais no porto de Leixões e de execução de uma obra de arte no IP5, sobre o canal de Esgueira, junto a Aveiro. Descrição completa dos resultados pode ser encontrada em trabalho do primeiro autor (Aguilar, 1992).

A caracterização dos solos compreendeu a sua identificação, classificação e determinação das características de compressibilidade e de consolidação e das relações tensão-deformação-resistência ao corte, com base nos seguintes ensaios laboratoriais: *i)* análises mineralógicas; *ii)* análises granulométricas; *iii)* determinação dos principais índices físicos; *iv)* determinação dos limites de Atterberg e dos teores em matéria orgânica; *v)* ensaios edométricos; *vi)* ensaios triaxiais de compressão e de extensão. Inclui-se ainda, para o solo da ria de Aveiro, a comparação dos resultados referentes à resistência não drenada, obtidos em laboratório e *in situ*, estes através de ensaios de corte rotativo (*vane-test*).

2 – CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA SUMÁRIA

2.1 – Depósito da foz do rio Leça – amostras de Leixões

Os depósitos sedimentares recentes da foz do rio Leça, que chegam a atingir mais de 25 m de possança, são formados por lodos com lenticulas de areia interestratificada, normalmente recobertos por formações arenosas com conchas e intercalações de leitos de cascalho; o substrato rochoso é constituído pelo “granito do Porto”.

As amostras estudadas foram recolhidas de duas sondagens espaçadas de poucas dezenas de metros e que indicaram a sequência geotécnica esquematizada na Fig. 2.

2.2 – Depósito da ria de Aveiro – amostras de Esgueira

As aluviões formadas nos braços da ria de Aveiro são constituídas por camadas de areias e lodos, por vezes com conchas e restos vegetais fósseis, que chegam a atingir 40 metros de espessura, e assentam em formações cretáceas.

No canal de Esgueira, a amostragem foi realizada no decorrer de uma sondagem localizada num braço da ria de pequeno desenvolvimento, com reduzida expressão superficial de cobertura aluvionar, que no entanto atinge mais de 20 m de profundidade. Na Fig. 3 apresenta-se o perfil geotécnico do local e a localização da amostragem.

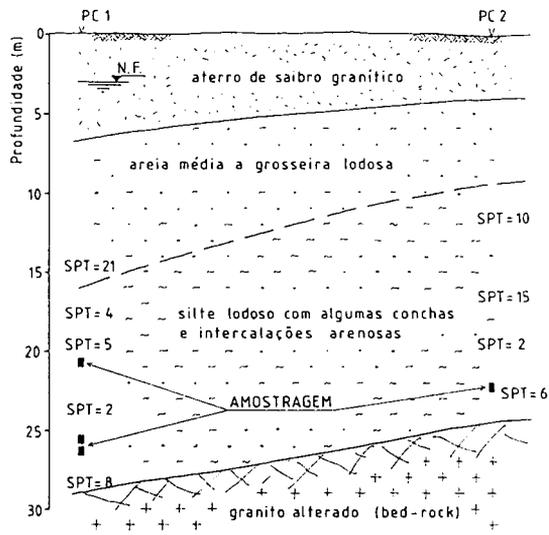


Fig. 2 – Perfil geotécnico e localização da amostragem em Leixões

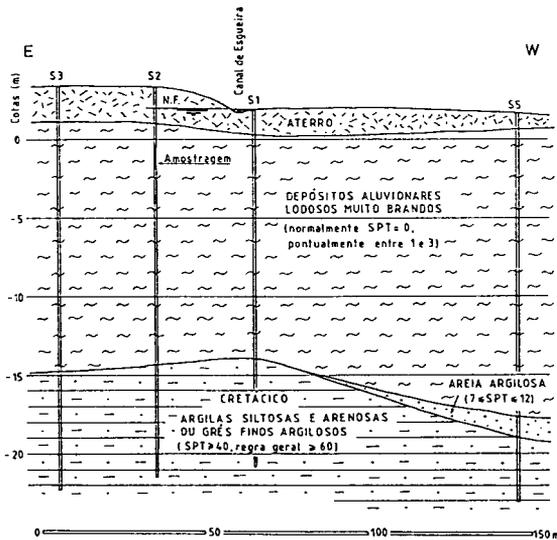


Fig. 3 – Perfil geotécnico e localização da amostragem no canal de Esgueira

3 – ANÁLISE MACROSCÓPICA E COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

A observação macroscópica das amostras revelou solos finos bastante homogêneos, de cor cinzento-escuro. A presença de moscovite em finas palhetas é, em ambos os solos, bem visível a olho nu, mas mais evidente, pelo seu tamanho, nas amostras de Leixões do que nas de Esgueira. Para além deste mineral, só alguns restos vegetais são macroscopicamente identificáveis. O cheiro desagradável, indicador da presença de matéria orgânica, era evidente em todas as amostras.

As análises mineralógicas (por difracção de raios X) revelaram composições muito semelhantes para os dois solos e evidenciaram tratar-se de típicos sedimentos detríticos recentes, praticamente sem sinais de diagénese. A moscovite parece ser, em ambos, o mineral predominante, sendo a restante fracção não argilosa essencialmente constituída por quartzo e feldspato. O solo de Leixões é o mais rico em feldspatos, sendo o potássico predominante em relação às plagioclases, enquanto no de Esgueira se verifica o contrário. Em relação aos minerais de argila, em ambos os solos é a caulinite que ocorre em maior quantidade, embora também se tenham identificado clorite e vermiculite. Os outros componentes menores detectados foram carbonatos (dolomite, calcite) e óxidos (geothite, ilmenite).

4 – IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

4.1 – Granulometria

Efectuaram-se duas análises granulométricas para cada solo, cujos resultados se mostram na Fig. 4, com recurso a um granulómetro laser, sobre amostras previamente tratadas com água oxigenada a 20% para eliminação da matéria orgânica. Para o solo de Esgueira realizaram-se ainda mais dois ensaios sobre amostras “tal qual”, cujos resultados foram idênticos aos das amostras previamente tratadas.

As características granulométricas dos solos amostrados revelam que ambos os depósitos se formaram em ambientes de águas calmas ou com correntes de baixa velocidade (inferior a 0,1 m/s). É no entanto evidente que o solo de Esgueira é mais fino, o que reflecte algumas diferenças nos respectivos ambientes de deposição. Efectivamente, se se projectarem os parâmetros granulométricos $C = d_{99}$ e $M = d_{50}$ no gráfico da Fig. 5 (Laporte, 1979), que permite relacionar a granulometria dos sedimentos com os ambientes típicos de sedimentação, obtém-se a indicação de ambiente fluvial (correntes tractivas) para o depósito da foz do rio Leça e de ambiente de águas calmas para o da ria de Aveiro, o que está em concordância com as condições geológicas e topográficas inerentes à formação dos dois depósitos.

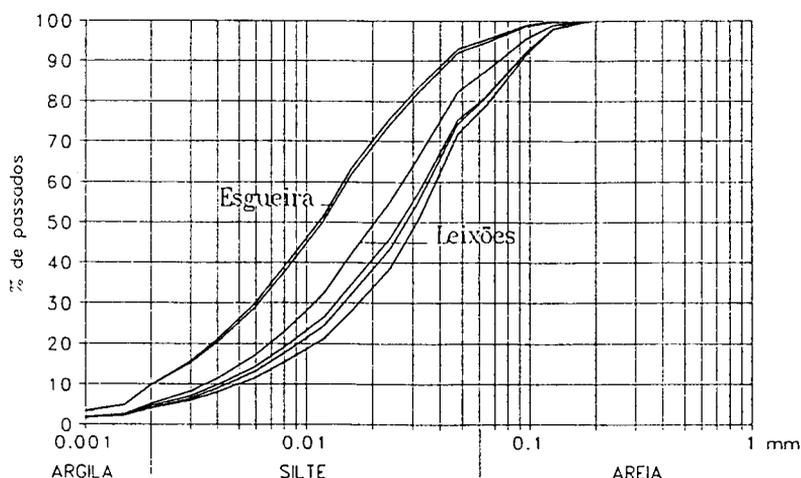


Fig. 4 – Curvas granulométricas dos solos de Leixões e de Esgueira

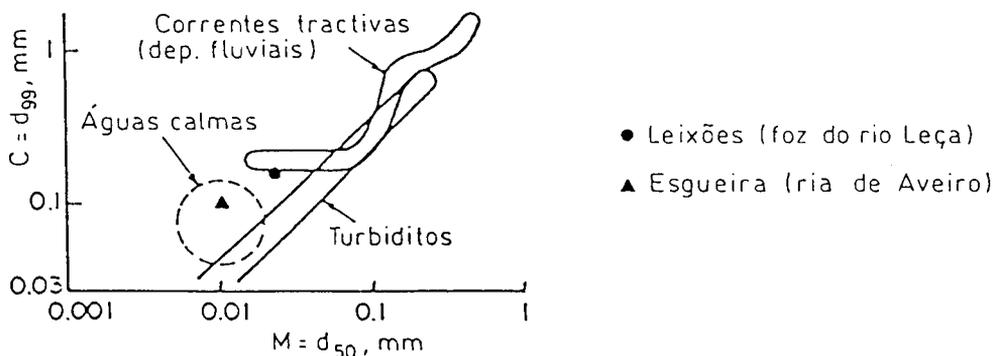


Fig. 5 – Projecção dos solos de Leixões e de Esgueira no diagrama C-M (Laporte, 1979)

4.2 – Limites de Atterberg e teor em matéria orgânica

Aproveitou-se o tratamento dos solos com água oxigenada a 20%, prévio às análises granulométricas, para a determinação dos teores em matéria orgânica. Os elevados teores obtidos para todos os casos são concordantes com os resultados dos limites de consistência, que foram determinados quer a partir de amostras de solo no estado natural, quer com amostras secas ao ar durante vários meses ou secas em estufa a 110°C, quer ainda com amostras tratadas previamente com água oxigenada. O conjunto de resultados é apresentado no Quadro II. As amostras de Leixões revelaram alguma diferença entre os solos das duas sondagens, pelo que doravante se passam a designar por Leixões 1 e Leixões 2.

A razão entre os resultados do limite de liquidez do solo seco em estufa e do solo natural é de 0,75 para amostras de Leixões 2, valor que reflecte um teor mais elevado em matéria orgânica deste último. Note-se ainda que a diferença relativa entre os limites dos solos Leixões 1 e Leixões 2 é reduzida quando os solos são previamente secos em estufa, indício de que as características de maior plasticidade do solo Leixões 2 são provavelmente induzidas pela maior quantidade em matéria orgânica. Esta constatação é apoiada pelos resultados dos limites do

QUADRO II

Amostras	Teor em matéria orgânica (%) [*]	Limites e IP (%)	Estado do solo			
			natural	seco em estufa	seco ao ar	tratado c/ H ₂ O ₂
Leixões 1	8-9	w _L	57	43	não ensaiado	32
		w _p	40	34		26
		IP	17	9		6
Leixões 2	11	w _L	72	49	"	não ensaiado
		w _p	50	35		
		IP	22	14		
Esgueira	9-10	w _L	77	49	49	"
		w _p	42	30	30	
		IP	35	19	19	

* A partir do tratamento do solo com água oxigenada a 20%

solo Leixões 1 quando se elimina completamente a matéria orgânica; nesta situação, os valores reflectem exclusivamente o comportamento da parte mineral, que se revelou quase não plástica.

No que respeita às amostras de Esgueira, é interessante verificar como a secagem do solo ao ar durante um período de tempo prolongado provocou os mesmos efeitos na redução da matéria orgânica que a secagem em estufa. Em relação à diferença entre estes valores e os relativos ao solo natural, como nos solos de Leixões, ela é bem evidente: a razão entre os resultados do limite de liquidez é, neste solo, de 0,64.

4.3 – Classificação

Os limites de consistência foram projectados na Carta de Plasticidade de Casagrande (Fig. 6), onde se pode verificar que não é indiferente considerar os valores relativos aos estados do solo natural ou após secagem em estufa para a sua classificação. Por exemplo, qualquer um dos três solos ensaiados, que (no estado natural) são siltes orgânicos pertencentes à classe OH, poderia ser incorrectamente classificado como ML ou OL se os seus limites de consistência tivessem sido unicamente determinados com base em amostras previamente secas em estufa ou mesmo ao ar.

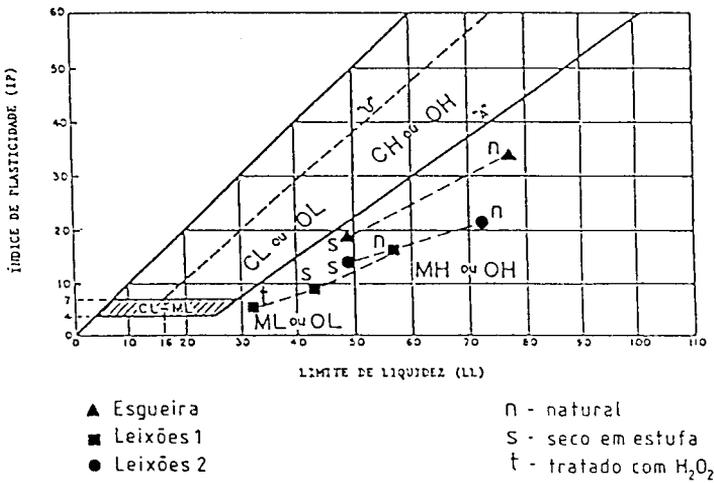


Fig. 6 – Classificação dos solos de Leixões e de Esgueira

5 – CARACTERÍSTICAS DE COMPRESSIBILIDADE E DE CONSOLIDAÇÃO

O estudo da compressibilidade e da consolidação dos solos foi efectuado com base em ensaios edométricos clássicos. O fim da consolidação primária era atingido passados poucos minutos e as deformações por compressão secundária até às 24 horas eram significativas; por isso, como mostra a Fig. 7a), são nítidas as diferenças entre as curvas obtidas a partir dos índices de vazios relativos ao fim da consolidação primária ($t = t_p$) e depois de 24 horas.

Relativamente à evolução dos parâmetros de compressibilidade e de consolidação com as tensões efectivas de consolidação, respectivamente documentados nas Figs. 7b) e c), verifica-

ram-se, para os três solos ensaiados, idênticas situações: um acentuado crescimento da compressibilidade com as tensões de consolidação até atingir um máximo (para tensões duas a três vezes superiores à tensão de pré-consolidação), estabilizando ou diminuindo ligeiramente a partir desse ponto, portanto já bem dentro do ramo virgem, com valores de C_c situados entre 0,5 e 0,6; a variação do coeficiente de consolidação, c_v , com as tensões efectivas faz-se segundo uma curva que apresenta valores mais elevados para tensões inferiores à de pré-consolidação e mais baixos para tensões superiores, tomando no ramo virgem das curvas de compressão valores entre 4×10^{-3} e 7×10^{-3} cm²/s, o que está de acordo com as características granulométricas e mineralógicas dos solos.

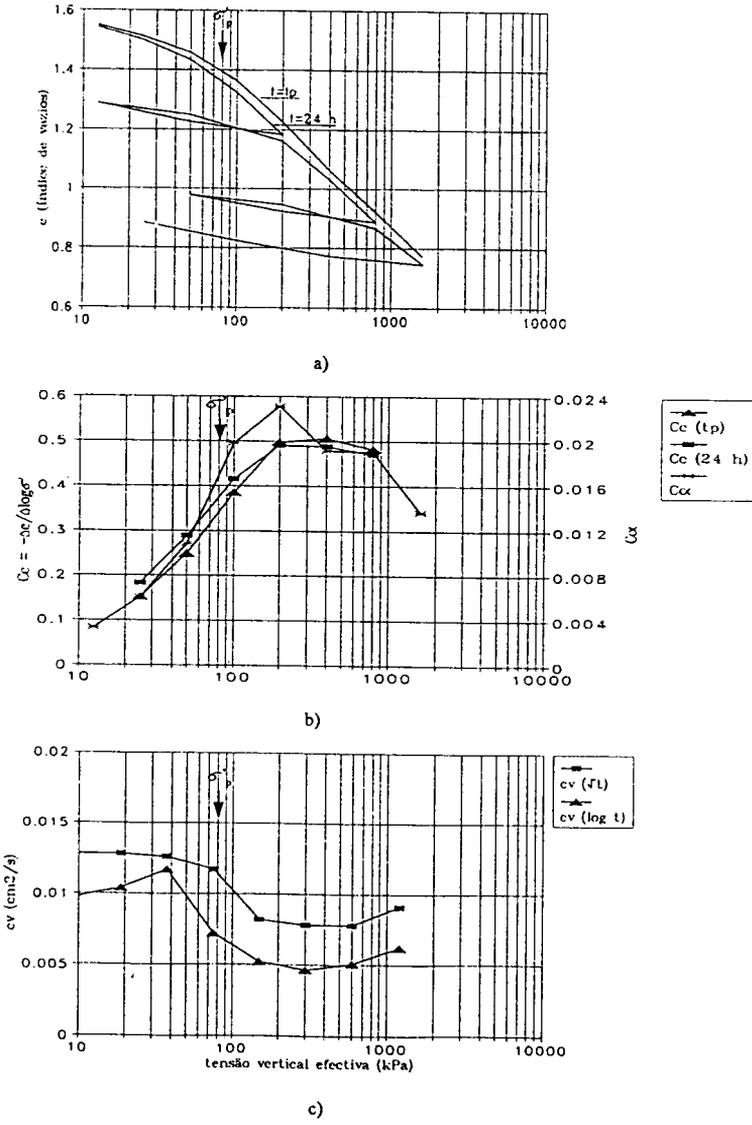


Fig. 7 – Solo de Esgueira: curva de compressão (a) e evolução dos parâmetros de compressibilidade (b) e de consolidação (c) com as tensões de consolidação

A avaliação da tensão de pré-consolidação, σ'_p , foi baseada na análise das curvas de compressão $e - \log \sigma'_v$ e da evolução dos parâmetros de compressibilidade e de consolidação com as tensões efectivas (Lambe e Whitman, 1979; Balasubramaniam e Brenner, 1981). O conjunto destas informações revelou-se relativamente coerente para todos os solos; pôde assim estabelecer-se, como ilustra a Fig. 7 para o caso de Esgueira, um valor da tensão de pré-consolidação simultaneamente correspondente às zonas de maior inclinação das curvas $-\Delta e / \Delta \log \sigma'_v - \log \sigma'_v$, pouco antes do pico destas mesmas curvas, à quebra nas curvas $c_v - \log \sigma'_v$ e, ainda, concordante com as respectivas curvas de compressão e com as histórias de tensões dos depósitos.

Os três solos ensaiados revelaram um ligeiro grau de sobreconsolidação, provavelmente relacionado com variações do nível freático e (ou) com a consolidação secundária.

Como ilustram as Figs. 7b) e 8a), a variação do coeficiente de compressão secundária, $C_{\alpha'}$, é idêntica à variação de C_c , podendo obter-se uma relação aproximadamente linear entre os dois parâmetros, correspondente à razão $C_{\alpha'}/C_c$ da ordem de 0,04 para os três solos, apesar de se tratar de dois depósitos diferentes.

Ainda no que respeita à compressibilidade secundária, com o objectivo de detectar uma possível variação de $C_{\alpha'}$ com o tempo, a amostra do solo Leixões 1 foi submetida a carga constante durante 2 meses, num dos escalões de carga – 1600 kPa – utilizados no ensaio edométrico; a Fig. 8b) representa parte do gráfico deformação *versus* logaritmo do tempo correspondente, podendo verificar-se que decorridos alguns dias parece haver tendência para a diminuição de taxa de deformação com o tempo.

No Quadro III apresentam-se os valores dos parâmetros relacionados com a compressibilidade e a consolidação para os três solos ensaiados; a título comparativo indicam-se os valores de C_c calculados a partir da expressão empírica proposta por Terzaghi e Peck, podendo verificar-se uma concordância satisfatória entre estes e os índices obtidos nos ensaios edométricos; a ordem de grandeza do parâmetro $C_{\alpha'}/(1 + e)$ – aproximadamente 1% no ramo virgem da curva de compressão – permite atribuir aos solos média a elevada compressibilidade secundária, de acordo com a classificação proposta por Mesri (1973).

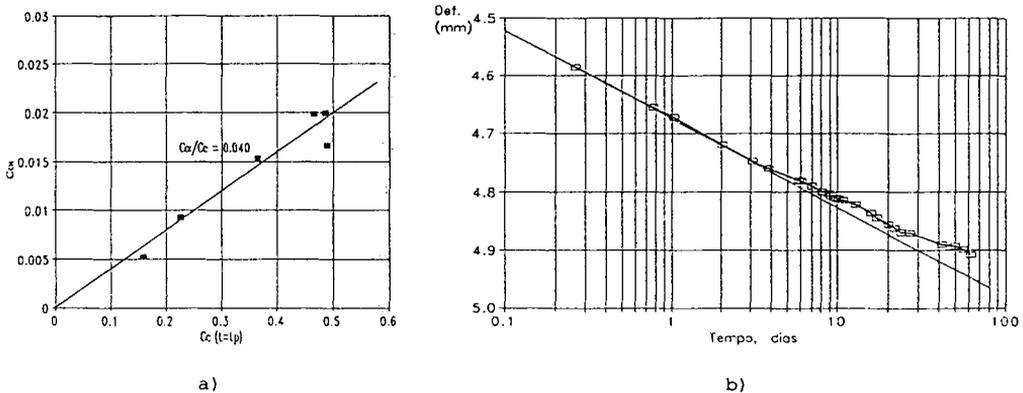


Fig. 8 – Solo de Leixões 1: a) relação $C_{\alpha'}/C_c$; b) pormenor de fase adiantada de consolidação secundária, com tendência para diminuição da inclinação da recta $\Delta e / \Delta \log t$

QUADRO III

Parâmetro	Leixões 1	Leixões 2	Esgueira
e_0	1,51	1,56	1,59
σ'_{v0} (kPa)	210	190	55
σ'_p (kPa)	300	300	80
OCR	1,4	1,6	1,5
C_c	0,48	0,55	0,50
$C_c = 0,009 (w_L - 10)$	0,42	0,60	0,60
C_α / C_c	0,040	0,038	0,044
$C_\alpha / (1 + e)$ (%)	0,7 a 1,0	0,8 a 1,1	0,8 a 1,0

6 – ENSAIOS TRIAXIAIS

6.1 – Solo de Esgueira

6.1.1 – Ensaios de compressão triaxial

O Quadro IV resume os resultados dos ensaios de compressão triaxial efectuados sobre as amostras de Esgueira, com consolidação anisotrópica ($\sigma'_{hc} / \sigma'_{vc} = 0,55$), correspondendo a tensão de consolidação mais baixa, 60 kPa, à tensão vertical efectiva de repouso.

A diminuição das relações c_u / σ'_{vc} e E_u / c_u , bem como o crescimento do parâmetro A_f com o aumento das tensões de consolidação, reflecte a passagem do solo de um estado de sobreconsolidação para um estado normalmente consolidado; nesta situação, podem indicar-se os seguintes valores normalizados dos parâmetros de resistência e de deformabilidade não drenados: $c_u / \sigma'_{vc} = 0,38$ e $E_u / c_u = 300$ (sendo E_u o módulo de deformabilidade secante para a deformação axial de 0,1%).

QUADRO IV

σ'_{vc} (kPa)	Traj. de tensões / taxa de def. (%/min)	c_u (kPa)	c_u / σ'_{vc}	E_u (MPa)	E_u / c_u	A_f	ϵ_{af} (%)
60	σ_r const. /0,4	33	0,55	22	670	0,26	0,8
120	σ_r const. /0,4	60	0,50	40	670	0,36	2,5
240	σ_r const. /0,4	104	0,43	55	530	0,50	3,0
	σ_r const. /0,04	96	0,40	32	330	0,74	3,0
	σ_r const. /0,01	90	0,38	30	330	0,91	3,0
	σ_a const. /0,4	91	0,38	27	300	0,67	3,5
	σ_a const. /0,04	92	0,38	30	330	0,80	3,5
400	σ_r const. /0,04	153	0,38	41	270	0,74	3,0

Na Fig. 9 representam-se, num diagrama $s'-t$, as trajectórias de tensões efectivas de todos os ensaios de compressão e a respectiva envolvente de rotura, a que correspondem os seguintes parâmetros de resistência em termos de tensões efectivas: $c' = 20$ kPa e $\phi' = 31^\circ$.

Os resultados dos três ensaios de compressão, realizados com tensão radial constante e tensão vertical efectiva de consolidação de 240 kPa com diferentes velocidades de corte, permitem uma boa avaliação da influência do tempo na resistência e na deformabilidade do solo. Como se pode verificar nos diagramas t, u versus deformação axial, apresentados em conjunto na Fig. 10a), com a diminuição da taxa de deformação diminui a resistência ao corte e aumentam o excesso de tensão neutra e a deformabilidade. Estes fenómenos devem estar essencialmente relacionados com a compressão secundária, ou seja, com a tendência para a diminuição de volume a tensão efectiva constante, que se reflecte no aumento da deformabilidade e, como os ensaios são não drenados, no aumento da tensão neutra e conseqüente diminuição da resistência. Por cada redução de 10 vezes na velocidade de corte, a diminuição observada na resistência ao corte é da ordem dos 10% e os valores do parâmetro A_f aumentam entre 40 e 50%.

Estes efeitos são também visíveis nas trajectórias de tensões efectivas, a que se refere a Fig. 10b). Como se pode observar, o aumento da tensão neutra associado à diminuição da taxa de deformação faz aumentar o afastamento das trajectórias de tensões efectivas em relação às trajectórias de tensões totais, atingindo-se a envolvente de rotura tanto mais à esquerda, logo para valores tanto mais baixos da resistência ao corte, quanto menor é a taxa de deformação.

Em relação aos dois ensaios de compressão com tensão axial constante, realizados com diferentes taxas de deformação, o efeito do tempo revelou-se bastante menos marcado, provavelmente porque, sendo o solo solicitado segundo uma trajectória de tensões em que a tensão média diminui, a tendência para a diminuição do volume devida à compressão secundária é menor. Como documenta a Fig. 11, os diagramas tensão de desvio-deformação axial destes ensaios são praticamente coincidentes, o que já não se verifica em relação à evolução do excesso de tensão neutra, a que corresponde um acréscimo de 20% para uma redução de 10 vezes da velocidade de corte.

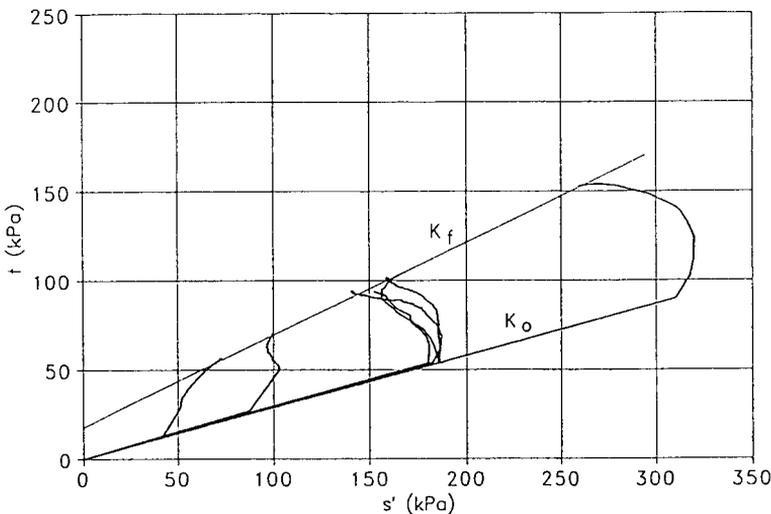


Fig. 9 – Trajectórias de tensões efectivas e envolvente de rotura dos ensaios de compressão triaxial do solo de Esgueira

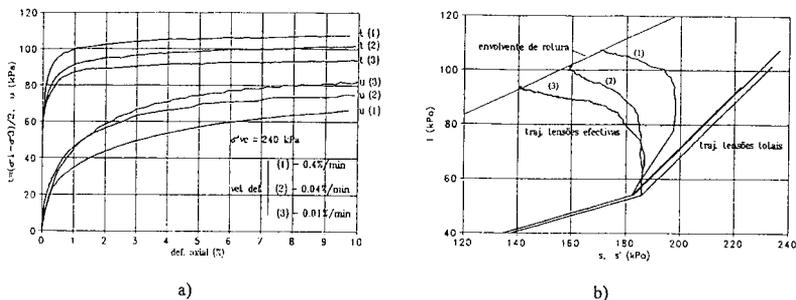


Fig. 10 – Efeito da velocidade de corte em ensaios de compressão triaxial sobre amostras de Esgueira:
 a) diagramas t, u versus deformação axial; b) trajectórias de tensões totais e efectivas

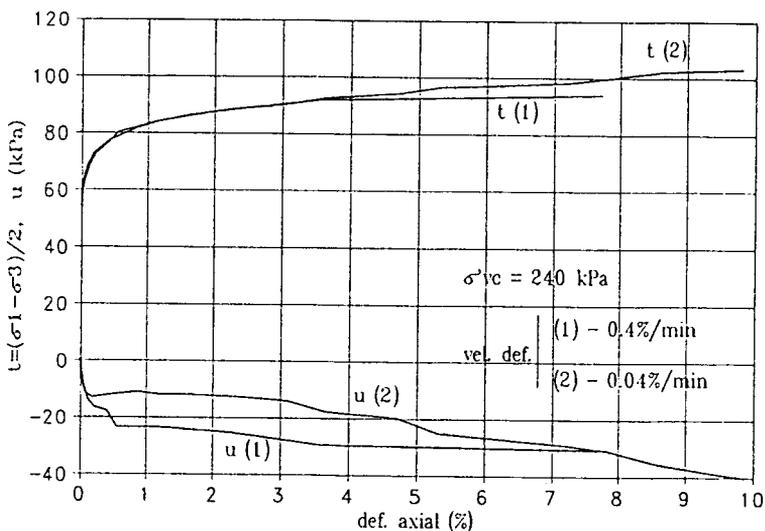


Fig.11 - Diagramas t, u versus deformação axial em ensaios de compressão triaxial com tensão axial constante sobre amostras de Esgueira

6.1.2 – Ensaios de extensão triaxial – comportamento anisotrópico

Foram realizados três ensaios de extensão triaxial com as tensões verticais efectivas de consolidação de 120 e 240 kPa, segundo uma trajectória de tensões com tensão radial constante e, para a mesma tensão vertical efectiva de consolidação de 240 kPa, segundo uma trajectória de tensões com tensão axial constante.

Nos diagramas t, u versus deformação axial, a que se refere a Fig. 12, pode observar-se que nos dois ensaios de extensão realizados a partir da tensão vertical efectiva de consolidação de 240 kPa, com diferentes trajectórias de tensões totais, as curvas tensão-deformação são praticamente coincidentes.

A anisotropia do comportamento mecânico do solo de Esgueira é bem evidenciada pelo conjunto dos resultados dos ensaios de compressão e de extensão triaxial, realizados a partir das mesmas tensões efectivas de consolidação, representado no Quadro V.

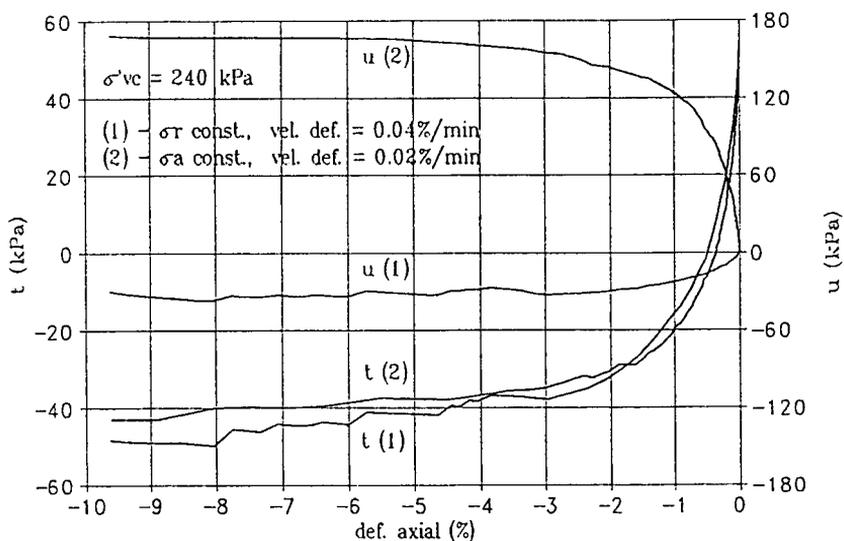


Fig. 12 – Diagramas t, u versus deformação axial em ensaios de extensão triaxial sobre amostras de Esgueira

QUADRO V

σ'_{vc} (kPa)	Tipo de ensaio	c_u (kPa)	c_u / σ'_{vc}	E_u (MPa)	E_u / c_u	A_f	ϵ_{af} (%)	$K_s = \frac{C_u(h)}{C_u(v)}$
120	Comp.	60	0,50	40	670	0,36	2,5	0,5
	Extens.	30	0,25	35	1170	0,93	- 3,0	
240	Comp.	90 a 104 (*)	0,38 a 0,43 (*)	27 a 55 (*)	280 a 530 (*)	0,50 a 0,91 (*)	3,0 a 3,5 (*)	0,4
	Extens.	37 a 38	0,15 a 0,16	42 a 60	1110 a 1620	0,85 a 0,90	- 4,0	

(*) Valores dependentes da trajectória de tensões e da velocidade de corte

Os valores obtidos para a relação c_u / σ'_{vc} , entre 0,38 e 0,50 em compressão e entre 0,15 e 0,25 em extensão, e para o parâmetro K_s , com valores de 0,4 e 0,5, revelam-se coerentes e concordantes com os habitualmente referidos para este tipo de solos (Ladd *et al.*, 1977). Em relação aos módulos de deformabilidade para deformações de $\pm 0,1\%$, verifica-se que não diferem substancialmente nos dois tipos de ensaio, mas, como as resistências são diferentes, resultam razões E_u / c_u de valores muito superiores (duas vezes mais, em média) em extensão do que em compressão. As deformações na rotura são, como seria de esperar, superiores nos ensaios de extensão, o mesmo acontecendo em relação a A_f .

6.1.3 – Comparação de c_u obtida em ensaios triaxiais e por meio do *vane-test*

A comparação da resistência não drenada obtida em ensaios triaxiais e em ensaios *in situ* pôde fazer-se para o caso presente, já que se dispõe dos resultados de 25 ensaios *vane* executados no mesmo depósito, 5 dos quais no local da amostragem (Teixeira Duarte, 1990) e os restantes a cerca de 3 km, em Aveiro (J. L. Cândia Martins / Proplano, 1983). Estes resultados ilustram-se na Fig. 13, em conjunto com três dos valores obtidos em laboratório. Como se pode verificar, a concordância entre ambos é satisfatória; o efeito de um ligeiro grau de sobreconsolidação, pelo menos nas camadas mais superficiais, é evidenciado pela relação $c_u = 12,7 + 0,27 \sigma'_{vo}$ (kPa), obtida por regressão linear com base em 23 dos 25 ensaios *in situ*.

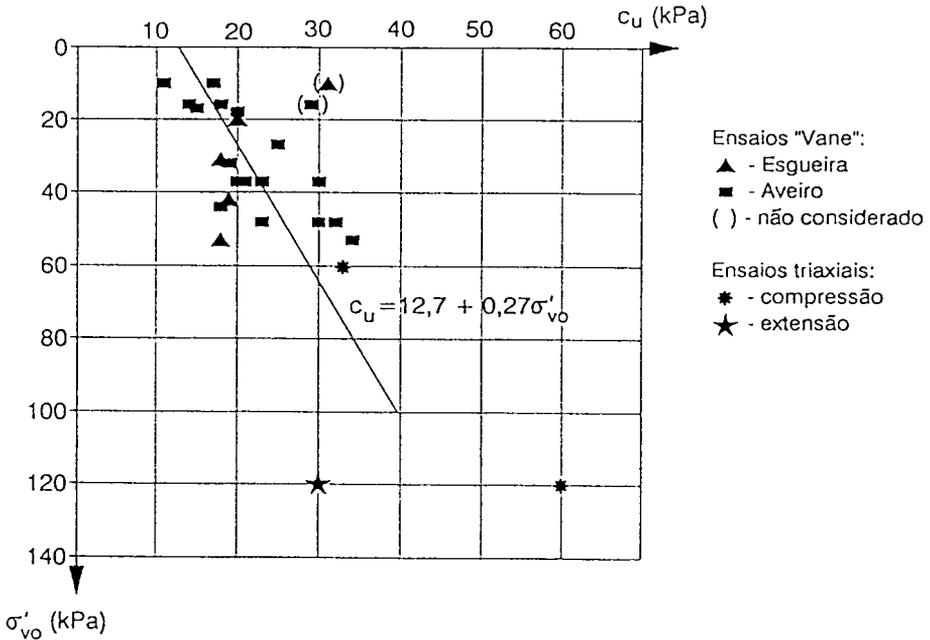


Fig. 13 – Solo de Esgueira: resistência não drenada obtida em ensaios *vane-test* e triaxiais

6.2 – Solos de Leixões

Sobre amostras de cada um dos solos de Leixões executaram-se três ensaios de compressão triaxial com consolidação anisotrópica ($\sigma'_{hc} / \sigma'_{vc} = 0,50$) e tensões verticais efectivas de consolidação correspondentes a níveis de tensão idênticos aos de repouso (200 kPa), mais baixos e mais elevados. Nos três ensaios sobre amostras do solo Leixões 1 impôs-se uma taxa de deformação constante, da ordem de 0,1%/min., enquanto no caso do solo Leixões 2 as taxas de deformação foram de 0,02%/min. para dois dos ensaios e de 0,004%/min. para o restante. O Quadro VI resume os resultados obtidos, que reflectem um comportamento mecânico globalmente idêntico para os dois solos.

As diferenças observadas em alguns parâmetros de resistência e de deformabilidade estão principalmente relacionadas com as diferentes velocidades de corte utilizadas. Por exemplo, os valores do parâmetro A_f , sempre superiores (13 a 32%) nos ensaios sobre amostras de Leixões 2, são indicadores do maior excesso de tensão neutra, associado à menor taxa de deformação

QUADRO VI

	σ'_{vc} (kPa)	taxa def. (%/min)	c_u (kPa)	c_u / σ'_{vc}	E_u (*) (MPa)	E_u / c_u	A_f	ϵ_{af} (%)
Leixões 1	100	0,1	50	0,50	25	500	0,24	0,5
	200	0,1	83	0,42	30	360	0,47	1,5
	400	0,1	165	0,41	42	260	0,68	2,0
Leixões 2	100	0,02	72	0,72	25	350	0,27	2,0
	200	0,004	98	0,49	27	280	0,53	2,0
	400	0,02	157	0,39	30	190	0,90	2,0

(*) para $\epsilon_u = 0,1\%$

adoptada nestes ensaios. Pela mesma razão, este solo apresenta maiores deformações na rotura, principalmente para as tensões de consolidação mais baixas, embora, curiosamente, os valores da resistência não drenada sejam, para essas tensões, mais altos, enquanto os módulos de deformabilidade para 0,1% de deformação axial são praticamente idênticos.

A diminuição da razão c_u / σ'_{vc} com o aumento das tensões de consolidação reflecte a passagem do estado sobreconsolidado para o de normalmente consolidado, podendo observar-se boa concordância com os resultados dos ensaios edométricos, que para ambos os solos indicaram tensões de pré-consolidação da ordem de 300 kPa. Na situação de normalmente consolidados, parece ser consistente o valor $c_u / \sigma'_{vc} = 0,4$, enquanto a razão E_u / c_u varia entre 200 e 300. Não diferindo muito entre si, podem indicar-se para os parâmetros de resistência em termos de tensões efectivas de ambos os solos os valores $c' = 0$ e $\phi' = 41^\circ$.

7 – CONCLUSÕES

Analisando globalmente os resultados dos ensaios sobre os solos de Leixões e de Esgueira pode concluir-se que eles apresentam características de comportamento mecânico bastante semelhantes, o que é consistente com as notórias semelhanças observadas nas suas características físicas e químicas e com a história de tensões dos depósitos. Como se viu, ambos são classificados como OH – siltes orgânicos.

Os resultados dos ensaios edométricos revelaram graus de sobreconsolidação da ordem de 1,5, tratando-se certamente de uma sobreconsolidação "aparente", isto é, essencialmente relacionada com compressão secundária.

Os parâmetros de compressibilidade e de consolidação reflectem um comportamento caracterizado por uma consolidação primária relativamente rápida, mas com significativa compressibilidade. A importância da deformabilidade por compressão secundária foi bem evidenciada no decurso da realização dos ensaios edométricos, tendo-se normalmente observado que ao fim de 24 horas (sob tensão constante) as deformações por compressão secundária eram já da ordem de grandeza ou mesmo superiores às resultantes da consolidação primária. Este tipo de comportamento está provavelmente relacionado com a elevada percentagem de matéria orgânica e com a predominância de moscovite na composição mineralógica de ambos os solos.

Em relação à resistência ao corte não drenada normalizada obtiveram-se, para amostras normalmente consolidadas e com corte por compressão, valores de c_u/σ'_{vc} respectivamente iguais a 0,40 e 0,38 para os solos de Leixões e de Esgueira. Por sua vez, os ensaios de extensão triaxial realizados sobre amostras de Esgueira normalmente consolidadas conduziram a relações c_u/σ'_{vc} de 0,15 a 0,25 e a valores de $K_s(c_u(h)/c_u(v))$ entre 0,4 e 0,5, o que permite avaliar a importância da anisotropia neste solo.

O parâmetro de tensões neutras A_f mostrou ser sensível à velocidade de corte e à trajetória de tensões, observando-se valores mais elevados em ensaios de extensão do que em compressão triaxial. Quanto ao efeito da velocidade de corte, a sua redução acarreta um aumento do excesso de tensão neutra, com conseqüente diminuição da resistência e aumento da deformabilidade, o que está provavelmente relacionado com a tendência para a diminuição de volume por compressão secundária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. – *Caracterização geotécnica de solos moles de Portugal – uma contribuição*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa. 1992.
- BALASUBRAMANIAM, A. S. e BRENNER, R. P. – *Consolidation and settlement of soft clay*. Soft Clay Engineering, ed. E. W. Brand & R. P. Brenner, Cap. 7, Elsevier, Amsterdam. 1981.
- HORTA DA SILVA, J. A. – *Solos compressivos da bacia de S.to André (Área de Sines) – geologia e caracterização geomecânica*. Geotecnia nº 42. 1984.
- J. L. CÂNCIO MARTINS / PROPLANO – *E.N. 16 / IP 5 - Lanço variante entre Aveiro e Albergaria - Projecto de execução*. J. A. E.. 1983.
- LADD, C. C., FOOTT, R., ISHIHARA, K., SCHLOSSER, F. e POULOS, H. G. – *Stress deformation and strength characteristics*. Proc. of the 9th Int. Conf. on Soil Mec. and Found. Eng., Tokyo, Vol. 2, p. 421-494. 1977.
- LAMBE, T. W. e WHITMAN, R. V. – *Soil Mechanics, SI Version*. John Wiley & Sons, New York. 1979.
- LAPORTE, L. F. – *Ancient Environments, 2nd ed*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1979.
- MESRI, G. – *Coefficient of secondary compression*. Journal of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol. 99, SM1, p. 123-137. 1973.
- TEIXEIRA DUARTE, S. A. – *IP 5 - Nó de Esgueira - Reconhecimento geotécnico*. J. A. E. 1990.