

ARGILAS MIOCÉNICAS DE LISBOA: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE

Lisbon Miocene formation: physical properties and compressibility

Mafalda Lopes Laranjo^a, Manuel Matos Fernandes^b

^a PROMETHEUS, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo.

^b Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

RESUMO – As formações argilosas do Miocénico de Lisboa foram alvo de um estudo extensivo de caracterização, com vista a estabelecer um conjunto de intervalos de valores para os principais índices físicos, parâmetros de compressibilidade e de resistência, que poderão ser úteis para o projeto geotécnico. O presente artigo descreve as características físicas e os parâmetros de compressibilidade para as principais formações miocénicas de cariz argiloso: Argilas dos Prazeres e Argilas do Forno do Tijolo. Apresenta-se os resultados dos elementos recolhidos de relatórios existentes e resultados obtidos de ensaios realizados sobre amostras recolhidas num campo experimental. Estabelece-se um conjunto de parâmetros que podem ser considerados representativos para as formações em estudo.

ABSTRACT – Lisbon Miocene formation was subjected to an extensive characterisation study, in order to establish a set of value intervals for its main physical properties, compressibility and strength parameters, which can be useful for geotechnical design. This paper describes the physical characteristics and compressibility parameters for the Miocene clay formation, namely Prazeres Clay and Forno do Tijolo Clay. The results of elements collected from existing reports and results obtained from tests on samples collected in an experimental field are presented. A set of parameters that can be considered representative for the formations under study is established.

Palavras Chave – Argilas miocénicas; índices físicos, compressibilidade.

Keywords – Miocene clays, physical properties, compressibility.

1 – INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas foram construídas na região de Lisboa numerosas obras de grande importância e complexidade técnica, que implicaram a caracterização geotécnica dos terrenos interessados, que incluem muitas vezes as formações miocénicas. O âmbito desta caracterização geotécnica é em geral tanto maior quanto mais complexa a obra a que se refere, podendo incluir apenas a realização de furos de sondagem com identificação das principais unidades litoestratigráficas interessadas, envolver a realização de ensaios de campo, ou ainda incluir a recolha de amostras e os resultados de ensaios laboratoriais. Do conjunto das obras com maior relevância, destacam-se as obras de expansão da rede do Metropolitano de Lisboa, as escavações para caves ou parques de estacionamento subterrâneos, e também obras de fundações para novos edifícios. O

E-mails: mlopes@estg.ipv.pt (M. Lopes), mfern@fe.up.pt (M. Fernandes)

ORCID: orcid.org/0000-0002-4707-0685 (M. Lopes), orcid.org/0000-0003-2661-9357 (M. Fernandes)

acervo de dados e de resultados é muito vasto e encontra-se disperso pelas diversas entidades interessadas pela realização dessas obras, nomeadamente pelas empresas de prospeção geotécnica, pelas empresas construtoras, pelos gabinetes de projeto, ou mesmo pelos donos de obra. No âmbito de um trabalho desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Lopes Laranjo, 2013), foi feita a compilação e o tratamento sistemático destes dados, com vista a contribuir para aprofundar o conhecimento acerca das características destes solos, particularmente tendo em conta a escassez de bibliografia técnico-científica sobre os mesmos. Esse trabalho de recolha tem prosseguido mais recentemente focada em obras e campanhas de reconhecimento de especial relevância.

As formações analisadas incluem as Argilas e Calcários dos Prazeres e as Argilas do Forno do Tijolo. A história geológica da Bacia do rio Tejo e do seu estuário é bastante complexa, e resulta da interação entre movimentos tectónicos da crosta terrestre, nomeadamente ao longo de uma falha na zona Sul do Tejo, e as oscilações do nível do mar (Pais, 2004). O Miocénico de Lisboa corresponde à sedimentação quase constante durante cerca de 16 MA, na zona vestibular do rio Tejo. A subsidência muito intensa foi compensada por sedimentação ativa de elementos transportados pelos rios, que chegaram em grande quantidade durante as fases orogénicas mais ativas (Moitinho de Almeida, 1991; Pais et al., 2006). No Aquitaniano formaram-se os primeiros depósitos da Série, as Argilas e Calcários dos Prazeres, na base constituídos por conglomerados, areias, margas e siltes glauconíferos. Uma vez que este trabalho se centra nos solos argilosos dessa formação, a mesma será identificada apenas por Argilas dos Prazeres. Mais tarde, durante o Burdigaliano médio, formaram-se em Lisboa as Argilas do Forno de Tijolo, quando a incursão do mar teve o seu apogeu, e avançou até às imediações da Azambuja. Esta unidade é constituída na sua totalidade por areias finas argilosas, de cor cinzenta azulada, e margas com intercalações de grés fino argiloso (Moitinho de Almeida, 1991).

No presente trabalho dá-se particular importância às características físicas e de identificação e aos parâmetros de compressibilidade. Os elementos apresentados incluem os que foram obtidos a partir de relatórios existentes, e os obtidos em ensaios realizados sobre amostras recolhidas num campo experimental pelos autores, todos criteriosamente tratados para poderem ser considerados representativos das formações estudadas. Em trabalho complementar serão tratados os parâmetros de resistência.

2 – METODOLOGIA

2.1 – Recolha de dados

As características das duas formações argilosas da Série Miocénica em Lisboa foram recolhidas a partir dos relatórios de prospeção geotécnica realizados no âmbito da construção de diversas obras, com ênfase particular para as obras do Metropolitano de Lisboa, que incluem campanhas de caracterização bastante abrangentes, quer em relação ao número de ensaios realizados, quer no que respeita à sua diversidade. Incluem-se ainda elementos gentilmente cedidos por empresas de prospeção geotécnica referentes a outras obras, com menor número de amostras ensaiadas.

A primeira triagem dos dados foi realizada a partir da localização da obra e do seu posicionamento sobre a Carta Geológica de Lisboa. Este processo foi desenvolvido com recurso ao programa Google Earth®, no qual se inseriu a Carta Geológica de Lisboa à escala 1:10 000, permitindo sobrepor as diversas localizações, em forma de morada ou de coordenadas M e P, e identificar os processos que poderiam conter informação relevante.

Apenas os trabalhos efetuados a partir do final da década de 1990 existem de base em formato digital. Todos os trabalhos anteriores a essa data foram digitalizados, sendo o trabalho mais antigo a que se teve acesso datado de 1976. As listagens dos trabalhos realizados permitem para os processos mais antigos identificar o existente. No âmbito do Projeto GeoSIS_Lx - Modelação e cartografia geológica e geotécnica tridimensional em áreas urbanas – aplicação a Lisboa (Matildes

et al., 2011), foi feito um levantamento cuidado e bastante completo do acervo de algumas empresas de prospeção, e desenvolvidas listagens que incluíram para os processos mais antigos um resumo do seu conteúdo e a digitalização dos elementos que os constituem (relatórios, logs de sondagens, boletins de ensaio, etc.). Estes elementos foram de grande valor ao facilitarem a recolha efetuada.

Após triar os relatórios por local verificou-se que, na maior parte dos casos, em particular quando se trata de obras mais pequenas, as campanhas de prospeção incluem apenas a realização de sondagens e ensaios SPT, e não fornecem dados relativos a ensaios de identificação ou outros ensaios laboratoriais. Na perspetiva de efetuar a caracterização física destes solos, foram então escolhidos apenas os relatórios que incluíssem no mínimo informação acerca dos índices físicos do solo. De entre estes relatórios, passou-se por fim a selecionar aqueles cujos ensaios interessassem as formações em estudo: as Argilas dos Prazeres e as Argilas do Forno do Tijolo.

Após esta triagem, passou-se à organização dos dados propriamente ditos. Os elementos constantes dos relatórios foram compilados numa folha de cálculo, onde se registaram para cada unidade geológica: a origem do relatório, o nome ou número de referência do documento; o número da sondagem e (ou) da amostra estudada, a profundidade a que foi recolhida, a sua granulometria, os limites de Atterberg, o índice de plasticidade, o teor em água natural, o índice de consistência, o peso volúmico, a densidade das partículas sólidas, o índice de vazios natural e o peso volúmico seco.

Em relação aos parâmetros de compressibilidade, os elementos recolhidos, seguindo a mesma metodologia, referem-se fundamentalmente a ensaios edométricos com determinação dos parâmetros de compressibilidade e de consolidação.

No processo acima descrito foram visados cerca de 709 processos de obras realizadas em Lisboa entre 1976 e 2010. Destes, retiraram-se resultados de cerca de uma centena de relatórios. Deve referir-se que num número significativo de casos, estes envolvem diversas localizações, em particular no caso dos relatórios referentes às obras do Metropolitano de Lisboa. No seu conjunto, tais localizações estão bem distribuídas pelas áreas do município de Lisboa onde estas formações ocorrem.

No total, foram tratados os resultados dos ensaios para a caracterização física de solos realizados sobre 736 amostras, das quais 495 correspondem às Argilas dos Prazeres, 229 respeitam as Argilas do Forno do Tijolo e apenas 12 interessam as Argilas de Xabregas. Com efeito, as duas primeiras ocupam uma área mais significativa do subsolo da cidade, pelo que estão bastante mais representadas (Lopes Laranjo, 2013).

Nesta análise incluem-se, para além dos elementos descritos acima, os resultados de ensaios realizados sobre amostras das Argilas dos Prazeres e das Argilas do Forno do Tijolo publicados por Moitinho de Almeida (1991).

Para além dos elementos coligidos, foram realizados ensaios laboratoriais sobre amostras colhidas em bloco num campo experimental escolhido para o efeito, situado na Av. Visconde Valmor em Lisboa, onde as Argilas dos Prazeres surgem a cerca de 4,0 m de profundidade.

Os parâmetros de compressibilidade e consolidação aqui apresentados referem-se à compilação e tratamento de informação existente relativa a ensaios edométricos realizados em edómetros de alta pressão e compreendem 29 ensaios sobre amostras das Argilas dos Prazeres e 11 ensaios sobre amostras das Argilas do Forno do Tijolo. A estes resultados juntam-se 3 ensaios realizados em amostras do campo experimental, também realizados no edómetro de alta pressão.

2.2 – Características analisadas

As características físicas estudadas foram: a composição granulométrica, os limites de Atterberg, o teor em água natural, o peso volúmico do solo, a densidade das partículas sólidas, o índice de vazios e o peso volúmico seco do solo. Os dados relativos às Argilas dos Prazeres e às Argilas do Forno do Tijolo apresentam-se organizados de modo a permitir identificar intervalos de variação, médias e desvios padrão do total de resultados recolhidos, para as duas formações em paralelo.

Relativamente à forma como as amostras foram comparadas, foi considerada a profundidade a que estas foram recolhidas, uma vez que a cota da boca do furo de sondagem não consta de muitos boletins de ensaio, pelo que o tratamento com base na cota inviabilizaria o uso de um número muito significativo de resultados. Apesar de os elementos existentes serem provenientes de diferentes locais, a sua análise foi feita conjuntamente. Um estudo mais detalhado em que os dados se analisavam por local de amostragem, não forneceu diferenças significativas em relação aos resultados analisados de modo global. Uma vez que a análise conjunta aumenta a representatividade das conclusões, foi essa a opção considerada.

Os parâmetros de compressibilidade que se apresentam incluem os índices de compressibilidade (C_c), de expansibilidade (C_s) e de recompressão (C_r), a tensão de pré-consolidação (σ'_p) e o grau de sobreconsolidação (OCR), os coeficientes de consolidação primária (c_v) e secundária (C_a) e o coeficiente de permeabilidade (k). Para as Argilas do Forno do Tijolo a informação disponível permitiu apenas estabelecer os parâmetros de consolidação.

O grau de sobreconsolidação foi estimado com base nos resultados de ensaios edométricos utilizando diferentes metodologias para quantificar a tensão de pré-consolidação.

3 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

3.1 – Composição granulométrica

Os solos que pertencem às Argilas dos Prazeres apresentam uma significativa diversidade relativamente à composição granulométrica. A fração silte é a mais significativa, sendo as percentagens de argila e areia bastante variáveis, pelo que se pode afirmar tratar-se de solos com granulometria relativamente extensa. Apesar do elevado número de amostras para as quais se dispunha da composição granulométrica, cerca de 350, apenas para 137 foi realizada a sedimentação, pelo que os resultados relativos à percentagem de argila que se apresentam, se referem apenas a estes dados.

A Figura 1a) apresenta a distribuição granulométrica em profundidade obtida para 79 amostras das Argilas dos Prazeres.

No lado direito da Figura 1a) mostra-se o número de amostras correspondentes a cada profundidade (n) que deu origem às médias apresentadas. Pode verificar-se que a percentagem de composição percentual das amostras não varia consideravelmente em profundidade. A representação da granulometria utilizando um diagrama triangular de Feret, permite verificar que cerca de 35 % das amostras correspondem a argilas siltosas e 23 % correspondem a siltes argilosos, sendo as restantes percentagens bastante menos significativas.

Na Figura 1b) apresenta-se a distribuição granulométrica em profundidade obtida para 76 amostras das Argilas do Forno do Tijolo, 49 das quais incluem resultados da sedimentação. A tracejado mostra-se as percentagens de silte e argila, para os casos em que não se dispunha da percentagem de argila presente.

A representação da granulometria utilizando um diagrama triangular de Feret, permite verificar que as Argilas do Forno do Tijolo são de uma maneira geral mais dispersas em termos de classificação do que as amostras das Argilas dos Prazeres. A diversidade na composição granulométrica é também bastante significativa, verificando-se que 29 % das amostras se classificam como argilas, 20 % são argilas siltosas e 18 % correspondem a siltes arenosos.

A análise da distribuição da fração argilosa das amostras ($D_{m\acute{a}x} < 0,002$ mm) em função da fração fina ($D_{m\acute{a}x} < 0,06$ mm), mostra, para ambas as formações, elevada variabilidade, pelo que não é possível estabelecer uma relação entre estes dois parâmetros. A variação na percentagem de argila conduzirá a substanciais diferenças na plasticidade das amostras, como abaixo é ilustrado.

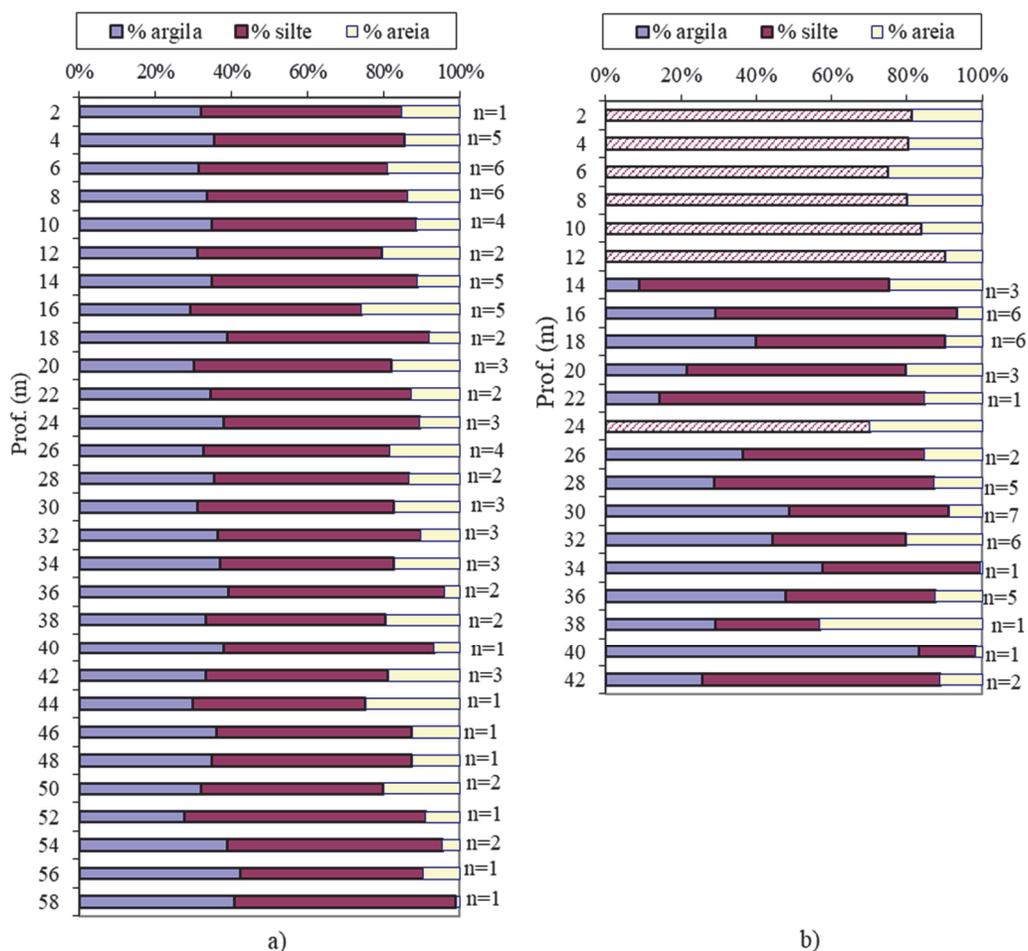


Fig. 1 - Distribuição granulométrica em profundidade (valores médios): a) Argilas dos Prazeres; b) Argilas do Forno do Tijolo.

3.2 – Limites de Atterberg

A determinação dos limites de Atterberg e do teor em água natural (w) foi realizada para um número muito significativo de amostras (n) e os valores estatísticos descritivos relativos ao limite de liquidez (w_L), limite de plasticidade (w_P), índice de plasticidade (I_P) e índice de consistência (I_C) resumem-se no Quadro 1 para as Argilas dos Prazeres e no Quadro 2 para as Argilas do Forno do Tijolo.

Quadro 1 – Estatística descritiva para o teor em água natural, os limites de Atterberg e o índice de consistência das amostras das Argilas dos Prazeres.

	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	w (%)	I_C (%)
Mínimo	19,00	13,00	3,00	7,50	0,45
Máximo	72,00	57,00	53,00	37,70	2,67
Média	40,84	20,49	20,74	19,74	1,08
Desvio padrão	11,47	4,50	9,27	4,93	0,28
n	433	433	438	351	289

Quadro 2 - Estatística descritiva para o teor em água natural, os limites de Atterberg e índices de consistência das amostras das Argilas do Forno do Tijolo.

	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	w (%)	I_c (%)
Mínimo	20,00	8,00	2,00	5,70	0,53
Máximo	67,80	48,60	41,00	33,50	2,30
Média	36,92	21,24	15,71	19,26	1,12
Desvio padrão	9,96	4,58	7,62	4,38	0,33
n	208	207	207	160	145

As formações apresentam teor em água em geral muito próximo do limite de plasticidade, pelo que os índices de consistência são característicos de solos rijos ou duros. As Argilas dos Prazeres apresentam média plasticidade, enquanto as Argilas do Forno do Tijolo apresentam plasticidade baixa. O número de resultados não é o mesmo para todos os parâmetros apresentados, já que nem sempre se dispunha de informação relativa ao teor em água natural e aos limites de Atterberg para todas as amostras.

A distribuição em profundidade dos limites de Atterberg e do teor em água natural apresenta-se na Figura 2a) para as Argilas dos Prazeres e na Figura 3a) para as Argilas do Forno do Tijolo. A tracejado apresenta-se o valor médio do teor em água e do índice de consistência.

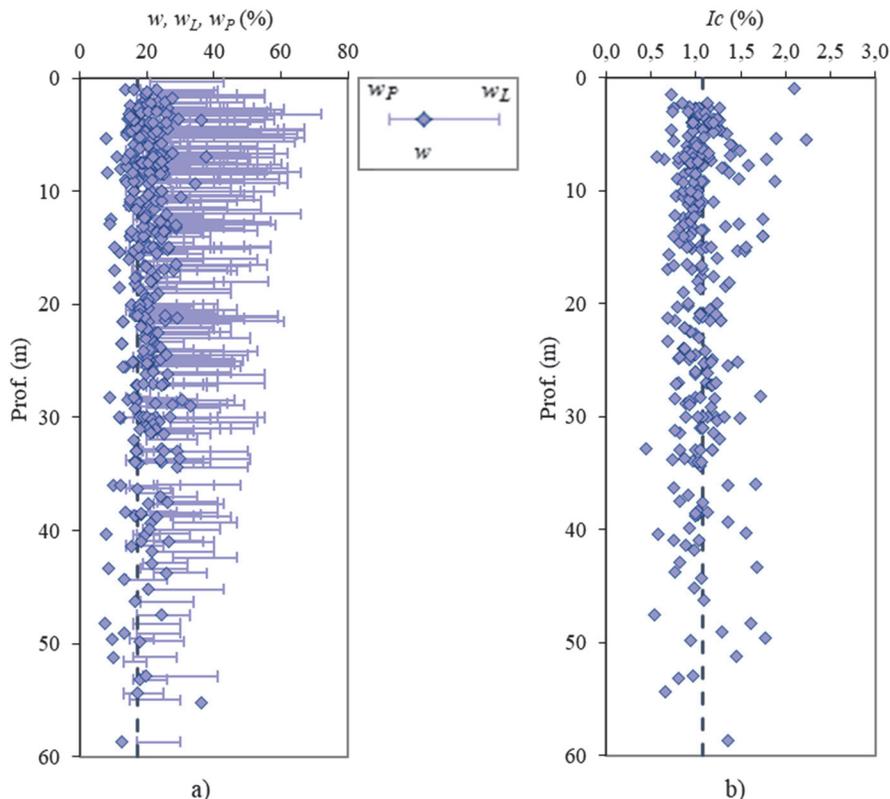


Fig. 2 - Evolução em profundidade para as Argilas dos Prazeres de: a) teor em água natural e limites de Atterberg; b) índice de consistência.

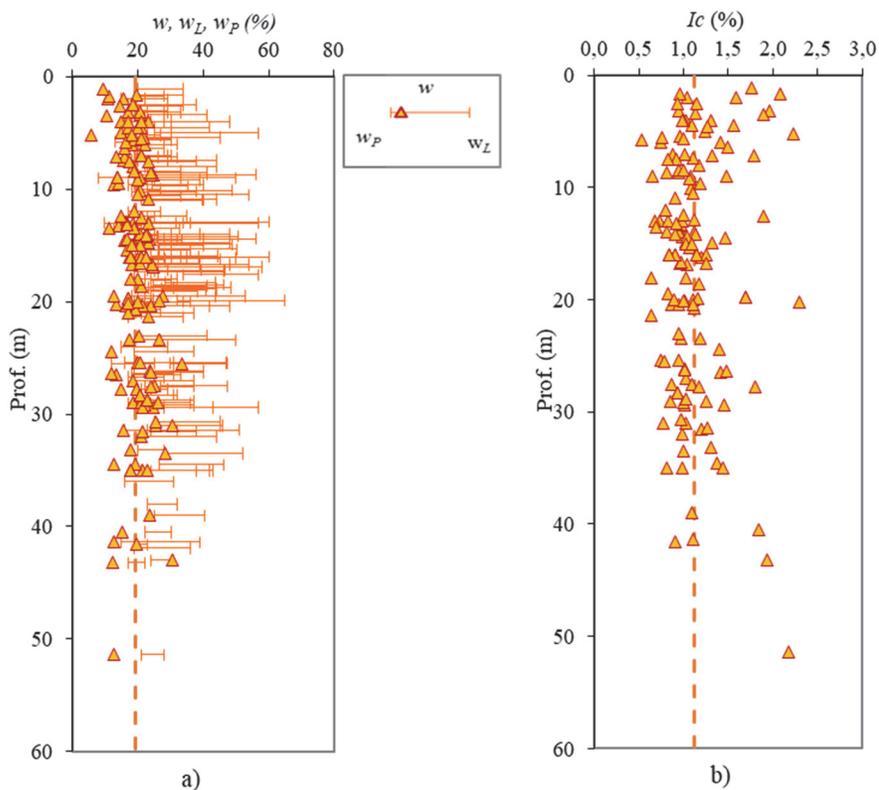


Fig. 3 - Evolução em profundidade para as Argilas do Forno do Tijolo de: a) teor em água natural e limites de Atterberg; b) índice de consistência.

Verifica-se que o teor em água natural não tende a diminuir em profundidade, mantendo-se, apesar de alguma dispersão, sensivelmente constante nas duas formações. Esta situação deverá estar relacionada com o elevado grau de sobreconsolidação. O índice de plasticidade apresenta variações mais significativas, em particular nas Argilas do Forno do Tijolo, sendo bastante mais baixo para as amostras recolhidas abaixo dos 35 m de profundidade.

Relativamente ao limite de liquidez, a Figura 2a) mostra que este é mais baixo a profundidades maiores. É ainda possível confirmar a localização do teor em água natural, em muitos casos, à esquerda do limite de plasticidade ou praticamente coincidente com este. As Figuras 2b) e 3b) apresentam a variação em profundidade do índice de consistência.

A representação na Carta de Plasticidade de Casagrande, ilustrada na Figura 4a), mostra que a fração fina da maior parte das amostras das Argilas dos Prazeres se classifica como argila magra, havendo algumas amostras de argila gorda e apenas uma percentagem pouco significativa de amostras classificadas como silte elástico. Em relação às amostras das Argilas do Forno do Tijolo, a Figura 4b) mostra que a fração fina da maior parte das amostras se classifica como argila magra, havendo algumas amostras de argila magra com silte.

Eliminando as amostras situadas abaixo da linha “A”, podem obter-se as retas de regressão definidas pelas equações 1 e 2, para as Argilas dos Prazeres e para as Argilas do Forno do Tijolo respetivamente, com elevados coeficientes de determinação:

$$I_p = 0,76 * (w_L - 13,4) \quad R^2 = 0,94 \quad (1)$$

$$I_p = 0,76 * (w_L - 15,4) \quad R^2 = 0,88 \quad (2)$$

As retas apresentam-se bastante semelhantes e foram obtidas para um número muito significativo de resultados, pelo que poderão ser consideradas representativas destes solos.

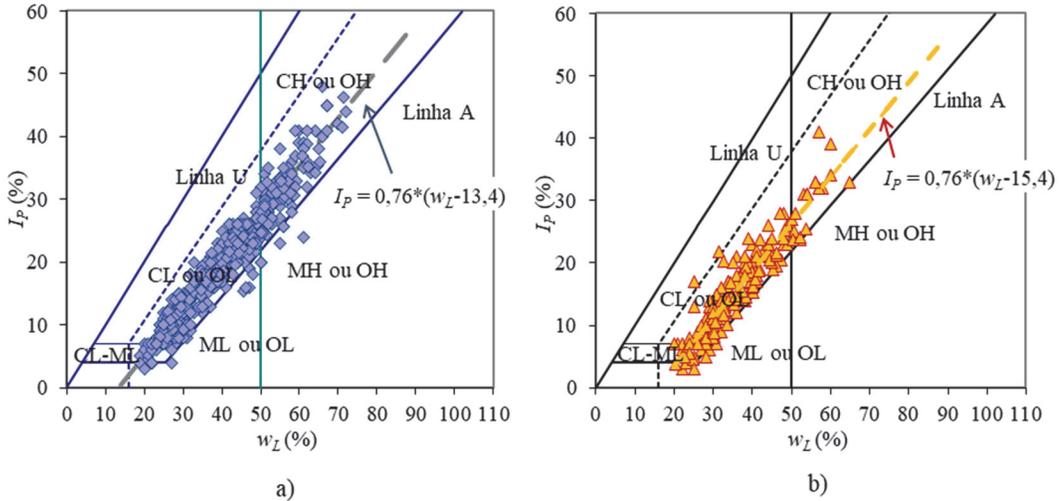


Fig. 4 - Carta de plasticidade de Casagrande e retas de regressão obtidas excluindo as amostras situadas abaixo da Linha “A”: a) Argilas dos Prazeres; b) Argilas do Forno do Tijolo.

3.3 – Atividade

Em relação à atividade das argilas, os resultados reunidos, que se apresentam na Figura 5, indicam para ambas as formações argilas pouco ativas ou com atividade normal, salvo algumas exceções para as quais a atividade é superior a 1,25, casos que se referem a amostras com baixa percentagem de argila.

Verifica-se que estes são concordantes com a informação descrita na bibliografia (Moitinho de Almeida, 1991; Marques, 1998) e suportados pela informação relativa à composição mineralógica. Nas Argilas dos Prazeres predominam esmectites, ilites, caulinites e clorites, enquanto as Argilas do Forno do Tijolo apresentam sempre um dos dois minerais predominantes, que são as esmectites e as ilites.

Na mesma figura apresenta-se ainda as atividades características de alguns minerais de argila. A observação da Figura 5 sugere que as amostras das Argilas do Forno do Tijolo serão menos ativas do que as das Argilas dos Prazeres, apesar de o número de resultados disponível ser inferior. No Quadro 3 resume-se os resultados obtidos para a Atividade (A_t).

Quadro 3 - Estatística descritiva para a atividade das argilas.

	A_t	
	Argilas dos Prazeres	Argilas do Forno do Tijolo
Mínimo	0,17	0,18
Máximo	1,80	2,73
Média	0,68	0,58
Desvio padrão	0,32	0,50
n	72	51

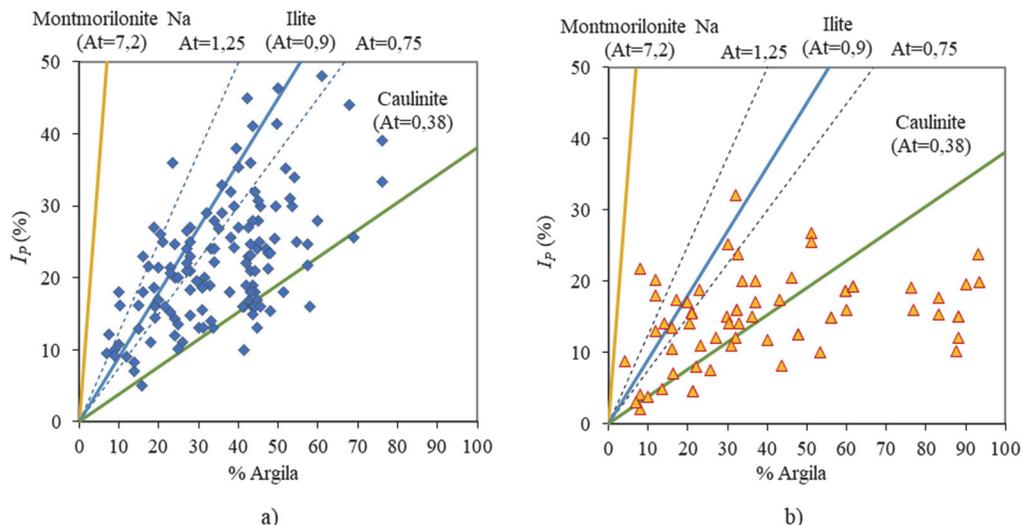


Fig. 5 - Atividade das argilas: a) Argilas dos Prazeres; b) Argilas do Forno do Tijolo.

3.4 – Índices físicos

Os índices físicos determinados para as formações em estudo incluem o teor em água (w), o peso volúmico (γ), a densidade das partículas sólidas (G_s), o peso volúmico seco (γ_d) e o índice de vazios natural (e). O número de resultados analisados varia para cada índice físico, uma vez que os dados disponíveis nem sempre incluíam a mesma informação. Os Quadros 4 e 5 apresentam resumo da estatística descritiva para os índices físicos das Argilas dos Prazeres e das Argilas do Forno do Tijolo, respetivamente.

Quadro 4 - Estatística descritiva para os índices físicos das Argilas dos Prazeres.

	w (%)	G_s	γ (kN/m ³)	e	γ_d (kN/m ³)
Mínimo	7,50	2,56	16,13	0,25	14,22
Máximo	37,70	2,80	23,76	0,95	22,30
Média	19,74	2,67	20,41	0,53	17,26
Desvio padrão	4,93	0,06	1,03	0,11	1,30
n	351	203	196	143	206

Quadro 5 - Estatística descritiva para os índices físicos das Argilas do Forno do Tijolo.

	w (%)	G_s	γ (kN/m ³)	e	γ_d (kN/m ³)
Mínimo	5,70	2,56	16,50	0,33	14,60
Máximo	33,50	2,80	22,10	0,71	19,80
Média	19,26	2,70	20,42	0,55	17,10
Desvio padrão	4,38	0,06	0,96	0,08	0,93
n	160	46	110	47	109

Em relação à densidade das partículas sólidas foi adotado um critério de exclusão que permitiu chegar à gama de valores apresentada, dado que alguns boletins de ensaio indicavam valores pouco plausíveis. Em particular, valores demasiado elevados (alguns da ordem de 3,0) foram considerados anómalos, e por isso excluídos.

4 – COMPRESSIBILIDADE E CONSOLIDAÇÃO

4.1 – Ensaio edométricos

O tratamento de informação relativa a ensaios edométricos corresponde a um número consideravelmente inferior de resultados. Com efeito, os ensaios com edómetros clássicos não permitem para estes solos atingir um carregamento significativo em ramo virgem, pelo que não foram incluídos no estudo.

Relativamente aos ensaios realizados em edómetros de alta pressão, os elementos analisados compreendem resultados de 14 ensaios sobre amostras das Argilas dos Prazeres. A profundidade a que estas amostras foram recolhidas varia entre os 4 m e os 40 m, e os locais de recolha foram o túnel do Término da Alameda D. Afonso Henriques (Marques, 1998), o poço da Rua Ivens (Pedro, 2013), a Av. da Liberdade, a Av. da República e a Praça do Saldanha (Figueiredo, 2009) e o campo experimental na Av. Visconde Valmor (Lopes Laranjo, 2013). Os parâmetros determinados incluem os índices de compressibilidade (C_c), de expansibilidade (C_s) e de recompressão (C_r), a tensão de pré-consolidação (σ'_p) e o grau de sobreconsolidação (OCR), os coeficientes de consolidação primária (c_v) e secundária (C_a) e o coeficiente de permeabilidade (k). O Quadro 6 resume as características físicas das amostras das Argilas dos Prazeres ensaiadas nos edómetros de alta pressão.

Quadro 6 - Características físicas das amostras das Argilas dos Prazeres ensaiadas em edómetros de alta pressão.

Local	Referência	Prof. (m)	Condições iniciais		Condições finais	
			e_0	w_0 (%)	e_{fin}	w_{fin} (%)
Túnel do Término	Marques, 1998	12,9	0,696	25,36	0,512	19,71
		14,0	0,682	23,91	0,482	18,55
		20,0	0,613	17,78	0,417	15,83
		24,7	0,678	20,16	0,413	15,47
		31,0	0,709	22,62	0,482	18,40
Av. da Liberdade	Figueiredo, 2009	8,0	0,614	23,54	0,474	21,14
Saldanha		8,0	0,710	25,20	0,569	24,79
Av. da República		8,5	0,614	19,49	0,484	19,58
Poço na Rua Ivens	Pedro, 2013	36,5	0,563	16,40	0,391	14,50
		37,5	0,671	2,30 ⁽¹⁾	0,478	17,90
		40,0	0,735	27,0	0,605	23,60
Av. Visconde Valmor	Lopes Laranjo, 2013	4,0	0,742	24,30	0,718	26,12
		4,0	0,801	26,70	0,676	24,60
		4,0	0,993	34,00	0,695	25,10

(1) - amostra bastante seca antes do ensaio

A Figura 6 mostra as curvas de compressão normalizadas pelo índice de vazios inicial (e_0) referentes apenas à primeira carga, ou seja, excluem-se as descargas e subsequentes recargas. É interessante observar que, apesar de serem provenientes de distintos locais e terem sido recolhidas

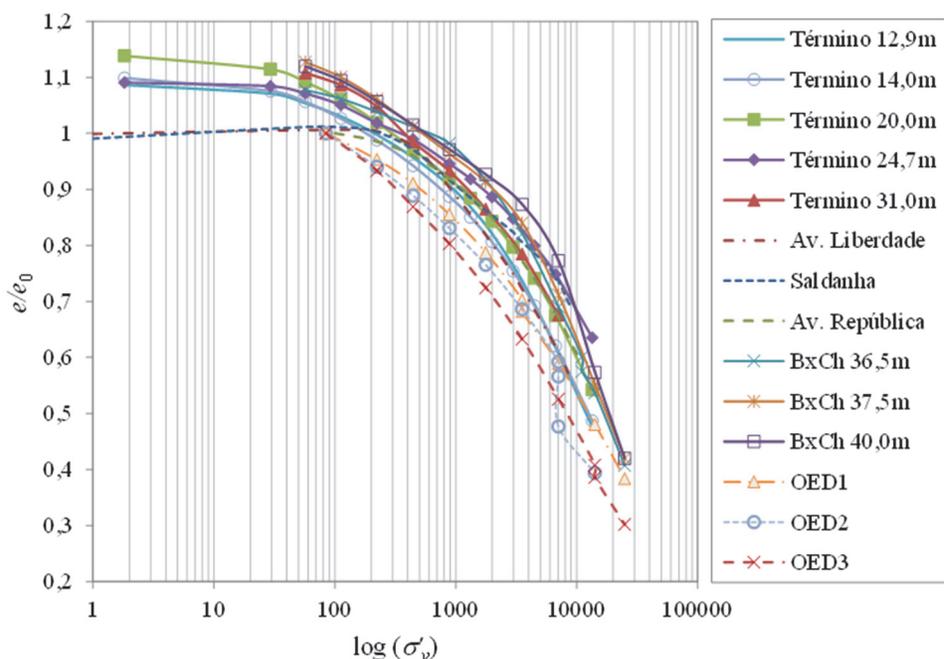


Fig. 6 - Curvas de compressão normalizadas pelo índice de vazios inicial obtidas em ensaios com edômetros de alta pressão em amostras das Argilas dos Prazeres.

a diferentes profundidades, as amostras exibem curvas de compressão bastante semelhantes, que por isso deverão constituir uma boa base de comparação para outros resultados de ensaios similares.

Os parâmetros de compressibilidade obtidos nestes ensaios, após tratamento da curva de compressibilidade pela construção de Schmertmann (1955), resumem-se no Quadro 7. Para além dos valores dos índices de compressibilidade, de recompressão e de expansibilidade, apresentam-se ainda os valores da razão $C_c/(1+e_0)$, e da razão C_s/C_c .

Pode verificar-se que o índice de compressibilidade não exhibe variações significativas, pelo que o valor médio de 0,27 constitui uma boa representação do conjunto. O mesmo acontece com a razão $C_c/(1+e_0)$. Em relação aos índices de expansibilidade e de recompressão, apesar de a dispersão de resultados ser ligeiramente maior, os valores médios de 0,06 e 0,07, respetivamente, parecem representar razoavelmente bem o conjunto de resultados tratados e vão de encontro aos descritos na bibliografia para solos desta natureza (Cotecchia, 2002; Gasparre, 2005; Cotecchia et al., 2007; Bagheri & Rezania, 2021). A análise destes parâmetros permite verificar que não parece haver significativa dependência da profundidade.

A razão C_s/C_c apresenta valores mais elevados para as amostras do campo experimental, dado que a recuperação do índice de vazios na descarga é bastante pronunciada, como mostra a Figura 7. Esta recuperação na descarga pode estar relacionada com efeitos físico-químicos e microestruturais (Cui et al., 2013; Guglielmi et al., 2022). Estas amostras foram colhidas acima do nível freático, pelo que podem exibir sucção de valor considerável. Quando os solos exibem sucção e são descarregados para tensões inferiores às tensões que correspondem a variação volumétrica nula, os fenómenos de natureza química prevalecem sobre os de natureza mecânica, o que pode explicar estes valores mais elevados de C_s .

Quadro 7 - Parâmetros de compressibilidade de amostras das Argilas dos Prazeres ensaiadas em edômetros de alta pressão.

Local	Ref.	Prof. (m)	Class. Unif.	C_c	$\frac{C_c}{1 + e_0}$	C_s	C_r	$\frac{C_s}{C_c}$
Túnel do Término, Alameda D. Afonso Henriques	Marques, 1998	12,9	CL	0,294	0,173	0,056	0,053	0,190
		14,0	CL	0,275	0,163	0,045	0,053	0,171
		20,0	CL	0,272	0,169	0,034	0,066	0,125
		24,7	Solo grosso	0,216	0,129	0,019	0,058	0,148
		31,0	CH	0,276	0,161	0,065	0,087	0,228
Av. da Liberdade	Figueiredo, 2009	8,0	CL	0,239	0,148	0,046	0,020	0,192
Praça do Saldanha		8,0	CH	0,191	0,112	0,035	0,029	0,183
Av. da República		8,5	CH	0,222	0,138	0,030	0,050	0,135
Poço da Rua Ivens	Pedro, 2013	36,5	CL	0,245	0,157	0,041	0,041	0,167
		37,5	CL	0,305	0,183	0,058	0,074	0,190
		40,0	CH	0,404	0,233	0,083	0,074	0,205
Av. Visconde Valmor	Lopes Laranjo 2013	4,0	CH-OH	0,27	0,154	0,075	0,109	0,278
		4,0	CH-OH	0,31	0,156	0,113	0,159	0,365
		4,0	CL-OL	0,32	0,164	0,141	0,167	0,441
Valor médio (\pm desvio padrão)				0,27 ($\pm 0,05$)	0,16 ($\pm 0,03$)	0,06 ($\pm 0,03$)	0,07 ($\pm 0,04$)	0,22 ($\pm 0,09$)

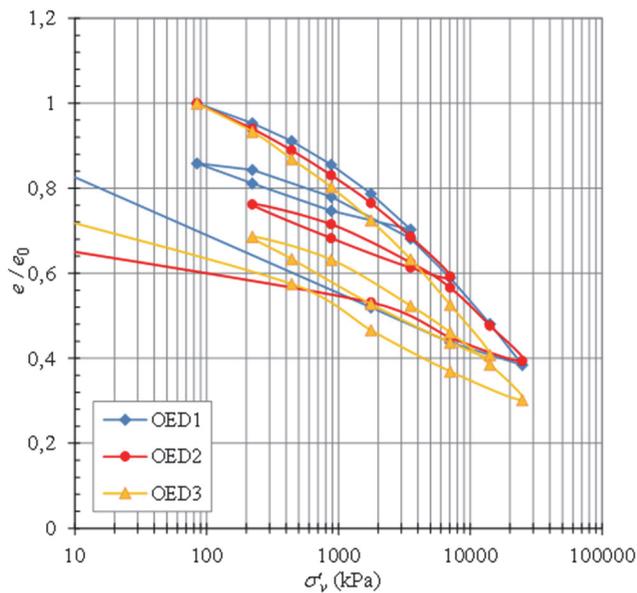


Fig. 7 - Curvas de compressibilidade das amostras do campo experimental, normalizadas pelo índice de vazios inicial.

4.2 – Grau de sobreconsolidação

A tensão efetiva vertical de repouso é simples de determinar para cada amostra, desde que sejam conhecidas a profundidade a que esta foi recolhida e a posição do nível freático no local de recolha. Já a tensão de pré-consolidação (σ'_p), entendida como a máxima tensão vertical a que o solo já esteve sujeito, é de determinação mais complexa. Com base unicamente no conhecimento da história geológica de determinado local, é por vezes possível estabelecer um valor aproximado para a máxima tensão vertical que já lá esteve instalada. No entanto, é com base na análise da curva de compressão dos ensaios edométricos que esta tensão se define mais rigorosamente. Identificar o ponto de cedência que define a tensão de pré-consolidação é difícil devido à perturbação das amostras, particularmente no caso de argilas rijas, uma vez que estas estão sujeitas a tensões isotrópicas nulas quando se retiram dos amostradores, e por vezes ocorre alguma expansão antes do carregamento. A consequência é que a tensão de pré-consolidação é subestimada (Mayne, 1988).

Os métodos mais conhecidos para a determinação de σ'_p são a construção de Casagrande (Casagrande, 1936) e o método simplificado (Josseaume et al., 1991), que utilizam a curva e -log σ'_v , e também o método originalmente desenvolvido por Butterfield (1979) mais tarde apresentado por Sridharan (1991), que utiliza a representação da curva de compressão no sistema de eixos coordenados $\log(1+e) - \log \sigma'_v$. Para a análise que aqui se apresenta, as curvas de compressão disponíveis foram tratadas pelos três métodos indicados acima.

A construção de Casagrande reveste-se sempre de alguma subjetividade, na medida em que é necessário identificar o ponto da curva de compressão que exhibe menor raio de curvatura, para a partir dele iniciar a construção. A forma da curva e o facto de se representar num eixo de abcissas em escala logarítmica faz com que uma variação relativamente pequena na posição deste ponto se possa traduzir numa diferença de uma ou duas unidades no valor do grau de sobreconsolidação calculado. Esta questão pode ser particularmente difícil sempre que a curva de compressão não exhiba uma quebra nítida, como é frequente em argilas duras.

De acordo com o método simplificado (Josseaume et al., 1991), a tensão de pré-consolidação é aquela que corresponde à intersecção do prolongamento da parte linear da curva de compressão com a reta de declive C_s que passa pelo ponto de coordenadas (σ'_{v0}, e_0), ou seja, correspondente ao estado de tensão em repouso. A decompressão associada à amostragem provoca alguma expansão que altera a posição do ponto correspondente ao repouso.

O método de Butterfield, também chamado de método rigoroso, surgiu da constatação de que em solos mais compressíveis a representação e -log σ'_v nem sempre é linear, ao contrário do que acontece com a representação de $\log(1+e) - \log \sigma'_v$ (Butterfield, 1979). A representação bi-logarítmica não perturba a bem conhecida quase-linearidade das curvas de descarga e recarga, uma vez que as alterações no volume específico associadas a estas variações são muito pequenas. Com efeito, o autor mostra para diversas argilas bem conhecidas, como a argila de Londres, a argila Azul de Boston e a argila de Chicago, que as curvas de compressão representadas neste sistema de eixos coordenados aumentam a sua linearidade. Utilizando esta representação, a tensão de pré-consolidação pode ser determinada como a que corresponde à intersecção dos dois troços lineares, correspondentes à fase inicial da recompressão e ao carregamento em ramo virgem, como mostra a Figura 8. Mais tarde, partindo de inúmeros estudos e ensaios edométricos com pressão controlada, em que era conhecida a tensão de pré-consolidação (Sridharan et al., 1991), conclui-se que esta representação é, em comparação com todas as outras, a que fornece melhores resultados.

Os declives das retas da Figura 8, identificados por C_s e C_c , para os ensaios tratados no âmbito deste trabalho, resumem-se no Quadro 8, que apresenta a gama de variação e o valor médio para cada subconjunto de ensaios, bem como a média e o desvio padrão para a totalidade dos elementos relativos às Argilas dos Prazeres. Verifica-se que o valor médio obtido para C_c é bastante próximo do apresentado por Butterfield (1979) para as argilas de Londres, que foi de 0,083. Já em relação a

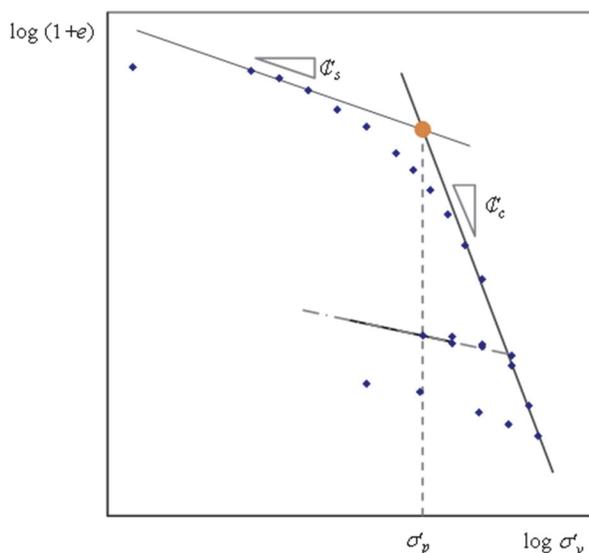


Fig. 8 - Curvas de compressibilidade das amostras do campo experimental, normalizadas pelo índice de vazios inicial.

C_s o valor médio nas Argilas dos Prazeres aproxima-se mais do das argilas magras apresentadas por aquele autor, como a argila de Drammen, com C_s igual a 0,016.

Quadro 8 - Declives das retas que aproximam a recompressão e o ramo virgem na representação bi-logarítmica de Butterfield de amostras das Argilas dos Prazeres ensaiadas em edômetros de alta pressão.

Local	C_s		C_c	
	Gama de variação	Valor médio	Gama de variação	Valor médio
Túnel do Término	0,009-0,017	0,014	0,072-0,098	0,087
Av. da Liberdade – Praça do Saldanha – Av. da República	0,006-0,010	0,008	0,054-0,075	0,066
Baixa-Chiado	0,011-0,019	0,016	0,086-0,128	0,105
Av. Visconde Valmor	0,021-0,034	0,028	0,086-0,110	0,099
Valor médio (\pm desvio padrão)		0,016(\pm 0,008)		0,089(\pm 0,02)

O Quadro 9 resume os resultados obtidos para a tensão de pré-consolidação e para o grau de sobreconsolidação considerando os três métodos descritos. Importa realçar que, independentemente do método utilizado para avaliar a tensão de pré-consolidação, os valores obtidos são bastante elevados, quase todos superiores a 1000 kPa, e ultrapassando 3000 kPa em alguns casos.

Uma vez que no método de Butterfield se utiliza o declive do ramo de recompressão, ao passo que no método simplificado se considera o declive que melhor representa a histerese num ciclo de descarga-recarga, os resultados obtidos utilizando este último método poderiam ser ligeiramente inferiores aos obtidos com o método de Butterfield, o que nem sempre acontece. Curiosamente, os resultados obtidos pela construção de Casagrande foram os que forneceram o valor médio mais baixo.

Quadro 9 - Tensão de pré-consolidação e grau de sobreconsolidação de amostras das Argilas dos Prazeres ensaiadas em edômetros de alta pressão.

Local	Prof. (m)	σ'_{v0} (kPa)	Construção de Casagrande		Método simplificado		Método de Butterfield	
			σ'_p (kPa)	OCR	σ'_p (kPa)	OCR	σ'_p (kPa)	OCR
Túnel do Término	12,9	230	1098	4,8	1350	5,9	1675	7,3
	14,0	240	1378	5,7	1371	5,7	1345	5,6
	20,0	300	1320	4,4	2000	6,7	2530	8,4
	24,7	350	1593	4,6	1910	5,5	1650	4,7
	31,0	410	2024	4,9	2268	5,5	1612	3,9
Av. da Liberdade	8,0	132	880	6,7	1110	8,4	926	7,0
Praça do Saldanha	8,0	160	1026	6,4	915,7	5,7	931	5,8
Av. da República	8,5	123	1185	9,6	1170	9,5	1337	10,9
Poço Rua Ivens	36,5	590	3227	3,0	5227	3,1	3275	3,6
	37,5	645	1758	4,4	1816	4,3	2140	4,8
	40,0	635	2845	5,1	2754	8,2	3125	5,9
Av. Visconde Valmor	4,0	80	1127	14,1	856	10,7	1245	15,6
	4,0	80	1218,6	15,2	600	7,5	1278	16,0
	4,0	80	1369	17,1	1182	14,8	1477	18,3

A Figura 9 mostra os valores do grau de sobreconsolidação obtidos com os três métodos e a tracejado a linha que representa a média dos valores encontrados e sua evolução em profundidade. Note-se que os valores elevados para o grau de sobreconsolidação estão relacionados com a história geológica desta unidade, associada ao primeiro ciclo deposicional (Aquitânico) que compreende ciclos de erosão e deposição fruto de oscilações no nível médio das águas do mar (Zbyszewski, 1964; Moitinho de Almeida, 1986; Pais, 2004; Pais et al., 2006). Com efeito, em algumas zonas da cidade de Lisboa a espessura das camadas erodidas foi muito significativa, pelo que o grau de sobreconsolidação será mais elevado nos níveis mais superficiais. Nestes níveis é provável a existência de elevada sucção, pelo que as tensões efetivas iniciais serão substancialmente maiores do que as que correspondem às tensões verticais geostáticas, conduzindo a maiores valores de OCR. Efetivamente os resultados obtidos para as amostras do campo experimental, onde as Camadas dos Prazeres surgem a uma profundidade baixa, são mais elevados do que o restante conjunto.

Apesar de não se dispor de valores para as Argilas do Forno do Tijolo, a história geológica aponta para graus de sobreconsolidação que poderão ser ligeiramente inferiores, dado esta unidade ter sido depositada durante o Burdigaliano, sujeita a uma série de avanços e retrocessos do nível da água do mar.

4.3 – Parâmetros de consolidação

A partir do conhecimento da curva que relaciona a variação do assentamento com o tempo, é possível determinar o coeficiente de consolidação do solo (c_v), através da aplicação do método de Taylor (Taylor, 1948), ou do método de Casagrande (Casagrande & Fadum, 1940). Dos ensaios

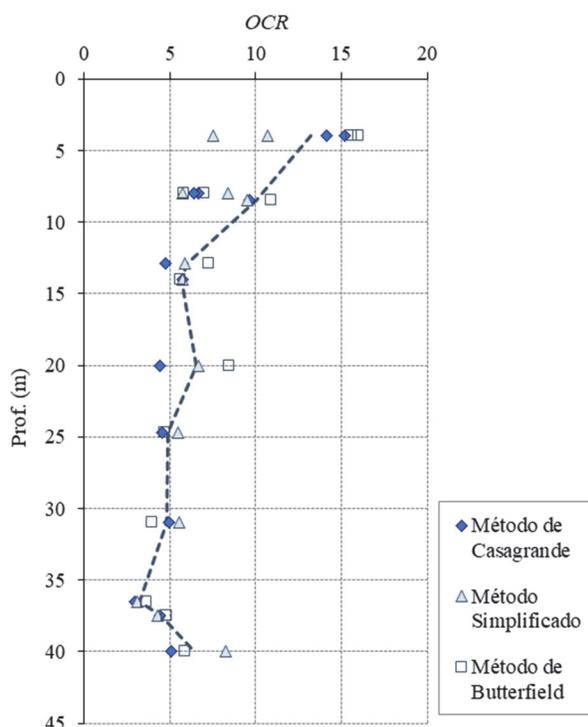


Fig. 9 - Grau de sobreconsolidação de amostras das Argilas dos Prazeres, considerando diferentes métodos de avaliação da tensão de pré-consolidação, ensaiadas em edômetros de alta pressão.

tratados no âmbito deste trabalho, verificou-se que os resultados obtidos pelo método de Taylor foram em geral superiores aos de Casagrande. Importa acrescentar que a interpretação pelo método de Casagrande foi menos rigorosa, uma vez que a forma das curvas Δ_h vs. $\log(t)$ nem sempre se aproximou da forma da curva teórica. Por este motivo, o método de Taylor foi preferido, pelo que os valores que em seguida se apresentam se referem à sua aplicação.

A Figura 10a) ilustra os valores de c_v obtidos para o escalão de carga imediatamente acima da tensão efetiva vertical *in situ*. Dos resultados disponíveis, excluiu-se um, que corresponde a uma amostra recolhida a 24,7 m de profundidade, que na Classificação Unificada corresponde a um solo mais grosso, pelo que o valor de c_v se apresenta consideravelmente mais elevado. Verifica-se que o coeficiente de consolidação para a tensão *in situ* nas Argilas dos Prazeres varia num intervalo estreito, sendo igual a $2,19 (\pm 1,7) * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Os valores do coeficiente de consolidação para o ramo virgem estão ilustrados na Figura 10b). Pode verificar-se que este parâmetro aumenta ligeiramente em praticamente todos os casos, excetuando o caso já referido da amostra do túnel do Término classificada como solo grosso, e para a qual o valor de c_v no ramo virgem é cerca de três vezes menor do que para a tensão *in situ*. Relativamente à amostra recolhida na Praça do Saldanha, os resultados mostram que o coeficiente de consolidação no ramo virgem é cerca de cinco vezes superior ao correspondente à tensão vertical de repouso.

Uma observação qualitativa dos elementos tratados sugere que, de um modo geral, o valor do coeficiente de consolidação primária (c_v) tende a aumentar com o aumento da tensão vertical, atingindo os valores mais elevados para tensões próximas da tensão de pré-consolidação, começando a diminuir ligeiramente após σ'_p , e estabilizando para os escalões mais altos, ou seja, em ramo virgem.

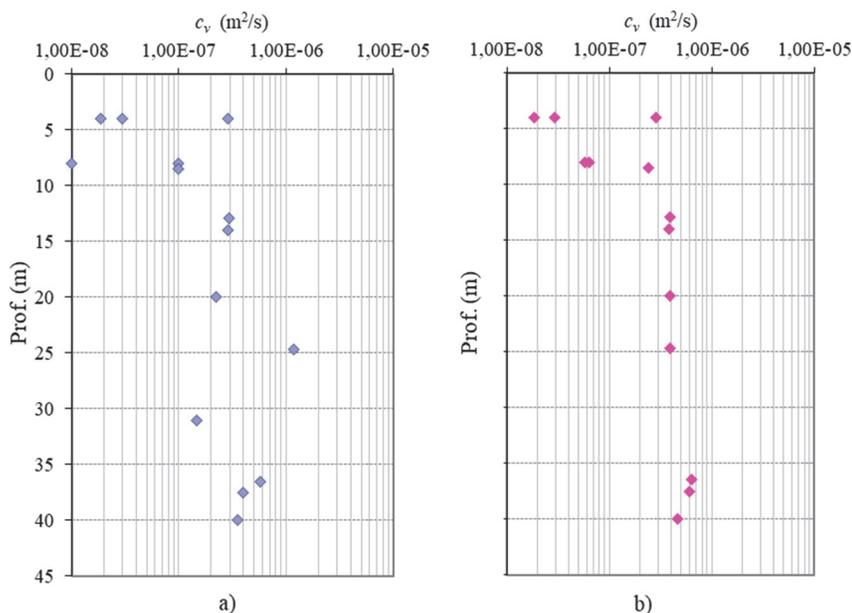


Fig. 10 - Coeficiente de consolidação de amostras das Argilas dos Prazeres ensaiadas em edômetros de alta pressão: a) escalão de carga imediatamente acima da tensão vertical *in situ*; b) ramo virgem.

Relativamente ao coeficiente de permeabilidade vertical (k), partindo do conhecimento do coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v) e do coeficiente de consolidação (c_v) para todos os escalões de carga dos ensaios, pode ser determinado pela equação:

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (3)$$

Na Figura 11 mostra-se os resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade, para o escalão de carga imediatamente acima da tensão vertical *in situ* e para o ramo virgem. Pode observar-se que este coeficiente varia entre $1,5 \cdot 10^{-11}$ m/s e $4 \cdot 10^{-10}$ m/s, valores que correspondem a solos com permeabilidade muito baixa, e, que no ramo virgem o coeficiente de permeabilidade varia numa faixa mais estreita e diminui relativamente ao seu valor para as tensões de repouso.

Relativamente ao coeficiente de consolidação secundária (C_α), os valores obtidos são praticamente todos inferiores a 0,002, valor que corresponde a solos com compressibilidade secundária muito baixa (Das, 1997).

O Quadro 10 resume os parâmetros de consolidação obtidos para as Argilas dos Prazeres, para o escalão de carga imediatamente acima da tensão efetiva *in situ* e para o ramo virgem.

Para as Argilas do Forno do Tijolo, os resultados disponíveis, referem-se apenas a ensaios no edómetro clássico, que uma vez que não permitem reproduzir o ramo normalmente consolidado da curva de compressão, fornecem valores para os coeficientes de consolidação primária e de permeabilidade superiores aos que efetivamente caracterizam estes solos. No entanto, a comparação dos resultados de ensaios nas mesmas condições para estas e para as Argilas dos Prazeres, permite verificar que, de uma maneira geral, as amostras das Argilas do Forno do Tijolo terão maior coeficiente de consolidação primária e maior coeficiente de permeabilidade do que as amostras das Argilas dos Prazeres. O facto de serem solos com menor atividade do que as Argilas dos Prazeres corrobora esta observação.

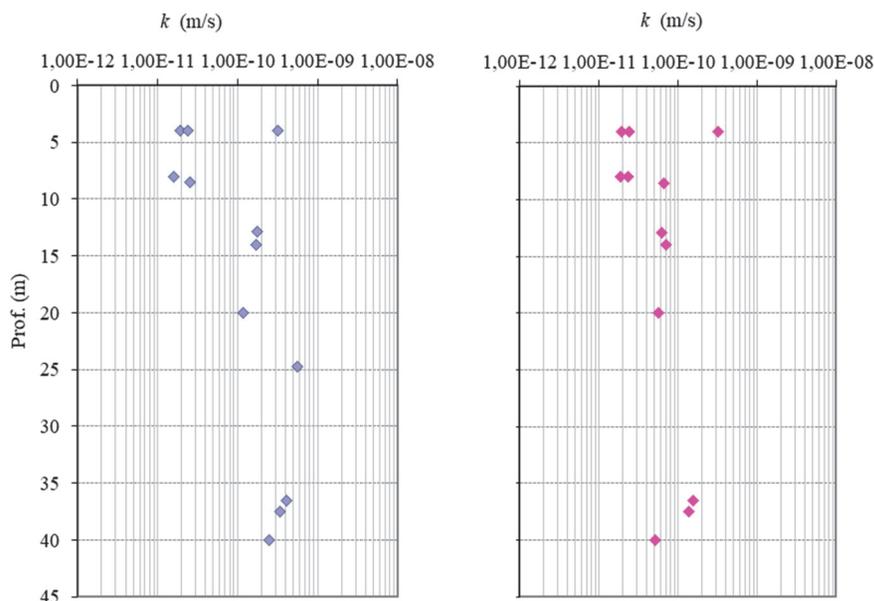


Fig. 11 - Coeficiente de permeabilidade de amostras das Argilas dos Prazeres ensaiadas em edômetros de alta pressão: a) escalão de carga imediatamente acima da tensão vertical *in situ*; b) ramo virgem.

Quadro 10 - Parâmetros de consolidação de amostras das Argilas dos Prazeres ensaiadas em edômetros de alta pressão.

Local	Prof. (m)	$c_v \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$		C_α	$k \times 10^{-10} (\text{m/s})$	
		Escalão de carga imediatamente acima da tensão <i>in situ</i>	Ramo virgem		Escalão de carga imediatamente acima da tensão <i>in situ</i>	Ramo virgem
Túnel do Término	12,9	2,91	3,89	0,0017	1,79	0,62
	14,0	2,87	3,86	0,00151	1,73	0,71
	20,0	2,21	3,89	0,00108	1,18	0,57
	24,7	11,8	3,88	-	5,66	-
	31,0	1,48	-	0,00149	1,58	-
Av. da Liberdade	8,0	0,1	0,57	< 0,001	0,02	0,23
Praça do Saldanha	8,0	1,00	0,63	< 0,001	0,16	0,19
Av. da República	8,5	1,00	2,39	< 0,001	0,26	0,66
Poço Rua Ivens	36,5	5,68	6,01	0,0010	4,06	0,15
	37,5	3,93	6,39	0,0018	3,42	1,44
	40,0	3,52	4,60	0,0021	2,52	0,52
Av. Visconde Valmor	4,0	3,40	2,89	-	6,68	0,19
	4,0	0,23	0,19	-	16,02	3,18
	4,0	0,11	0,29	-	26,50	2,24
Valor médio (\pm desvio padrão)					5,8 (\pm 7,34)	0,89 (\pm 0,84)

5 – CONCLUSÕES

Os resultados apresentados resultam de uma cuidada e rigorosa análise de elementos disponíveis relativos às características físicas e aos parâmetros de compressibilidade e consolidação das formações Argilas dos Prazeres e Argilas do Forno do Tijolo. Pretendeu-se com este trabalho fundamentalmente contribuir para o conhecimento destas importantes formações pela comunidade geotécnica, e fornecer aos projetistas elementos com utilidade para as suas análises e modelações.

No que se refere à granulometria e aos índices físicos, o elevado número de resultados analisados para cada formação permite estabelecer tendências e gamas de variação com boa representatividade.

O estudo da composição granulométrica mostra que estas formações são predominantemente siltosas com percentagens de areia variáveis, mas sempre inferiores a 20 %. O teor em água é sensivelmente constante em profundidade e próximo do limite de plasticidade, pelo que estamos perante solos duros. A fração fina classifica-se na maior parte dos casos como argila magra ou silte. Trata-se de solos pouco ativos ou com atividade normal, sendo as Argilas do Forno do Tijolo menos plásticas do que as Argilas dos Prazeres, e consequentemente com menor atividade. Os valores médios dos índices físicos são muito semelhantes para as duas unidades em análise.

No que respeita aos parâmetros de compressibilidade e consolidação, apesar de o número de elementos disponíveis ser bastante menor, os resultados foram bastante consistentes. O índice de compressibilidade das Argilas dos Prazeres, obtido em ensaios realizados com edómetros de alta pressão, foi de 0,27 e pode ser considerado representativo desta unidade. Também a razão $C_c/(1+e_0)$ exibiu bastante coerência para todos os locais.

O grau de sobreconsolidação médio obtido para elementos disponíveis vale cerca de 7,0, embora nas camadas mais superficiais se tenham registado valores superiores, o que pode ser atribuído à existência de sucção.

6 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente realizado no âmbito do projeto PTDC/ECM/64167/2006, e parcialmente financiado pela FCT no âmbito do programa SFRH/PROTEC/49805/2009. Os autores desejam expressar o seu agradecimento às várias empresas e outras entidades que gentilmente concederam acesso às suas bases de dados, nomeadamente, Teixeira Duarte, Ferconsult, Geocontrolo, Tecnasol FGE, Geotest, Mota-Engil, LNEC e Metropolitano de Lisboa.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bagheri, M.; Rezania, M. (2021). *Geological and Geotechnical Characteristics of London Clay from the Isle of Sheppey*. Geotechnical and Geological Engineering 39 (2), pp. 1701-1713. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01572-3>
- Butterfield, R. (1979). *A natural compression law for soils (an advance on e-log p')*. Géotechnique 29 (4), pp. 469–480. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.469>
- Casagrande, A. (1936). *The determination of the preconsolidation load and its practical significance*. 1st Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge.
- Casagrande, A.; Fadum, R. E. (1940). *Notes on soil testing for engineering purposes*. Harvard University Graduate School Engineering Publication (8).
- Cotecchia, F. (2002). *Mechanical Behaviour of the stiff clays from Montemesola Basin in relation to their geological history and structure*. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore, A.A. Balkema.

- Cotecchia, F.; Cafaro, F.; Aresta, B. (2007). *Structure and mechanical response of sub-Apennine Blue Clays in relation to their geological and recent loading history*. *Géotechnique* 57 (2), pp. 167-180. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.2.167>
- Cui, Y. J.; Nguyen, X. P.; Tang, A. M.; Li, X. L. (2013). *An insight into the unloading/reloading loops on the compression curve of natural stiff clays*. *Applied Clay Science* 83-84: 343-348. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.003>
- Das, B. M. (1997). *Advanced Soil Mechanics*. Washington D.C., Taylor & Francis.
- Figueiredo, S. (2009). Comunicação pessoal.
- Gasparre, A. (2005). *Advanced Laboratory Characterization of London Clay*. PhD, Imperial College of London.
- Guglielmi, S.; Cotecchia, F.; Cafaro, F.; Gens, A. (2022). *Analysis of the micro to macro response of clays to compression*. *Géotechnique* 74 (2), pp. 1-46. <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00233>
- Josseume, H.; Hieng, I.; Stemplelet, J. P. (1991). *Détermination des paramètres de compressibilité d'une argile raide à partir d'essais oedométriques à haute pression*. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 172, pp. 109-120.
- Lopes Laranjo, M. (2013). *Argilas Miocénicas de Lisboa. Parametrização para o Dimensionamento de Estruturas Geotécnicas*. Tese para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Porto.
- Marques, F. (1998). *Análise do comportamento de um túnel aberto nas formações Miocénicas de Lisboa*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, especialidade de Mecânica dos Solos e Rochas, Universidade de Coimbra.
- Matildes, R.; Almeida, I. M.; Taborda, R.; Marques, F. (2011). *The contribution of GeoSIS_Lx database and geoscientific information system to the reconstruction of Lisbon's coastline*. *Journal of Coastal Research*, pp. 1702-1706. <http://www.jstor.org/stable/26482466>
- Mayne, P. W. (1988). *Determining OCR in Clays from Laboratory Strength*. *Journal of Geotechnical Engineering* 114 (1), pp. 76-92. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:1\(76\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:1(76))
- Moitinho de Almeida, F. (1986). *Carta Geológica do Concelho de Lisboa*. S. G. d. Portugal, Serviços Geológicos de Portugal.
- Moitinho de Almeida, I. (1991). *Características geotécnicas dos solos de Lisboa*. Tese para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia, Universidade de Lisboa.
- Pais, J. (2004). *The Neogene of the Lower Tagus Basin (Portugal)*. *Revista Española de Paleontología*, 19 (2), 229-242. <https://doi.org/10.7203/sjp.19.2.20534>
- Pais, J.; Moniz, C.; Cabral, J.; Cardoso, J. L.; Legoinha, P.; Machado, S.; Morais, M. A.; Lourenço, C.; Ribeiro, M. L.; Henriques, P.; Falé, P. (2006). *Carta Geológica de Portugal, Notícia explicativa da Folha 34D Lisboa*. T. e. I. Instituto Nacional de Engenharia. Lisboa, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.
- Pedro, A. (2013). *Geotechnical investigation of Ivens shaft in Lisbon*, Ph.D. Thesis, Imperial College London.
- Schmertmann, J. H. (1955). *The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay*. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 120 (1), pp. 1201-1227. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007231>

Sridharan, A.; Abraham, B. M.; Jose, B. T. (1991). *Improved technique for estimation of preconsolidation pressure*. *Géotechnique* 41 (2), pp. 263-268.
<https://doi.org/10.1680/geot.1991.41.2.263>

Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York, John Wiley & Sons.

Zbyszewski, G. (1964). *Carta Geológica dos Arredores de Lisboa, Notícia Explicativa da Folha 2 - Loures*. S. G. d. Portugal. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal.