

ASSENTAMENTOS DE ARGILAS FORTEMENTE SOBRECONSOLIDADAS*

Settlements of heavily over-consolidated clays

por
JOSÉ FOLQUE**

RESUMO — Os assentamentos "secundários" de argilas, isto é, os assentamentos que se processam devido a deformações predominantemente volumétricas ocorrentes sob tensão constante, foram estudados com alguma profundidade em trabalho de Folque (1961). O comportamento de certas argilas terciárias, fortemente consolidadas, leva a pensar, por analogia, que os assentamentos nelas processados são predominantemente "secundários". Estes factos e as suas repercussões no dimensionamento de fundações são comentados neste artigo.

SYNOPSIS — "Secondary" settlements of clays, i. e., settlements due to volumetric changes of the soil when subjected to constant effective stress, were studied in some detail in a previous work (Folque, 1961). Some tertiary over-consolidated clays seem to present analogous behaviour, with settlements mainly of the "secondary" type. This matter and its influence on the design of foundations is presented and discussed.

1 — INTRODUÇÃO

As deformações volumétricas de solos não-saturados que têm origem num estado de tensão constante no tempo foram estudadas com algum pormenor no trabalho do autor "Reologia de solos não-saturados" (1961) e voltam a ser apresentadas no trabalho "Reologia de Solos", actualmente em impressão.

Interessa, para apresentar num resumo desses estudos e principais conclusões que deles foi possível tirar, começar por recordar certos conceitos fundamentais.

Seja uma camada de argila de espessura h e sujeita a uma tensão, σ , uniforme e constante. O assentamento da camada evoluirá no tempo de acordo com

$$\delta = \delta_i + \delta_h(h, t) + \delta_s(t) \quad (1)$$

em que

δ_i — assentamento imediato

δ_h — assentamento hidrodinâmico, obviamente função de h pois o seu processamento deve-se a expulsão de água dos poros, expulsão determinada por excesso de pressão neutra sobre a pressão hidrostática e que se dá ao longo de trajectos que evidentemente dependem de h .

δ_s — assentamento "secundário" devido a deformação do "esqueleto" sólido da argila para tensão constante.

* Trabalho recebido em Outubro de 1987. A discussão de trabalho está aberta por um período de três meses.

** Especialista em Geotecnia (OE). Investigador-Coordenador (LNEC).

2 — ESTUDO REOLÓGICO DA DEFORMAÇÃO A $\sigma = Ct$.

Para estudar a função $\delta_s(t)$, como consta de Folque (1961), foram estudadas amostras de argilas não-saturadas. Não se desenvolvendo, devido à não-saturação, pressões de água nos poros, o termo $\delta_h(h, t)$ de (1) anula-se e assim vem

$$\delta = \delta_i + \delta_s(t) \quad (2)$$

Para dar suporte reológico ao desenvolvimento do estudo de (2) propôs-se o modelo analógico representado na Fig. 1.

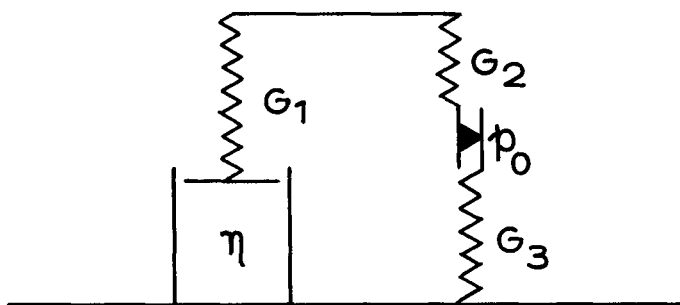


Fig. 1

Para um processo a $\sigma = \text{const.}$ tomando por base o modelo da Fig. 1, demonstra-se que a extensão volumétrica, \mathcal{E}_v , é dada por

$$\exp(-\eta k_1/k_3) = \frac{k_1 \mathcal{E}_v + k_2 - \sigma}{k_1 [\mathcal{E}_v]_0 + k_2 - \sigma} \quad (3)$$

em que

$$k_1 = G_2 G_3 / (G_2 + G_3)$$

$$k_2 = G_2 p_0 / (G_2 + G_3)$$

$$k_3 = 1 - k_1 / G_1$$

Ensaio efectuados para $\sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$ deram, em média, resultados que estão apresentados na Fig. 2.

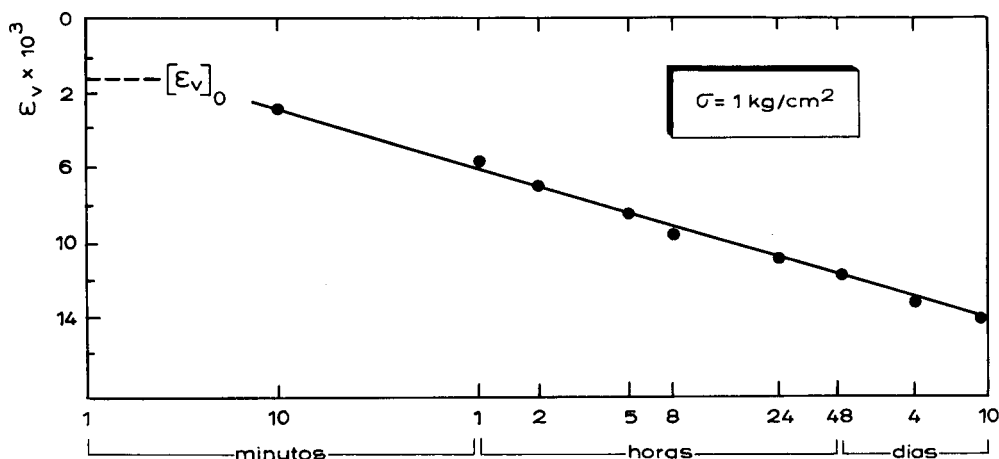


Fig. 2

O ajuste da expressão (3) à curva experimental mostra realmente que o processo reológico não é linear, que os parâmetros η e GG não são constantes. Sobretudo η é fortemente dependente de ϵ_v , como de resto é até intuitivo. Para tornar possível o ajuste de (3) aos resultados experimentais foi necessário tomar um coeficiente de viscosidade variável, com a forma

$$\eta = [\eta]_0 + \alpha_1 \sigma (1 - e^{-\alpha_2 \epsilon_v}) \quad (4)$$

em que

$$\begin{aligned} [\eta]_0 &= 10 \text{ kg.min/cm}^2 \\ \alpha_1 &= 10^5 \\ \alpha_2 &= 15 \times 10^4 \end{aligned}$$

É óbvio que fazer depender η de t é um simples artifício de "mediação". O que tem sentido físico é que η dependa da extensão volumétrica ϵ_v . E, como ϵ_v depende de t , por sua interposição torna-se cómodo adoptar uma função $\eta(t)$.

O que mais interessa sublinhar acerca dos resultados encontrados é que eles vieram dar um certo conteúdo teórico, com ligação reológica a elementos estruturais, a uma lei que há muito, com base *puramente empírica*, era utilizada para relacionar os assentamentos "secundários" com o tempo. Com efeito, como na Fig. 2 se evidencia, os assentamentos "secundários" evoluem proporcionalmente a $\log t$, proposta pela primeira vez apresentada por Buisman e que nunca foi questionada.

3 — DEFORMAÇÕES A $\sigma = Ct$. DE ARGILAS TERCIÁRIAS

Durante os estudos geotécnicos das formações em que se encontra inserida a arrumação sul da Ponte sobre o Tejo foram feitos numerosos ensaios sobre amostras "bloco" colhidas nas formações argilosas aí ocorrentes. Neste artigo só interessará referir os ensaios edométricos.

Trata-se de argilas terciárias, pertencentes ao Burdigaliano, com uma compacidade muito alta, caracterizada por um índice de vazios da ordem de 1,10 com teor em água menor do que 20% e peso volúmico por volta de $1,3 \text{ g/cm}^3$.

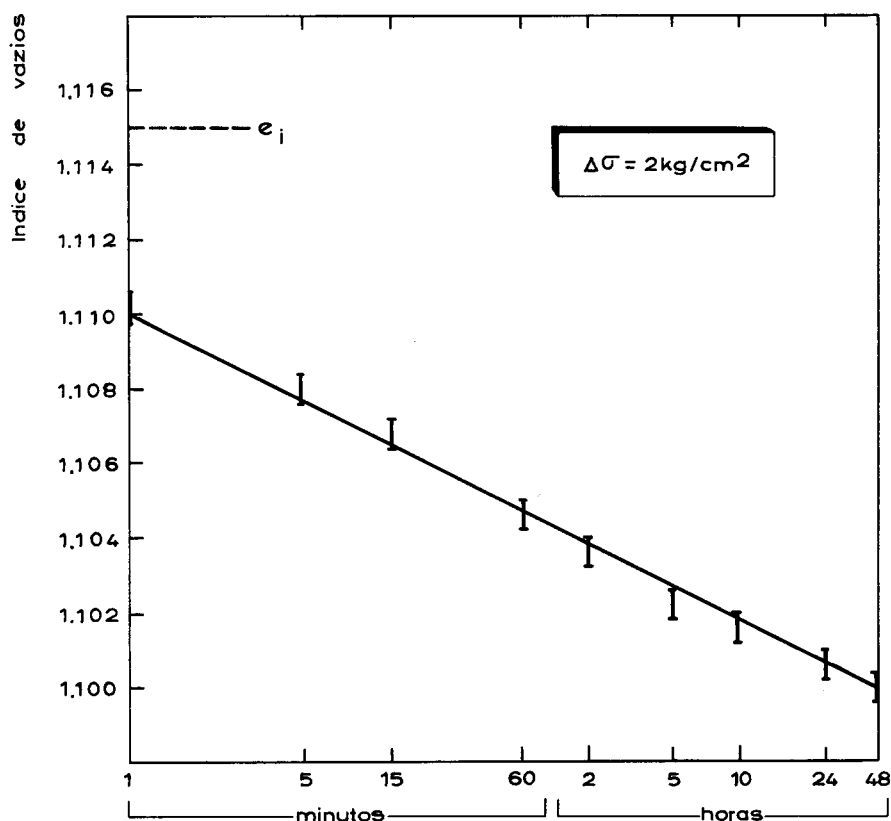


Fig. 3

A Fig. 3 apresenta, condensados, os resultados de uma série de ensaios edométricos conduzidos em amostras de duas espécies: uma correspondente a amostras com 2 cm de espessura e outra correspondente a amostras com 5 cm de espessura. Os intervalos representados para cada abcissa (tempo) contêm os resultados de 10 deformações nos edômetros de 2 cm e de 10 deformações lidas nos edômetros de 5 cm, para um escalão de carga de 2 kg/cm² aplicado sobre uma carga antecedente de 0,1 kg/cm².

A primeira, e muito interessante, conclusão a tirar é que é possível traçar uma curva *média*, com pequena *dispersão*, para representar todos os ensaios, quer os realizados com amostras de 2 cm quer os realizados com amostras de 5 cm. Por outras palavras, o andamento no tempo das deformações *parece não depender* da espessura das amostras. Este facto, ao que se adiciona o andamento semilogarítmico da curva, convida a concluir que o assentamento hidrodinâmico é irrelevante no processo de deformação destas argilas. Quer dizer, devido à elevada sobreconsolidação, com fortes tensões interparticulares instaladas e ainda atendendo à pequena dimensão de poro, toda a água intersticial estará fortemente adsorvida com altas tensões de atracção para as partículas sólidas (altas tensões neutras negativas). Insistindo um pouco mais nesta questão, é de apontar que parece realmente difícil de conceber que a consolidação de uma argila fortemente consolidada se dê de acordo com um esquema a que se

poderá chamar "terzaghiano". Com efeito, são ingredientes fundamentais do modelo de Terzaghi (e doutros posteriores mas que neste aspecto têm a mesma conformação):

- a existência de poros "espaçosos" para que neles possa haver água livre;
- a entrada desta água em sobrepressão, por acção de força exterior, em consequência de a deformabilidade da água ser muito pequena em comparação com a deformabilidade do "esqueleto" de partículas sólidas.

São estas de facto circunstâncias que conceptualmente não parece fácil coadunar com o que é de imaginar acerca da estrutura de argilas sobreconsolidadas.

Vem então, se se aceitar as considerações que atrás ficam expostas, que praticamente não haverá água livre. O processo de deformação será assim coincidente com um processo de deformação "secundária", isto é, um processo de deformação a tensão constante instalada no "esqueleto" de partículas.

Quando se estudaram as fundações do Matadouro Municipal de Lisboa, na década de 50, efectuaram-se diversos ensaios de caracterização dos solos em que o edifício se implanta. Trata-se também de argilas terciárias mas estas pertencentes ao Helveciano.

O ensaio que para este artigo interessa recordar é o que se refere a um ensaio de carga conduzido sobre sapata de prova quadrada de 1 m de lado. Os resultados estão representados na Fig. 4. O que dos resultados se afigura de particular interesse sublinhar é o andamento semilogarítmico da curva de deformações com o tempo, sugerindo que também para estas argilas o processo de deformação será predominantemente "secundário", ou melhor dizendo, com uma componente hidrodinâmica irrelevante e desprezável, por ser extremamente reduzida a sua grandeza. No caso contrário obrigaria a curva assentamentos-tempo a desviar-se acentuadamente do andamento semilogarítmico (ver a este respeito o n.º 2.3 de Folque, 1961).

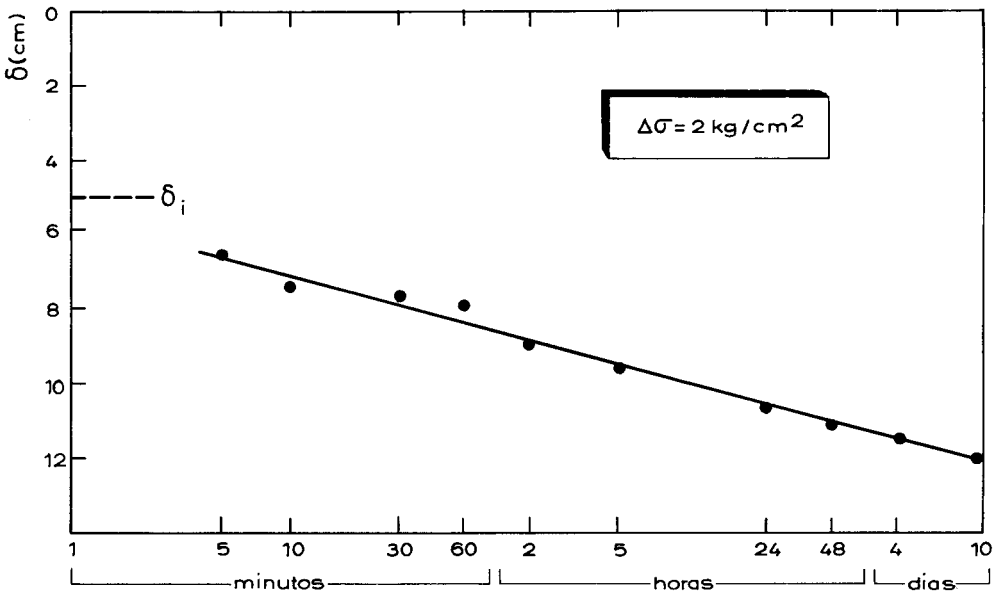


Fig. 4

4 — CONSEQUÊNCIAS NA PRÁTICA DO DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÕES

Em Lisboa, a observação de assentamentos de fundações, mesmo no que se refere a edifícios de razoável porte, tem sido completamente negligenciada. É isto claramente uma consequência da política (agora tão agravada) de estimular as especulações abstractas em detrimento das tarefas de estudo da realidade física (Portugal tem apreciável número de romancistas, ensaístas, poetas — sobretudo poetas! — de craveira mundial, mas é reduzido o número de técnicos e cientistas de igual estatura.

O autor sente responsabilidades nas negligências que em relação à observação de edifício se têm cometido. Mas, interessado em varrer o seu terreiro, muito convictamente afirma que a principal razão para a sua negligência deriva de, até agora, *não ter havido uma problemática de fundações em Lisboa*. Obviamente que esta afirmação carece de ser tratada com um pouco mais de pormenor.

Examine-se o caso de fundações em argilas terciárias (os outros casos, ou dizem respeito a fundações em estacas ou a fundações em terrenos ainda menos deformáveis do que as argilas). Tomando o exemplo de um edifício fundado em sapatas de 2×2 m transmitindo uma tensão de 4 kg/cm^2 ao solo de fundação, virá que o seu assentamento a longo prazo poderá estimar-se como a seguir se aponta: sob a sapata, na camada de espessura aproximadamente $h = 1,5 \times 2 = 300 \text{ cm}$ incidirá um acréscimo médio de tensão $\Delta\sigma = 2 \text{ kg/cm}^2$; o exame da Fig. 3 mostra que se poderá contar com um decréscimo de índice de vazios $\Delta e = 0,05$ para um tempo muito longo, que se poderá tomar como "longo prazo" (excluindo, claro está, o assentamento imediato, a que corresponde Δe_i , pois esse processar-se-á durante a construção); ora para $\Delta e = 0,05$ ter-se-á $a_v = 0,025$; e para a mencionada espessura h virá um assentamento a longo prazo dado por

$$\delta = h \cdot \Delta\sigma \cdot a_v (1 + e_0)$$

sendo e_0 o índice de vazios inicial, que se poderá tomar com o valor 1,1; operando conclui-se que $\delta = 7 \text{ cm}$.

Tendo em atenção que este assentamento se processa a longo prazo é de sublinhar que ele é francamente pequeno. Para quem não tenha muito convívio com estes problemas lembra-se que, por exemplo, as especificações soviéticas consideram, para estruturas aporticadas, assentamentos até 10 cm como plenamente aceitáveis, sem qualquer reserva.

O que acaba de ser dito, e que decorre da análise do comportamento de um edifício fundado em sapatas de 2×2 m, adquire aspectos muito diferentes para o caso, que corresponde à tendência actual na área urbana de Lisboa (a cidade das Torres!), de se vir a construir edifícios de altura apreciável. Um edifício de 30 ou 40 pisos transmitirá à fundação tensões médias de 4 kg/cm^2 . Supondo, por exemplo, um edifício com 20 m de largura, virá que ele transmite, a uma camada de solo de espessura $h = 1,5 \times 2000 = 3000 \text{ cm}$ a tensão média de 2 kg/cm^2 . E então, comparando com as contas feitas para o caso da sapata com 2 m de lado, imediatamente se conclui que o seu assentamento previsível será de 70 cm! Já é um assentamento relevante.

De tudo o que fica dito é de concluir que a atitude de encarar estes problemas com certa ligeireza, ligeireza sobretudo no que se refere a uma certa negligência relacionada com a observação dos assentamentos reais dos edifícios, é atitude que tem agora de ser abandonada. A cidade das Torres para que se caminha exige maiores cuidados no dimensionamento de fundações, previsão do seu comportamento e observação da conformidade (ou não-conformidade) do observado com o previsto.

ERRATA (Geotecnia n.º 53)

| Página | Linha | Onde se lê | Deve ler-se |
|--------|--------------------|------------|-------------|
| 3 | penúltima | al | tal |
| 4 | 21 | entreviu | entrevisto |
| 16 | 16 | sd | se |
| 30 | legenda da Fig. 17 | Hoeck | Hoek |
| 53 | 21 | arrumação | amarração |
| 52 | última | 1,3 | 1,8 |
| 54 | 4 | endómetro | edómetro |
| 56 | 2 | refre | refere |
| 57 | 8 | edifício | edifícios |
| 57 | 18 | 2 | 200 |
| 57 | última | obcervado | observado |
| 70 | 12 | etre | entre |
| 70 | 5.ª do final | 1973 | 1983 |
| 82 | 12 | Fig. 6 | Fig. 5 |
| 82 | 16 | odreno | o dreno |
| 84 | 7.ª do final | tabém | também |