UTILIZAÇÃO DE PRÉ-CARGA PARA ATENUAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS POR CONSOLIDAÇÃO SECUNDÁRIA – ANÁLISE LABORATORIAL

MITIGATION OF SECONDARY CONSOLIDATION SETTLEMENTS BY PRELOADING – LABORATORIAL ANALYSIS

Mira, Emanuela S. P., *Ferbritas, Lisboa, Portugal, emanuela_mira@hotmail.com*
Venda Oliveira, Paulo J., *FCTUC, Coimbra, Portugal, pjvo@dec.uc.pt*
Correia, António A. S., *FCTUC, Coimbra, Portugal, aalberto@dec.uc.pt*

RESUMO

Devido às suas características de resistência e compressibilidade, a construção de infra-estruturas sobre solos moles torna-se extremamente problemática. A matéria orgânica presente na sua constituição prolonga a ocorrência de assentamentos muito para além da consolidação primária, num fenómeno apelidado de consolidação secundária (fluência). Uma das técnicas mais utilizadas para atenuar estes assentamentos consiste na aplicação de uma sobrecarga temporária sobre o aterro, correntemente designada de pré-carga. Para avaliar a eficácia deste método efectuou-se uma análise laboratorial com amostras reconstituídas do solo mole do Baixo Mondego, que contemplou a realização de ensaios edométricos com vista a determinar em que medida a aplicação de pré-carga minimiza os assentamentos induzidos pelo fenómeno de fluência. Em paralelo analisou-se a influência do nível de pré-carga na eficiência do método.

ABSTRACT

Due to its resistance and compressibility characteristics, the construction of infrastructures on soft soils becomes highly complex. The organic matter usually present in their constitution extends settlements beyond primary consolidation, even under constant load, in a phenomenon named secondary consolidation (creep). One of the most used techniques to control these displacements consists on the application over the embankment of a temporary surcharge, currently designated as preloading. The efficiency of this method was tested in a laboratorial analysis with reconstituted samples from Baixo Mondego soft soil. To evaluate the secondary consolidation, oedometer tests were developed so that it was possible to determine in what way the application of preloading decreases settlements, as well as the influence of distinct magnitudes of preloading.

1. INTRODUÇÃO

A elevada compressibilidade e baixa resistência que caracterizam os solos moles traduzem-se em sérios problemas ao nível dos assentamentos e da estabilidade das infra-estruturas sobre eles construídas. A sua baixa permeabilidade, a grande superfície específica das partículas que os constituem e o elevado teor em matéria orgânica são algumas das agravantes a adicionar a solos já intrinsecamente muito problemáticos.

Tendo em conta as características mencionadas é de prever que a aplicação de uma carga sobre estes solos origine assentamentos bastante elevados durante a fase de consolidação primária,

continuando estes a progredir muito para além desta, num processo a que se dá o nome de consolidação secundária ou fluência.

Existem várias técnicas que reduzem ou aceleram eficazmente os assentamentos por consolidação primária, mas que por vezes são incapazes de atenuar os assentamentos por consolidação secundária. Esta é claramente uma situação a evitar, não só pela magnitude que podem atingir estes assentamentos, mas porque ocorrem já na fase de serviço da obra, aumentando os custos de manutenção e comprometendo o bom aproveitamento da infra-estrutura. Um dos métodos possíveis para contornar este problema é a aplicação de uma carga temporária (pré-carga) sobre o solo, que permite antecipar os assentamentos induzidos pela consolidação secundária, para que deles não resultem danos tão gravosos a longo prazo.

2. MECANISMO ASSOCIADO À PRÉ-CARGA

A pré-carga consiste em sujeitar temporariamente o solo a uma solicitação superior àquela que a estrutura definitiva transmitirá. De acordo com Alonso et al. (2000), a aplicação de pré-carga permite controlar tanto os assentamentos por consolidação primária como os devidos à consolidação secundária.

A Figura 1 ilustra o modo como a aplicação da pré-carga acelera os assentamentos por consolidação primária. Sucintamente, o método baseia-se no facto do tempo de consolidação de uma dada camada de solo ser independente do nível de carga aplicado. Assim, com a aplicação de um acréscimo de tensão $\Delta\sigma_{apl}$ obtém-se a evolução ΔH-t (1), a que corresponde o assentamento final s_1, enquanto que um nível de carga superior, por exemplo devido à adição de uma pré-carga, origina uma evolução traduzida pela curva (2). Ora, se a solicitação correspondente à pré-carga $\Delta\sigma_{pré\text{-}carga}$ for retirada no instante t_1, já se alcançou o assentamento, s_1, que corresponde à situação final do caso (1), obtendo-se desta forma a antecipação dos assentamentos finais.

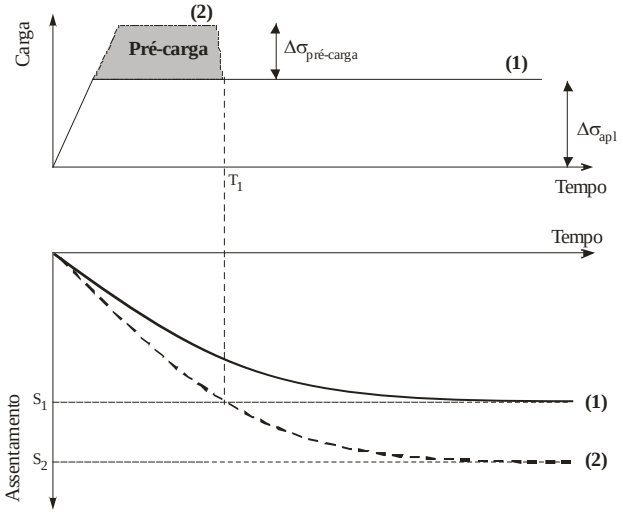

Figura 1 – Método de Funcionamento da Pré-carga (Venda Oliveira, 2008)

O efeito da pré-carga em termos de consolidação secundária é baseado em Taylor (1942) e Bjerrum (1967), que estabeleceram que o comportamento de um material, durante a consolidação secundária, é descrito por um sistema de curvas paralelas entre si, representando cada uma delas uma relação entre o índice de vazios e a tensão efectiva para um dado tempo de

aplicação de carga. A Figura 2 ilustra o mecanismo de atenuação da fluência (consolidação secundária) associado à aplicação de uma pré-carga. Supondo um ponto A, correspondente a um estado normalmente consolidado, sobre o qual se aplica um acréscimo de carga $\Delta\sigma_{apl}$ ($=\Delta\sigma'_{apl}$) que se mantém durante um determinado tempo t_1, a trajectória correspondente é ABD, referindo-se o ramo BD à deformação por fluência. Se adicionalmente com o acréscimo de carga $\Delta\sigma_{apl}$ for aplicada uma pré-carga $\Delta\sigma_{pré\text{-}carga}$ ($=\Delta\sigma'_{pré\text{-}carga}$) a qual será removida após o término da consolidação primária, obtém-se a trajectória ABCD. Neste caso, o ponto final D encontra-se num estado sobreconsolidado, equivalendo a um tempo de fluência mais avançado, t_1 (sendo no caso da Figura 2, t_1=10 anos). Portanto, esta metodologia permite antecipar as deformações por fluência que teriam ocorrido até ao instante t_1 (correspondendo na Figura 2, t_1=10 anos). Naturalmente, quanto maior for o nível de pré-carga, maior será o efeito em termos de atenuação dos assentamentos por fluência.

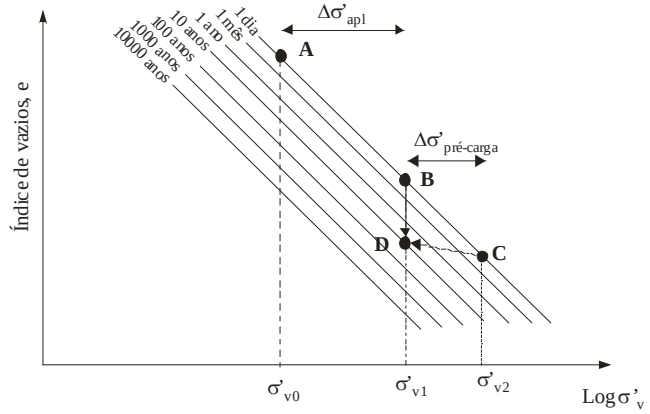

Figura 2 – Modelo de Bjerrum (1967)

3. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Tendo em consideração que a obtenção dos objectivos deste trabalho pressupunha a utilização de provetes homogéneos, optou-se por utilizar amostras reconstituídas, eliminando desta forma toda a variabilidade inerente à utilização de amostras "intactas".

Sucintamente, a preparação de amostras reconstituídas consiste na elaboração de uma mistura homogénea a partir de solo recolhido in situ, que posteriormente se sujeita a ciclos de carga numa tentativa de simular o processo natural de sedimentação. O processo utilizado consistiu em adicionar ao solo uma quantidade de água destilada correspondente a um índice de liquidez de cerca de 1,5, promovendo-se a destruição da estrutura do solo natural. O processo de sedimentação foi simulado num edómetro de grandes dimensões (230 mm de diâmetro e 300 mm de altura) disponível no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra, através da aplicação de níveis crescentes de carga, até uma tensão vertical efectiva de aproximadamente 48 kPa, simulando o estado de tensão existente a cerca de 10 metros de profundidade no depósito de solo mole do Baixo Mondego. Todas as amostras utilizadas nos edómetros foram retiradas do mesmo provete reconstituído, garantindo-se desta forma a sua homogeneidade.

4. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO

No Quadro 1 são apresentados os resultados dos ensaios de identificação do solo mole do Baixo Mondego. Em termos gerais, trata-se de um solo, fundamentalmente siltoso, com uma elevada percentagem do teor em matéria orgânica (7,4%), que lhe confere um reduzido peso volúmico, e

uma grande capacidade de absorção de água (w_{nat} = 80%). Naturalmente estas condições traduzem-se em baixa resistência ao corte, em termos não drenados, elevada compressibilidade e na existência de apreciáveis deformações por fluência (consolidação secundária).

Quadro 1 – Caracterização Geotécnica do Solo Mole do Baixo Mondego (Mira, 2008)

Características do solo	Mira (2008)
Teor em água natural (w_{nat})	80%
Densidade das partículas sólidas (G)	2,58
Peso volúmico (γ)	14,8 kN/m^3
Teor em matéria orgânica (OM)	7,4%
Composição Granulométrica:	
Argila	17%
Silte	65%
Areia	18%
Limites de Consistência:	
Limite de liquidez (w_L)	77,4%
Limite de plasticidade (w_P)	50%
Índice de plasticidade (IP)	27,4%
Índice de liquidez (IL)	1,09

O estudo da compressibilidade do solo foi efectuado num edómetro de dimensões tradicionais (70 mm de diâmetro e 19 mm de espessura) de acordo com o procedimento habitual, descrito no Quadro 2. Assim, a sequência de carregamento traduziu-se num aumento para o dobro do peso anteriormente aplicado, mantido até que ocorresse a total dissipação das pressões intersticiais, sendo usual conservar a carga por um período de 24 horas (Coelho, 2000).

Quadro 2- Escalões de Carga do Ensaio Edométrico

Escalão de carga	σ'_v (kPa)	t (h)*
PT*	1,51	24
PT + 0,5 kg	14,02	24
PT + 1 kg	26,54	24
PT + 2 kg	51,57	24
PT + 4 kg	101,64	24
PT + 8 kg	201,76	24
PT + 2 kg	49,99	24
PT + 0,5 kg	12,44	24
PT + 2 kg	49,99	24
PT + 10 kg	250,25	24
PT + 18 kg	450,50	24
PT + 34 kg	851,02	24
PT + 10 kg	250,25	24
PT + 2 kg	49,99	24
PT + 0,5 kg	12,44	24
PT	1,51	24

(*)PT = Placa de topo; t = Duração do escalão de carga

A partir da variação de espessura da amostra no tempo definiu-se para cada escalão de carga o respectivo coeficiente de consolidação, c_v, através do método de Taylor. Na Figura 3 são apresentados os valores obtidos em função do nível de tensão aplicada. Constata-se a existência de c_v elevados (entre 15 e 30 m^2/ano) que traduzem naturalmente a predominância silto-arenosa da composição do solo.

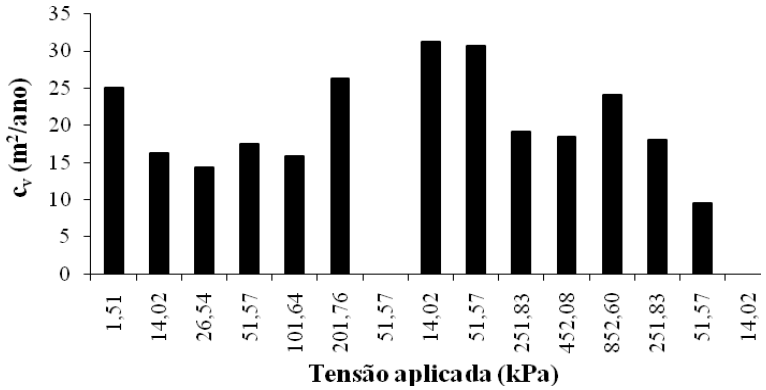

Figura 3 – Evolução do c_v em Função da Tensão Aplicada (Mira, 2008)

A representação da variação do índice de vazios com o logaritmo da tensão efectiva (Figura 4), permite definir os índices de compressibilidade e de recompressibilidade, C_c e C_r , tendo-se obtido os valores de 0,51 e de 0,10, respectivamente. De acordo com Coelho (2000), estes elevados valores de compressibilidade, não são coerentes com a reduzida percentagem da fracção argilosa constituinte do solo, mas, fundamentalmente reflectem a influência da elevada percentagem de matéria orgânica.

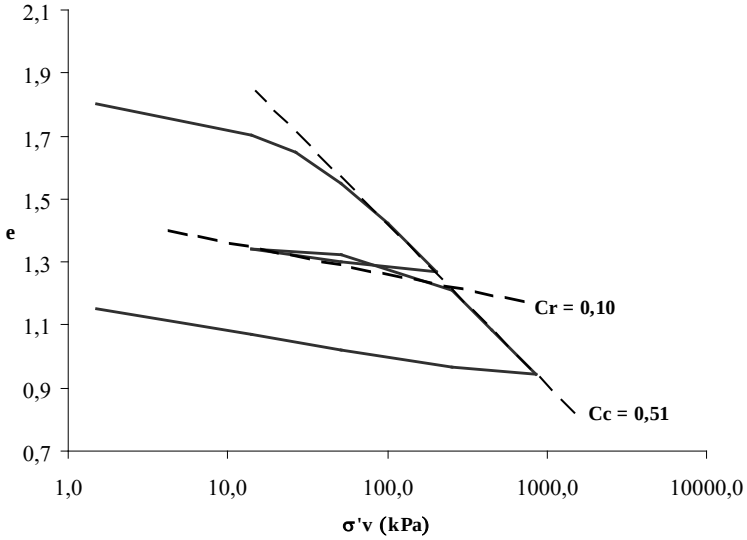

Figura 4 – Compressibilidade em Termos de e-logσ'_v (Mira, 2008)

5. ESTUDO DA CONSOLIDAÇÃO SECUNDÁRIA

5.1. Programa de Ensaios

Tal como o ensaio de caracterização da compressibilidade do solo, os ensaios de fluência foram efectuados no edómetro de 70 mm de diâmetro. O estudo do efeito da pré-carga na atenuação dos assentamentos por consolidação secundária é efectuado com base em três ensaios de fluência, designados por A, B e C. A fase inicial dos ensaios consistiu em instalar no solo um estado de tensão vertical inicial de 101,6 kPa. Em consonância com o procedimento habitual, as três amostras foram sujeitas a incrementos de carga, repartidos pelos quatro primeiros dias do ensaio (Quadros 3, 4 e 5, respectivamente para os ensaios A, B e C).

A sequência seguinte de carregamento visa, no caso do ensaio A a simulação do fenómeno induzido pela construção de um hipotético aterro ($\Delta\sigma$ = 65 kPa), enquanto nos ensaios B e C se procura estudar o efeito da magnitude da aplicação de uma pré-carga na evolução dos assentamentos por fluência ($\Delta\sigma_{pré\text{-}carga}$ = 35 kPa – ensaio B; $\Delta\sigma_{pré\text{-}carga}$ = 75 kPa – ensaio C).

Ensaio A - Fluência Sem Pré-carga

No Quadro 3 apresenta-se a sequência de carregamento do ensaio A, em que se pretende estudar a evolução dos assentamentos por fluência durante 15 dias, devido à aplicação de um acréscimo de tensão de 65 kPa (2,5 kg), que hipoteticamente corresponde à construção de um aterro de 3 metros de altura.

Quadro 3- Escalões de Carga do Ensaio de Fluência A – Sem Pré-carga

Escalão de carga	σ'_v (kPa)	t (min)
PT	1,51	1440
PT + 1 kg	26,54	1440
PT + 2 kg	51,57	1440
PT + 4 kg	101,64	1440
PT + 4 kg + 2,5 kg	166,64	1440*15
PT	1,51	1440

Ensaio B - 1º Nível de Pré-Carga

No ensaio B pretende-se analisar o comportamento por fluência induzido pela aplicação adicional, em relação ao ensaio A, de uma pré-carga de 35 kPa, durante o tempo estritamente necessário à ocorrência da consolidação primária ($\bar{U}$ = 95 %). Assim, no ensaio B (Quadro 4) o provete foi submetido a uma tensão de 201,6 kPa, tendo imediatamente após o término da consolidação primária sido descarregado para cerca de 166,6 kPa.

Tendo em consideração os valores dos coeficientes de consolidação obtidos na Figura 3, e de modo a garantir um grau de consolidação médio de 95% estimou-se um tempo de consolidação de 3 minutos, obtido pela expressão 1:

$$T_v = \frac{c_v \; x \, \mathrm{t}}{\mathrm{d}^2} \Leftrightarrow \; t = \frac{1{,}129 \; x \; 0{,}0095^2}{17{,}52} = 3 \, \mathrm{min} \qquad [1]$$

em que, T_v representa o factor tempo e d a distância de drenagem (neste caso, equivalente a metade da altura do provete).

Quadro 4- Ensaio de Fluência B ($\Delta\sigma_{pré\text{-}carga}$ = 35 kPa)

Escalão de carga	σ'_v (kPa)	t (min)
PT	1,51	1440
PT + 1 kg	26,54	1440
PT + 2 kg	51,57	1440
PT + 4 kg	101,64	1440
PT + 4 kg + 2,5 kg + 1,5 kg	201,64	3
PT + 4 kg + 2,5 kg	166,64	1440*15
PT	1,51	1440

Ensaio C - 2º Nível de Pré-Carga

No caso do ensaio C utilizou-se um procedimento similar ao ensaio B, com a única diferença a residir na magnitude do valor da pré-carga imposto. Assim, aplicou-se na amostra uma tensão de 241,6 kPa, que se reduziu depois para 166,6 kPa, correspondendo a uma pré-carga de 75 kPa (Quadro 5).

Quadro 5- Ensaio de Fluência C ($\Delta\sigma_{pré\text{-}carga}$ = 75 kPa)

Escalão de carga	σ'_v (kPa)	t (min)
PT	1,51	1440
PT + 1 kg	26,54	1440
PT + 2 kg	51,57	1440
PT + 4 kg	101,64	1440
PT + 4 kg + 2,5 kg + 3 kg	241,64	3
PT + 4 kg + 2,5 kg	166,64	1440*15
PT	1,51	1440

5.2. Análise dos Resultados

A Figura 5 ilustra a variação temporal dos assentamentos por fluência obtida nos três ensaios (A, B e C). No caso sem pré-carga (ensaio A), observa-se que os assentamentos variam de forma aproximadamente linear com o logaritmo do tempo, tomando um valor de 0,63 mm para o instante correspondente aos 10750 minutos. Esta evolução corresponde a um valor do coeficiente de consolidação secundária ($c_\alpha = \Delta e/\Delta \log t$) de 0,16.

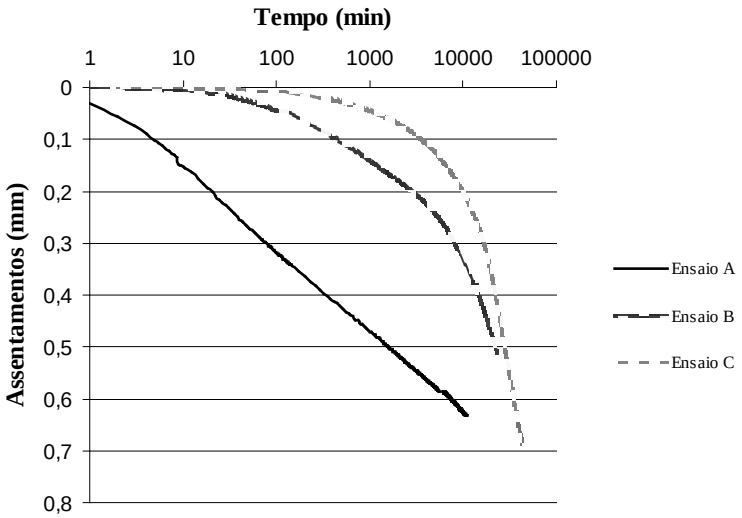

Figura 5 – Variação dos Assentamentos ao Longo do Período de Fluência (Mira, 2008).

Na Figura 5 também se observa que a aplicação de pré-carga (ensaio B) origina uma curva de fluência, qualitativamente distinta da situação sem pré-carga (ensaio A). De facto, a curva obtida no ensaio B apresenta uma forma mais arredondada sendo possível distinguir três tramos distintos. Numa primeira fase a taxa de evolução dos assentamentos é muito inferior à obtida no ensaio A, onde claramente se constata a atenuação dos assentamentos por fluência devido à aplicação da pré-carga. A partir de 200 minutos observa-se a tendência para o aumento da taxa

de deformação ΔH-logt, que após um período com uma inclinação sensivelmente paralela à curva A, aumenta significativamente, convergindo para a curva do ensaio A.

Aumentando o nível de pré-carga aplicado (ensaio C), observa-se que, em relação ao ensaio B existe uma menor taxa de deformação até sensivelmente 5000 minutos, evidenciando uma expressiva influência da magnitude da pré-carga aplicada na atenuação dos assentamentos por fluência. Contudo, para instantes superiores a 10000 minutos, constata-se o significativo aumento da taxa de deformação, convergindo a evolução obtida para as curvas dos ensaios A e B.

Assim, os resultados obtidos parecem evidenciar que, para os instantes iniciais, o método da pré-carga é muito eficiente na atenuação dos assentamentos por consolidação secundária, aumentando esta eficiência com o nível de pré-carga considerado. Contudo, a longo prazo os resultados parecem demonstrar uma progressiva diminuição da eficiência da metodologia da pré-carga na atenuação do fenómeno de fluência, traduzida pela tendência para a convergência dos resultados.

6. CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que a aplicação de uma sobrecarga temporária (pré-carga) tem de facto a capacidade de atenuar os assentamentos por consolidação secundária, sendo este efeito amplificado com o aumento da magnitude da pré-carga. Contudo, a longo prazo os resultados evidenciam uma progressiva diminuição da eficiência da metodologia da pré-carga na redução dos assentamentos de fluência.

REFERÊNCIAS

Alonso, E. E., Gens, A. e Lloret, A. (2000). Precompression design for secondary settlement reduction. *Géotechnique*, Vol 50, nº 6, p. 645 – 656.

Bjerrum, L. (1967).Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings. Seventh Rankine Lecture, *Géotechnique*, Vol. 17, p. 83 – 118.

Coelho, P.A.L.F. (2000). Caracterização Geotécnica de Solos Moles: Estudo do local experimental da Quinta do Foja (Baixo Mondego). *Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*, na especialidade de Mecânica dos Solos e Rochas.

Mira, E.S.P. (2008). *Atenuação dos assentamentos por consolidação secundária com recurso a pré-carga – Análise laboratorial*. Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na Especialidade de Geotecnia.

Taylor, D. W. (1942). *Research of consolidation of clays*. Massachusets Institute of Technology, Department of Civil and sanitary Engineering, Serial 82.

Venda Oliveira, P.J. (2008). Apontamentos de Obras de Terra. Perfil de Geotecnia do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.