

# **EFEITOS DE 2ª ORDEM E FLUÊNCIA EM ATERROS SOBRE SOLOS MOLES**

## **SECOND-ORDER EFFECTS AND CREEP IN EMBANKMENTS ON SOFT SOILS**

Santos, Jaime; CENOR Consultores S.A., Lisboa, Portugal, [jaime.santos@cenor.pt](mailto:jaime.santos@cenor.pt) e Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, [jaime@civil.ist.utl.pt](mailto:jaime@civil.ist.utl.pt)  
Tavares, Gonçalo; CENOR Consultores S.A., Lisboa, Portugal, [goncalo.tavares@cenor.pt](mailto:goncalo.tavares@cenor.pt)  
Brito, José; CENOR Consultores S.A., Lisboa, Portugal, [jose.brito@cenor.pt](mailto:jose.brito@cenor.pt)

### **RESUMO**

Este trabalho tem por objectivo principal evidenciar dois factores importantes que devem ser acautelados no dimensionamento de aterros sobre solos moles. O primeiro factor prende-se com os efeitos de 2ª ordem que acarretam o acréscimo da altura de aterro para compensar os assentamentos do terreno de fundação. O segundo factor tem a ver com os assentamentos na fase de compressão por fluência. É apresentado um caso de estudo simples para demonstrar a importância destes dois factores.

### **ABSTRACT**

This paper aims to highlight two important factors that must be considered in the design of embankments on soft soils. The first factor relates to the second-order effects which lead to the increase of the height of the embankment to offset the foundation ground settlement. The second factor is related to the creep settlements. A simple case study is presented to demonstrate the importance of these two factors.

### **1 - INTRODUÇÃO**

Nas últimas décadas foram construídas muitas obras de grande importância económica e social em vales aluvionares do continente Português, interessando formações silto-argilosas moles do Holocénico.

Face às desfavoráveis características mecânicas destes materiais, tem-se recorrido a diversos tipos de soluções, nomeadamente a utilização de fundações indirectas por estacas ou o recurso a soluções de tratamento do terreno de fundação. Estas últimas podem apresentar vantagens económicas e são particularmente adequadas para grandes áreas de intervenção e estruturas menos exigentes do ponto de vista de movimentos admissíveis. As soluções de tratamento mais frequentes têm sido a consolidação forçada com aterros de pré-carga e drenos verticais ou a consolidação e o reforço do terreno através da execução de colunas de brita.

Porém, tem havido relatos de situações em que a taxa de assentamento permanece elevada pós-tratamento e ao longo da vida útil, prejudicando o bom desempenho das obras e implicando, por vezes, a implementação de medidas correctivas.

Este trabalho tem por objectivo principal evidenciar dois factores importantes que devem ser acautelados no dimensionamento de aterros sobre solos moles. O primeiro factor prende-se com os efeitos de 2ª ordem que acarretam o acréscimo da altura de aterro para compensar os assentamentos do terreno de fundação. O segundo factor tem a ver com os assentamentos na fase de compressão por fluência.

É apresentado um caso de estudo simples para ilustrar a importância destes dois factores que podem explicar, em parte, o insucesso de algumas obras do passado, pelo facto, de não os ter considerado no respectivo dimensionamento.

### **2 - ASSENTAMENTOS POR CONSOLIDAÇÃO CONSIDERANDO OS EFEITOS DE 2ª ORDEM**

A consideração de efeitos de segunda ordem pode ser relevante em problemas em que o terreno é constituído por camadas de solo de compressibilidade elevada e grande espessura. A estimativa do assentamento por consolidação do aterro definitivo deve ser efectuada de uma forma iterativa. Considerando que o terreno iria assentar devido à carga que um aterro lhe transmite, verificar-se-ia que a cota de topo do aterro se tornaria mais baixa que o definido no projecto. Para que o aterro definitivo mantivesse a sua cota, este teria de ser novamente aterrado com uma camada de espessura igual ao assentamento ocorrido. Por consequência, verificar-se-ia um novo acréscimo de carga, logo de assentamento, que assim teria de ser novamente compensado pela colocação de mais uma camada no topo do aterro. Mantendo esta metodologia, representada esquematicamente na Figura 1, garante-se a convergência da solução ao fim de algumas iterações.

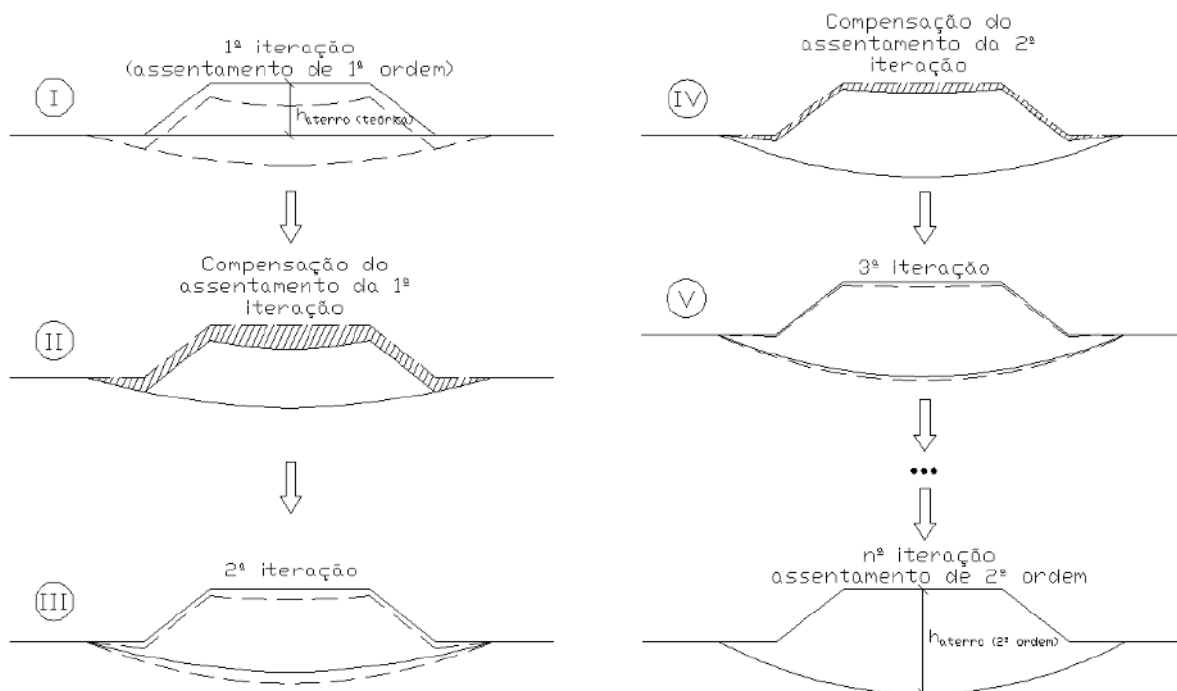


Figura 1 - Esquema da metodologia para estimativa do assentamento por consolidação, considerando os efeitos de 2ª ordem (Brito et al., 2010)

Tendo conhecimento do valor do assentamento total associado a uma determinada altura de aterro, assim como da lei que rege a sua evolução ao longo do tempo, é possível determinar, de uma forma iterativa, qual a altura de pré-carga necessária para atingir os assentamentos desejados no tempo exigido pelo faseamento da obra. Este procedimento é representado na Figura 2.

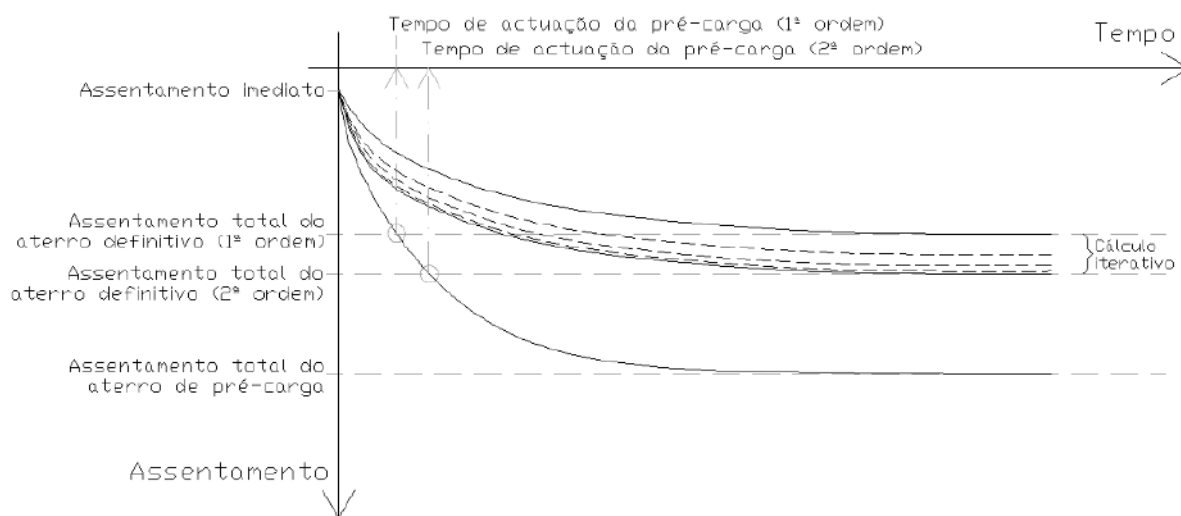


Figura 2 - Procedimento de cálculo do tempo de actuação da pré-carga (Brito et al., 2010)

Em solos moles os assentamentos por consolidação podem atingir valores bastante consideráveis (superiores a 1m), pelo que os efeitos de 2ª ordem não são desprezáveis e devem ser tidos em conta no dimensionamento da solução de tratamento destes solos.

Para analisar melhor esta questão, considera-se o caso de estudo representado na Figura 3, em que se pretende construir um aterro de grandes dimensões sobre um estrato de solo mole com as características indicadas na Figura 3.

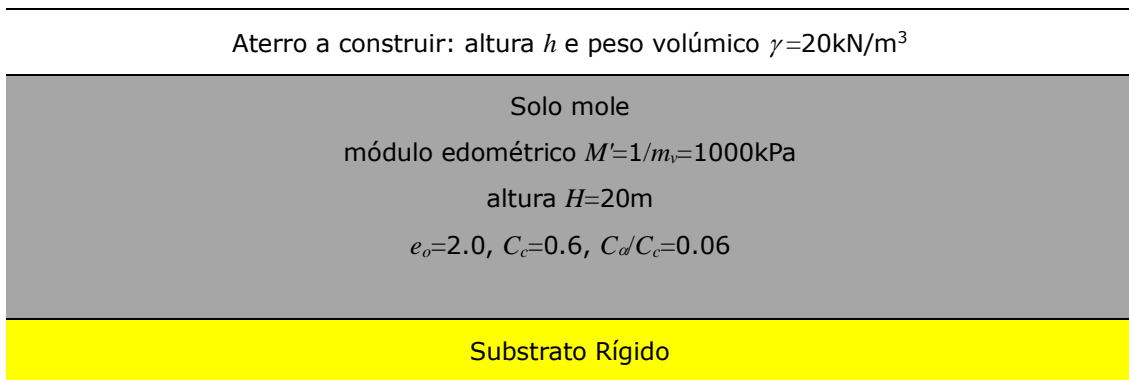


Figura 3 - Caso de estudo: situação I - sem tratamento; situação II - consolidação forçada com drenos verticais

O assentamento por consolidação provocado pelo peso do aterro  $\Delta\sigma_o = h\gamma$  seria dado por:

$$\Delta h_o = \Delta\sigma_o m_v H = h\gamma m_v H \quad (1)$$

Para compensar este assentamento seria colocada uma nova camada de solo com altura  $\Delta h_o$  que iria provocar novo acréscimo de assentamento dado por:

$$\Delta h_1 = (\Delta h_o \gamma) m_v H \quad (2)$$

e assim sucessivamente, pelo que o assentamento total seria dado pela expressão seguinte:

$$\Delta h = \Delta h_o + \Delta h_1 + \Delta h_2 \dots + \Delta h_n \quad (3)$$

$$\Delta h = \Delta h_o + (\Delta h_o \gamma m_v H) + (\Delta h_o \gamma m_v H) \gamma m_v H + \dots + \Delta h_o (\gamma m_v H)^n \quad (4)$$

$$\Delta h = \sum_{n=0}^{\infty} \Delta h_o (\gamma m_v H)^n \quad (5)$$

Trata-se, portanto, de uma série geométrica que será convergente se a razão for inferior à unidade, ou seja, se  $\gamma m_v H < 1$ . Se tal acontecer, a soma é igual a:

$$\Delta h = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{\infty} \Delta h_o (\gamma m_v H)^n = \Delta h_o \times \frac{1}{1 - \gamma m_v H} \quad (6)$$

Analisando o caso de estudo representado na Figura 3 e recorrendo à expressão anterior, conclui-se que o acréscimo de assentamento devido aos efeitos de 2ª ordem seria de 66,6(6) %:

$$\gamma m_v H = 0,4 < 1 \quad (7)$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta h_o} = \frac{1}{1 - \gamma m_v H} = \frac{1}{1 - \frac{20 \times 20}{1000}} = 1,6 \quad (8)$$

É ainda curioso notar que a solução pode ser representada em função da razão adimensional  $\gamma m_v H$  ou  $(\gamma H)/M'$ , conforme se pode verificar na Figura 4.

Para valores de  $(\gamma H)/M'$  entre 0,2 e 0,5 obter-se-iam acréscimos de assentamento da ordem de 25% a 100%, evidenciando bem a importância da consideração dos efeitos de 2ª ordem, quando se pretende manter a cota do topo do aterro definida no projecto.

Nesta análise, admitiu-se simplificada que o carregamento é unidimensional e que a rigidez do solo é constante. Em situações reais, ocorrem efeitos tridimensionais e o aumento da rigidez do solo com a consolidação, factores esses que podem atenuar ligeiramente os acréscimos de assentamento devidos aos efeitos de 2ª ordem.

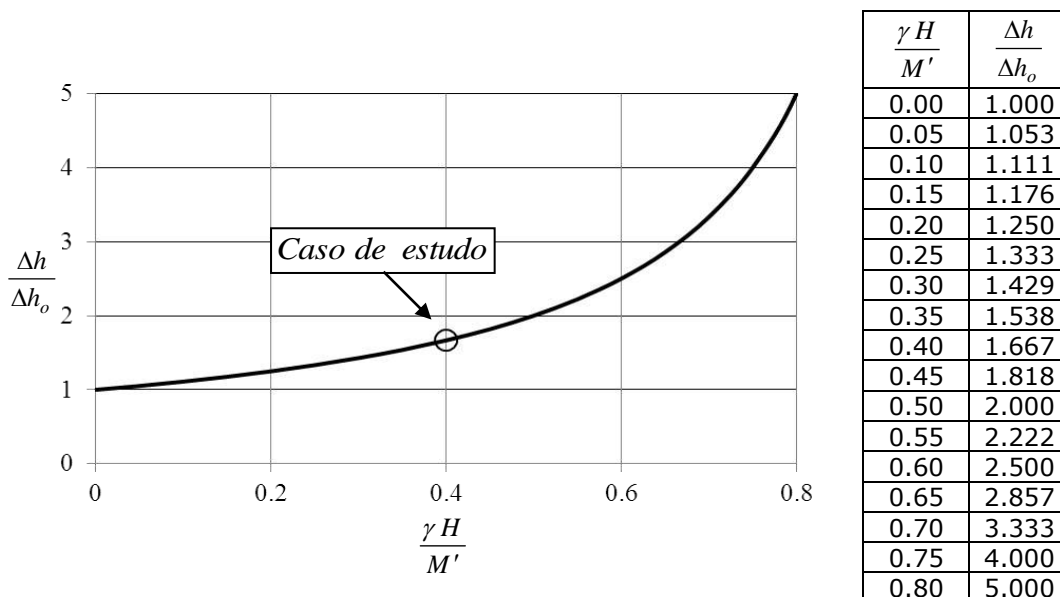


Figura 4 - Acréscimo de assentamento por consolidação devido aos efeitos de 2ª ordem

### 3 - ASSENTAMENTOS POR COMPRESSÃO SECUNDÁRIA

A fase de compressão por fluência, é habitualmente designada por compressão secundária e é descrita como uma relação linear entre o assentamento  $\Delta h$ , ou o índice de vazios  $e$ , com o logaritmo do tempo  $t$ . É usual considerar que esta relação linear ocorre a partir do término da consolidação primária  $t_p$ .

Na realidade, isto não quer dizer que os fenómenos de consolidação e fluência estejam dissociados, pois de acordo com os estudos mais recentes é praticamente consensual que os dois processos são sincrónicos e podem ser descritos através de modelos viscoelastoplásticos.

De qualquer modo, na fase de compressão secundária, o assentamento por fluência que ocorre no intervalo de tempo entre os instantes  $t_p$  e  $t$  pode ser obtido através da expressão seguinte:

$$\Delta h = \frac{C_\alpha}{1+e_0} H \log\left(\frac{t}{t_p}\right) \quad (9)$$

onde  $C_\alpha$  é o coeficiente de fluência,  $e_0$  é o índice de vazios do solo e  $H$  é a espessura da camada de solo.

A taxa de assentamento para um determinado instante  $t$  é calculada a partir da derivada da expressão anterior, que toma a forma de:

$$\dot{\Delta h} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( \frac{C_\alpha}{1+e_0} H \right) \log t - \left( \frac{C_\alpha}{1+e_0} H \right) \log t_p \right] = \left( \frac{C_\alpha}{1+e_0} H \right) \times \left( \frac{1}{t \times \ln 10} \right) \quad (10)$$

A taxa de deformação é, portanto, igual a:

$$\dot{\varepsilon} = \left( \frac{C_\alpha}{1+e_0} \right) \times \left( \frac{1}{t \times \ln 10} \right) \quad (11)$$

Faz-se notar que a taxa de assentamento ou a taxa de deformação é inversamente proporcional ao tempo.

Mesri e Godlewski (1977) apresentaram uma lei de compressibilidade (Figura 5) que considera uma relação de proporcionalidade entre a compressibilidade com respeito ao tempo, expressa em termos do coeficiente  $C_\alpha = -\partial e / \partial t$  e a compressibilidade com respeito à tensão efectiva, expressa em termos do coeficiente  $C_c = -\partial e / \partial \sigma'$ , ou seja:  $C_\alpha = \alpha C_c$ .

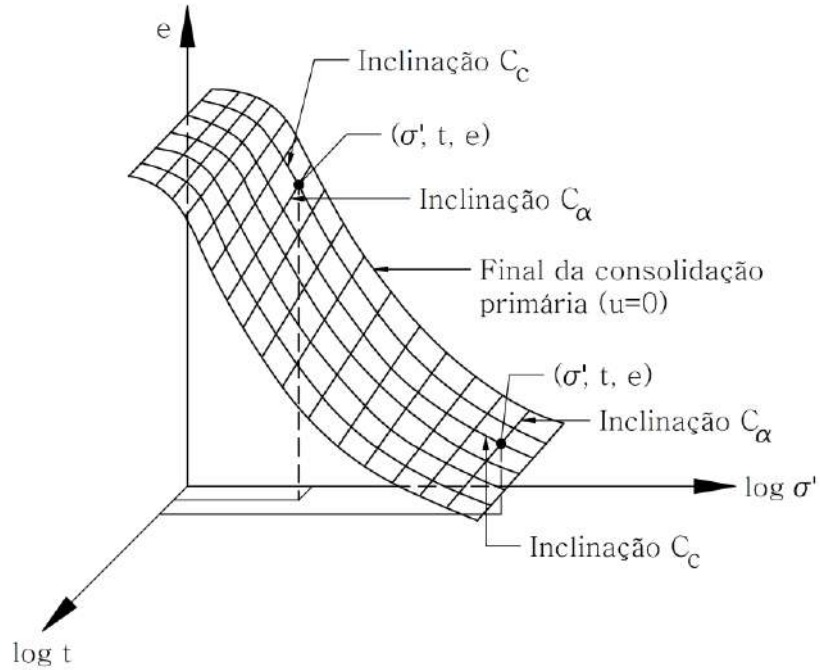


Figura 5 - Lei de compressibilidade baseado no conceito  $C_\alpha$ - $C_c$  (Mesri e Godlewski, 1977)

Admite-se, por hipótese, que esta relação é única para um determinado solo, sendo válida, quer no trecho de compressão virgem, quer em condições de descarga ou de recarga. Segundo aqueles autores, o coeficiente  $\alpha$  varia, em geral, entre 0.03 e 0.06 para as argilas inorgânicas e entre 0.04 e 0.07 para as argilas orgânicas. Os estudos realizados por Santos (1999) e Ruivo (2012), confirmam que as formações silto-argilosas moles ocorrentes no vale aluvionar do Tejo exibem valores de  $\alpha$  próximos àqueles propostos por Mesri e Godlewski (1977) para argilas inorgânicas.

O aumento da tensão de pré-consolidação durante a fase de compressão secundária por fluência pode ser quantificado aplicando esta lei de compressibilidade (Figura 6). Mesri e Choi (1979) propuseram a seguinte expressão:

$$\frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} = \left( \frac{t}{t_p} \right)^{\frac{C_\alpha/C_c}{1-C_\alpha/C_c}} \quad (12)$$

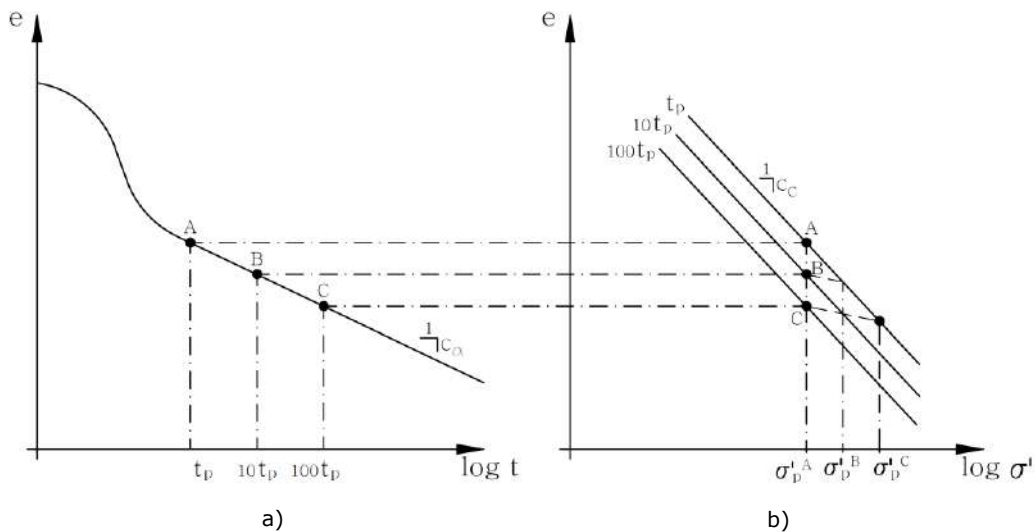


Figura 6 - Lei de compressibilidade - Influência da tensão de pré-consolidação

Como se pode deduzir da Figura 6, na fase de compressão secundária, a evolução do índice de vazios ou do assentamento para um dado instante  $t$ , está fortemente dependente do tempo ocorrido desde o término da consolidação primária  $t_p$ , ou mais precisamente da relação  $t/t_p$ .

Para realçar a importância dos assentamentos na fase de compressão por fluência analisa-se novamente o caso de estudo representado na Figura 3. Tendo em conta os parâmetros indicados, obtém-se para cada ciclo logarítmico no tempo uma variação do índice de vazios de:

$$\Delta e = C_\alpha = 0.06 C_c = 0.036 \quad (13)$$

Em condições de compressão unidimensional a extensão axial associada seria igual a:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta h}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_o} = 0.012 H \quad (14)$$

Como se pode notar, a extensão axial seria de 1,2%, ou seja, seria espectável para cada ciclo logarítmico no tempo, um assentamento de 24cm.

Retomando a Figura 6, analisa-se agora o tempo associado a este ciclo logarítmico para perceber o impacto que este assentamento poderia causar durante a vida útil da obra. Este assentamento ocorreria durante um período de tempo correspondente a  $9t_p$ , ou seja, o intervalo de tempo entre os pontos A e B da Figura 6a.

Face às características do terreno e às condições geométricas e de drenagem da situação I do caso de estudo apresentado, o tempo associado à consolidação seria da ordem de dezenas de anos, pelo que os assentamentos na fase de compressão por fluência dar-se-iam a uma taxa bastante lenta e teriam um impacto muito menos importante que os assentamentos na fase de consolidação de maior amplitude e que ocorreriam durante a vida útil da estrutura.

Porém, a situação seria totalmente diferente, caso se optasse por provocar a consolidação forçada do solo, através, por exemplo, da instalação de drenos verticais e da execução de aterros de pré-carga. Como já se viu, a taxa de assentamento na fase de compressão secundária por fluência está fortemente relacionada com a relação  $t/t_p$ . A consolidação forçada alteraria a escala espacial (menor distância de drenagem) provocando consequentemente uma alteração da escala temporal reduzindo o valor de  $t_p$ , podendo ocorrer taxas de deformação elevadas no final da consolidação primária devido à fluência (equações 9 a 11).

Retomando o caso de estudo apresentado, e considerando para a situação II um tempo de tratamento com drenos verticais e aterros de pré-carga da ordem de 1 ano ( $t_p=1$  ano), isto quereria dizer, que o assentamento por fluência de 24cm, ocorreria durante o período de 9 anos subsequentes à conclusão do tratamento. Este assentamento não seria certamente desprezável podendo causar efeitos indesejáveis durante a fase de exploração da obra.

Uma maneira eficaz de reduzir a taxa de assentamento poderia ser através do aumento da tensão de pré-consolidação colocando maior altura de pré-carga. Por exemplo, pressupondo a hipótese de se conseguir provocar uma sobreconsolidação ( $\sigma_p^B$ ) e atingir o estado representado pelo ponto B (Figura 6b).

Como já se viu, a taxa de assentamento (ou a taxa de deformação) é inversamente proporcional ao tempo (equação 11). Sendo assim, a taxa de assentamento em B é 10 vezes inferior à taxa de assentamento em A. O assentamento por fluência de 24cm, já ocorreria durante o período de 90 anos subsequentes à conclusão do tratamento (intervalo de tempo entre os pontos B e C da Figura 6a). Nestas condições a taxa de assentamento seria consideravelmente menor e possivelmente aceitável do ponto de vista de utilização.

#### 4 - CONCLUSÕES

Discutiu-se neste trabalho dois factores importantes que devem ser acautelados no dimensionamento de aterros sobre solos moles. O primeiro factor prende-se com os efeitos de 2ª ordem que conduzem a um acréscimo da altura de aterro para compensar os assentamentos do terreno de fundação. O segundo factor tem a ver com os assentamentos na fase de compressão secundária por fluência.

Foi apresentado um caso de estudo simples para demonstrar a importância destes dois factores.

O primeiro factor pode conduzir a acréscimos de assentamento por consolidação da ordem de 25% a 100%, em cenários geotécnicos correntes em que o terreno é constituído por camadas de solo de compressibilidade elevada e grande espessura.

O segundo factor pode ser relevante quando se recorre à técnica da consolidação forçada através, por exemplo, da instalação de drenos verticais e da execução de aterros de pré-carga. A consolidação forçada altera a escala espacial provocando consequentemente uma alteração da escala temporal, podendo ocorrer taxas de deformação elevadas no final da consolidação primária devido à fluência. Uma maneira eficaz de minimizar os seus efeitos, poderá ser através do aumento da tensão de pré-consolidação do solo.

## REFERÊNCIAS

Brito, J.A.M.; Santos, J.A.; Nunes, A.; Tavares, G.N.S.; Cruz, F.; Lourenço, J.P.C. (2010). *Soluções de Tratamento do Terreno de Fundação dos Acessos à Plataforma Logística de Lisboa Norte*. 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Universidade do Minho, in CD-Rom.

Mesri, G.; Godlewski, P.M. (1977). *Time and stress-compressibility interrelationship*. JGED, ASCE, vol. 103, no. 5, pp. 417-430.

Mesri and Choi (1979). *Excess pore water pressures during consolidation*. Proceedings of the 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol 1, pp. 151-154.

Mesri, G. & Choi, Y. K. (1979). *Discussion on 'Strain rate behaviour of St. Jean Vianney clay'*. Can. Geotech. J. 16, No. 4, 831-834.

Ruivo, C.A.S. (2012). *Estudo Experimental sobre a Compressão por Fluência das Aluviões Lodosas da Bacia do Rio Tejo*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

Santos, J.A. (1999). *Caracterização de solos através de ensaios dinâmicos e cíclicos de torção. Aplicação ao estudo do comportamento de estacas sob acções horizontais estáticas e dinâmicas*. Dissertação submetida ao Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.