

ANÁLISE NUMÉRICA DA ACELERAÇÃO DA CONSOLIDAÇÃO COM RECURSO A DRENOS VERTICAIS

NUMERICAL ANALYSIS OF CONSOLIDATION ACCELERATED USING VERTICAL DRAINS

Rodrigues, Henrique; *Academia da Força Aérea, Granja do Marquês, Portugal,*
Henriquemcrodrigues@gmail.com

Bodas Freitas, Teresa Maria; *Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, Lisboa, Portugal,*
tmbodas@civil.ist.utl.pt

Santos, Jaime Alberto dos; *Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, Lisboa, Portugal,*
jaime@civil.ist.utl.pt

RESUMO

A aplicação de um carregamento à superfície de um estrato de solo argiloso mole causa em regra assentamentos importantes diferidos no tempo, associados ao processo de consolidação e ao fenómeno de fluência. Na prática, a avaliação dos assentamentos nestas condições é ainda, frequentemente, feita considerando que os assentamentos por fluência ocorrem apenas após o fim da consolidação primária, sendo o processo de consolidação analisado com recurso às soluções de Terzaghi e Barron. Este artigo apresenta um estudo numérico pelo método dos elementos finitos em que se analisa a influência da consideração da não linearidade e da fluência no processo de consolidação de um estrato de solo de espessura variável sujeito a carregamento aplicado à superfície, e se analisa as implicações da sua não consideração nos casos em que a consolidação é acelerada por meio de drenos verticais.

ABSTRACT

The application of a surface load on a soft clay layer causes, as a rule, significant settlements, that development over time, due to consolidation and the occurrence of creep deformations. In practice, settlements are still frequently evaluated assuming that secondary compression takes place only after primary consolidation is complete, and the consolidation process is described by Terzaghi and Barron solutions. This paper presents a numerical study, based on the finite element method, which analyses the influence of soil non-linearity and strain rate effects on the consolidation process and the implications of ignoring these effects when consolidation is accelerated using vertical drains.

1 INTRODUÇÃO

Prevê-se que em 2050 80% da população mundial viverá em zonas costeiras. Nestas zonas é frequente a ocorrência de formações geológicas recentes, com características de resistência e deformabilidade precárias como terrenos de fundação, mas que devido à escassez de espaço disponível terão que ser cada vez mais utilizadas num futuro próximo. A construção em zonas com estas características constitui um desafio geotécnico que requer a caracterização do comportamento dessas formações e a utilização de ferramentas para prever o seu comportamento a curto e longo prazo.

No dimensionamento de uma estrutura geotécnica haverá a considerar dois aspectos: a verificação da não ocorrência de colapso (resistência disponível satisfatória) e o bom desempenho da estrutura em condições de serviço, nomeadamente a não ocorrência de deformações ou distorções que possam comprometer a sua normal utilização e de todos as estruturas ou equipamentos a ela associados. Este último aspecto é frequentemente o que mais condiciona o projecto. Acresce que, formações recentes tendem a ocorrer sob índices de vazios iniciais elevados, com tendência para sofrer deformações muito significativas quando carregadas. Em particular, quando de natureza argilosa e com teor em matéria orgânica, as deformações são muito elevadas e ocorrem diferidas no tempo, devido ao processo de consolidação hidrodinâmica e ao fenómeno de fluência. Nestes casos recorre-se frequentemente a técnicas de melhoramento de terrenos, existindo uma enorme diversidade de metodologias disponíveis (Van Impe, 1989). A utilização da técnica da pré-carga associada, ou não, a drenos verticais, pode ser uma solução interessante do ponto de vista económico para reduzir os assentamentos pós construtivos, em particular, em situações em que a zona a tratar tem uma extensão elevada em planta e as cargas impostas pelas estruturas definitivas são médias a baixas.

A pré-carga refere-se ao carregamento de uma camada de solo sob uma tensão vertical igual ou superior àquela que será imposta pela estrutura definitiva, previamente à construção da mesma. A pré-carga é removida quando os assentamentos registados são idênticos aos que se estimam que a estrutura definitiva iria causar durante o seu período de vida útil (princípio do "quanto baste"). Desta forma a estrutura definitiva sofrerá assentamentos mínimos e estes ocorrem de forma relativamente rápida (uma vez que a construção da estrutura definitiva corresponderá a uma recarga). A pré-carga pode ser aplicada por meio da construção de um aterro ou induzida por um sistema de vácuo. A maior limitação à utilização desta técnica reside na verificação da capacidade resistente do solo ao carregamento imposto.

Quando a calendarização da obra exige a redução do tempo necessário para atingir um determinado grau de consolidação, a técnica de pré-carga é associada à instalação de drenos verticais. A instalação de drenos verticais acelera o processo de consolidação através da diminuição drástica do caminho máximo de percolação; acresce que a percolação passa-se a fazer principalmente na direcção horizontal, e que o coeficiente de permeabilidade horizontal é, geralmente, superior ao vertical, devido à estrutura do solo induzida pela sedimentação (Hausmann, 1990).

Considere-se um elemento de solo saturado com baixa permeabilidade, sob um estado de tensão longe da rotura, como acontece em ensaios edométricos. A aplicação rápida de um incremento de tensão total sobre este elemento de solo provoca a ocorrência de deformações volumétricas diferidas no tempo, distinguindo-se essencialmente duas fases: a compressão primária e secundária. A compressão primária corresponde à consolidação hidrodinâmica, em que ocorre a dissipação dos excessos de pressão intersticial gerados durante a aplicação do incremento de tensão. A compressão secundária corresponde a deformação por fluência, a tensões efectivas constantes, caracterizada por uma relação aproximadamente linear entre a deformação volumétrica (ou variação do índice de vazios) e o logaritmo do tempo, ou seja por um coeficiente de compressão secundária, C_α aproximadamente constante, em que C_α é dado pela equação seguinte:

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log(t)} \quad [1]$$

em que e é o índice de vazios e t é tempo.

Eventualmente poderá ser identificada uma terceira fase, denominada de compressão terciária, a qual corresponde também a deformação por fluência, contudo difere da compressão secundária pela ocorrência de um aumento acentuado de C_α com o tempo. Sendo o solo saturado, durante todas as fases descritas a diminuição de volume corresponde a perda de água intersticial. Durante as três fases de compressão a taxa de deformação diminui monotonicamente com o tempo (Augustesen et al., 2004).

Durante décadas houve um debate aceso na comunidade científica sobre a relação entre a consolidação hidrodinâmica e a compressão secundária por fluência, existindo duas abordagens distintas, conhecidas como hipóteses A e B (Figura 1).

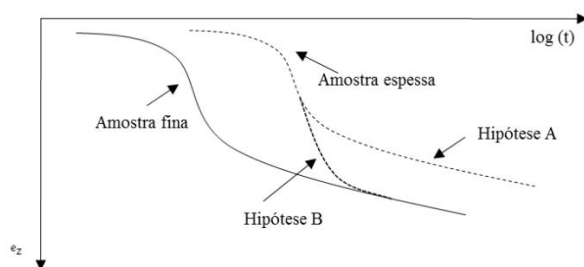


Figura 1 – Variação da extensão vertical com o tempo durante a consolidação de estratos de diferente espessura de acordo com as Hipóteses A e B (Augustensen et al, 2004)

De acordo com a hipótese A os dois processos são sequenciais e a compressão por fluência ocorre somente após a conclusão da consolidação primária, ou seja após a dissipação dos excessos de pressão intersticial. Esta situação implica que o valor da extensão (ou índice de vazios) no final da consolidação primária (EOP – *end of primary*) é independente do tempo necessário para atingir o EOP, sendo por isso o mesmo para um estrato de solo fino e espesso. Este facto implica que a relação $e - \log(\sigma_v')$ no final da consolidação primária é única (em que σ_v' é a tensão vertical efectiva). Esta hipótese foi defendida por Mesri e co-autores (Mesri & Choi, 1985).

De acordo com a hipótese B a fluência ocorre durante todo o processo de consolidação, o que significa que a extensão no fim da consolidação primária aumenta com o tempo necessário para atingir o EOP (ou seja, com a espessura do estrato). Neste caso, a relação $e - \log(\sigma_v')$ no final da consolidação primária não é única e depende da taxa de deformação (Leroueil et al., 1985).

Várias publicações (Leroueil et al., 1985; Augustensen et al., 2004) estabeleceram a veracidade da hipótese B. Para estratos de solo de espessura elevada, como ocorrem em condições de obra, o assentamento no EOP será superior ao previsto pela Hipótese A, devido à ocorrência de fluência durante o processo de consolidação.

Contudo, a prática comum no projecto geotécnico é ainda, em regra, baseada na hipótese A, e os assentamentos por consolidação são estimados com base na relação $e - \log(\sigma_v')$ determinada a partir de ensaios edométricos convencionais (com escalões de carga de 24h) e o assentamento por fluência é estimado com base na Equação 2,

$$s = \frac{C_\alpha}{1+e_0} h_0 \cdot \log\left(\frac{t}{t_c}\right) \quad [2]$$

Em que C_α é determinado a partir de ensaios edométricos convencionais utilizando a Equação 1, h_0 é altura inicial do estrato, e_0 é o índice de vazios inicial e t_c é o tempo no fim da consolidação primária determinado a partir das soluções para a consolidação unidimensional e radial que se apresentam em seguida.

Terzaghi (1923) formulou uma solução para descrever o processo de consolidação unidimensional, a qual é aplicada a estratos sujeitos a carregamento confinado, quando a percolação se dá apenas na direcção vertical. A solução de Terzaghi descreve matematicamente a variação do excesso de pressão intersticial (u_e) num ponto à profundidade genérica z , em função do tempo e da distância à fronteira drenante, como se apresenta na equação seguinte:

$$u_e(Z, T) = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_e(0)}{M} (\sin MZ) e^{-M^2 T} \quad [3]$$

em que

$Z = \frac{z}{H}$, $T = \frac{c_v \times t}{H^2}$ e $M = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$, com m variável inteira tomando como valores 0, 1, 2, 3....

H é a maior distância de percolação, c_v é o coeficiente de consolidação vertical dado por $c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$ em que m_v é o coeficiente de compressibilidade volumétrica e k é o coeficiente de permeabilidade do solo na direcção vertical.

Partindo da Equação [3] pode deduzir-se o grau de consolidação médio de consolidação do estrato, o qual é dado pela expressão seguinte:

$$\bar{U}_z(t) = 1 - \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T} \quad [4]$$

Em que o grau de consolidação médio é graficamente a razão entre a área do diagrama dos excessos de pressão intersticial já dissipados num instante t e a área do diagrama dos excessos de pressão intersticial no instante $t=0$.

Dado que se admite uma relação única e linear entre tensão vertical efectiva e índice de vazios, pode demonstrar-se que o grau de consolidação médio é igual ao grau de assentamento. Assim o assentamento num instante de tempo t , ($S_c(t)$) pode ser obtido a partir da expressão seguinte:

$$S_c(t) = \bar{U}_z(t) \cdot S_c \quad [5]$$

Em que S_c é o assentamento obtido no final da consolidação primária.

Barron (1948) desenvolveu soluções matemáticas para descrever o processo de consolidação radial, tendo analisado dois cenários: 1) em que se admite deformação vertical livre à superfície e 2) em que se admite deformação vertical uniforme á superfície. Neste trabalho será apenas analisada a solução para o caso 2 (deformação vertical uniforme). De acordo com Barron (1948) para o caso em que se admite deformação vertical uniforme à superfície do terreno, o excesso de pressão intersticial num ponto a uma distância r do centro de um dreno de raio r_w pode ser determinado pelas equações seguintes:

$$u_{er}(r, t) = \frac{4\bar{u}_e}{d_e^2 F(n)} \left[R^2 \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) - \left(\frac{r^2 - r_w^2}{2}\right) \right] \quad [6]$$

com

$$\bar{u}_e = u_{ei} e^{-\frac{2T_r}{F(n)}} \quad [7]$$

Em que $F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right) \ln(n) - \left(\frac{3n^2-1}{4n^2}\right)$; $n = \frac{R}{r_w}$; $T_r = \frac{c_h t}{R^2}$, c_h é o coeficiente de consolidação horizontal e R é igual ao raio de influência do dreno.

Partindo da expressão [5] o grau médio de consolidação é dado por:

$$\bar{U}_r = 1 - e^{-\frac{2T_r}{F(n)}} \quad [8]$$

Nos casos em que existe consolidação nas direcções vertical e radial (consolidação combinada) o grau de consolidação médio pode ser determinado utilizando o teorema de Carrillo (1942):

$$\bar{U} = 1 - [(1 - \bar{U}_z)(1 - \bar{U}_r)] \quad [9]$$

Em que \bar{U}_z e \bar{U}_r são, respectivamente, os graus de consolidação médios obtidos pelas soluções de Terzaghi e Barron, para a consolidação vertical e radial, respectivamente. As soluções de Terzaghi e Barron acima descritas assumem que o solo tem comportamento linear e que não ocorrem quaisquer fenómenos viscosos durante o processo de consolidação.

Este artigo apresenta um estudo numérico em que se analisam diversos aspectos do processo de consolidação e da compressão de estratos argilosos nomeadamente: i) comparação entre as soluções de Terzaghi e Barron e os resultados obtidos pelas análises numéricas que consideram o efeito da não linearidade do solo e da ocorrência de deformações por fluência durante o processo de consolidação; ii) quantificação da importância dos drenos verticais enquanto elementos que permitem a aceleração da consolidação e iii) compreender de que forma a aceleração do processo de consolidação pode influenciar o valor do assentamento no EOP e a longo prazo.

2 DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES

Tendo em vista analisar o efeito da fluência (e da taxa de extensão) e da não linearidade dos solos no processo de consolidação realizou-se um conjunto de análises numéricas pelo método dos elementos finitos com consolidação acoplada, recorrendo ao programa Plaxis 2D. As análises efectuadas simulam o processo de consolidação de uma coluna de solo de natureza argilosa de espessura variável, após a aplicação rápida de um incremento de tensão vertical de 50kPa à superfície do terreno (a tensão vertical aplicada à superfície passa de 50 para 100kPa). O comportamento do solo é descrito pelos seguintes modelos: o modelo elástico-linear, o modelo Soft Soil (SSM) e o modelo Soft Soil Creep (SSCM) (Brinkgreve, Broere, & Waterman, 2002).

Para as mesmas condições de fronteira, os resultados numéricos obtidos com o modelo linear elástico deverão ser idênticos aos obtidos com as soluções de Terzaghi e Barron, uma vez que se baseiam nos mesmos pressupostos (comportamento linear, ausência de fluência ou outros efeitos viscosos).

O modelo Soft Soil permite considerar o efeito da não linearidade dos solos e o modelo Soft Soil Creep permite adicionalmente considerar o efeito da taxa de extensão sobre o comportamento dos solos e prever a ocorrência de deformações por fluência.

Uma vez que as análises efectuadas consideram acoplamento hidromecânico foram definidas condições de fronteira em termos de deslocamentos e pressões intersticiais. As condições de fronteira adoptadas em cada caso dependem do tipo de consolidação que se pretende simular (vertical, radial ou combinada), como se indica na Figura 2.

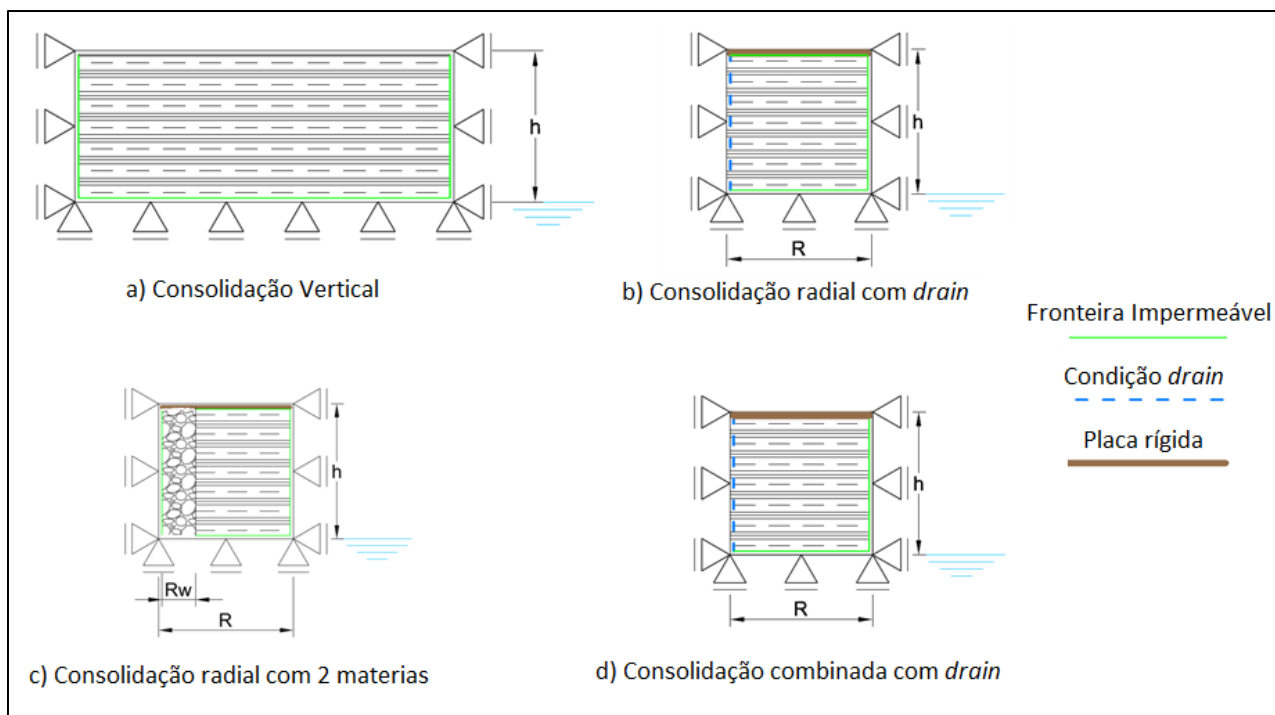


Figura 2 - Condições de fronteira adotadas

Neste estudo, os drenos verticais foram materializados utilizando a condição de fronteira *drain*, existente no programa Plaxis 2D ou através de uma coluna de solo de permeabilidade elevada com raio r_w (Figura 2). Nas análises que simulam consolidação radial ou consolidação combinada é colocada uma barra de elevada rigidez na superfície da camada por forma a impor a condição de deformação vertical uniforme à superfície do terreno, e permitir a comparação com a solução de Barron para essa situação.

No Quadro 1 apresentam-se os parâmetros geotécnicos adotados para o solo, que assumem valores típicos para argilas normalmente consolidadas. Os parâmetros incluídos no Quadro 1 correspondem aos parâmetros de entrada dos modelos constitutivos Soft Soil e Soft Soil Creep.

Quadro 1 - Parâmetros geotécnicos adotados para o solo

Símbolo (unidades)	Variável	Valores
$\gamma_{seco} (kN/m^3)$	Peso volúmico seco	15
$\gamma_{saturado} (kN/m^3)$	Peso volúmico saturado	17
$e_0 (---)$	Índice de vazios inicial	1,4
$\phi' (^\circ)$	Ângulo de resistência ao corte	26
$c (kPa)$	Coesão (*)	1
$k (m/s)$	Coefficiente de permeabilidade	1×10^{-9}
$\nu (---)$	Coefficiente de Poisson	0,3
$C_c (---)$	Índice de compressibilidade	0,6
$C_s (---)$	Índice de expansibilidade	0,08
$C_\alpha (---)$	Coefficiente de compressão secundária	0,03

(*) Para garantir a estabilidade numérica do processo de cálculo;

Nas análises em que se utiliza o modelo isotrópico elástico linear é necessário especificar apenas a permeabilidade do solo e duas constante elásticas, neste caso o módulo de Young, E , e o coeficiente de Poisson, ν . Os valores adoptados para a permeabilidade e coeficiente de Poisson são aqueles que constam no Quadro 1. O valor adoptado para o módulo de Young foi calculado, para cada caso, a partir da Equação 9:

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{m_v(1-\nu)} \quad [9]$$

Em que m_v é o coeficiente de compressibilidade volumétrica determinado a meia altura da camada de solo, para o incremento de tensões aplicado, através da Equação 10:

$$m_v = \frac{1}{1+e_0} \times \left| \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \right| \quad [10]$$

Em que $|\Delta e| = C_c \times \Delta \log \sigma'_v$ é a variação de índice de vazios e $\Delta \sigma'_v$ é o incremento de tensão vertical efectiva (igual a 50kPa, para o caso em análise). Este valor de m_v , em conjunto com o valor da permeabilidade, é utilizado para determinar o valor do coeficiente de consolidação c_v ou c_h a utilizar nas soluções de Terzaghi e Barron. Este procedimento é utilizado por forma a permitir a comparação entre os resultados obtidos com os vários modelos. Desta forma o módulo de Young adoptado nas análises com o modelo elástico linear conduz a uma compressibilidade (constante) equivalente, a um solo com as características apresentadas no Quadro 1, para a situação analisada. Nas análises com os modelos SS e SSC a deformabilidade do solo (ou seja o parâmetro E ou m_v) varia com o nível de tensão efectiva no solo, isto é, com a profundidade e ao longo do processo de consolidação.

Os parâmetros geotécnicos adoptados para o material dreno (na situação em que o dreno é materializada por uma coluna de material de elevada permeabilidade) são idênticos àqueles adoptados para o solo argiloso com a excepção da permeabilidade que se assume igual a $k=0,1$ m/s. Pretende-se, assim, minimizar a ocorrência de transferência de tensões, que ocorreria caso se atribuísse ao material dreno uma rigidez diferente daquela do solo argiloso. O valor adoptado para a permeabilidade do dreno garante que a resistência hidráulica do dreno é desprezável.

As tensões iniciais foram calculadas utilizando os pesos volúmicos indicados no Quadro 1 e um coeficiente de impulso em repouso igual a $K_0 = \nu/(1-\nu)$, nas análises em se utiliza o modelo linear elástico, e igual a $K_0 = 1 - \sin \phi'$ nas análises em que se empregam os modelos SS e SSC. Adicionalmente considerou-se que o nível freático se encontra na base da amostra; embora este pressuposto seja irrealista não tem repercussões nos resultados das análises uma vez que se pretende estudar o processo de dissipação dos excessos de pressão intersticial gerados por aplicação de carregamento, e não o valor absoluto das pressões intersticiais.

Em todos os modelos realizados a malha utilizada é composta por elementos finitos de 15 nós. Na Figura 3 mostram-se dois exemplos das malhas de elementos finitos utilizadas.

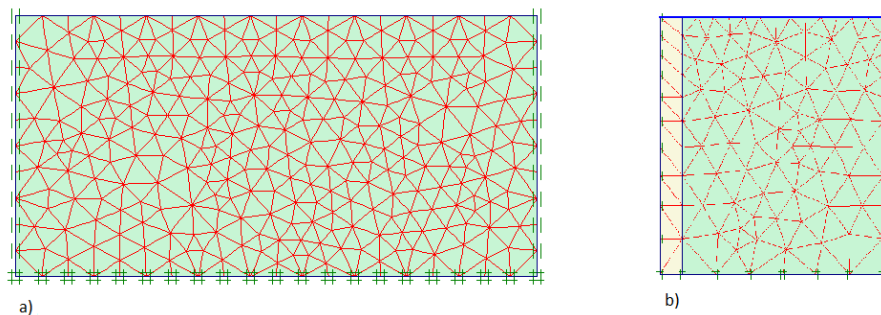


Figura 3 – Exemplos de malhas de elementos finitos adoptada (a) consolidação vertical; (b) consolidação radial em que o dreno é materializado por uma coluna de solo de permeabilidade elevada.

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 Consolidação Vertical

As análises numéricas efectuadas simulam a consolidação de estratos de espessura variável, de 2cm (correspondente a um ensaio edométrico), 20cm, 2m e 10m (representativo de um estrato em obra), após a aplicação rápida de um incremento de tensão vertical de 50kPa (50-100kPa) à superfície do terreno, em que se impõe que a consolidação é puramente vertical e a base do estrato é uma fronteira impermeável.

A Figura 4 apresenta a evolução do excesso de pressão intersticial na base do estrato (fronteira impermeável) ao longo do tempo, obtida com o modelo elástico-linear, modelo Soft Soil e modelo Soft Soil Creep. A Figura 4 incluiu ainda os resultados obtidos por aplicação da solução de Terzaghi (Equação 3).

A análise da Figura 4 permite fazer as seguintes observações:

- i) Em todos os casos, o tempo necessário para atingir um determinado grau de consolidação é aproximadamente proporcional ao quadrado da espessura da camada (maior distância de percolação) como previsto pela solução de Terzaghi.

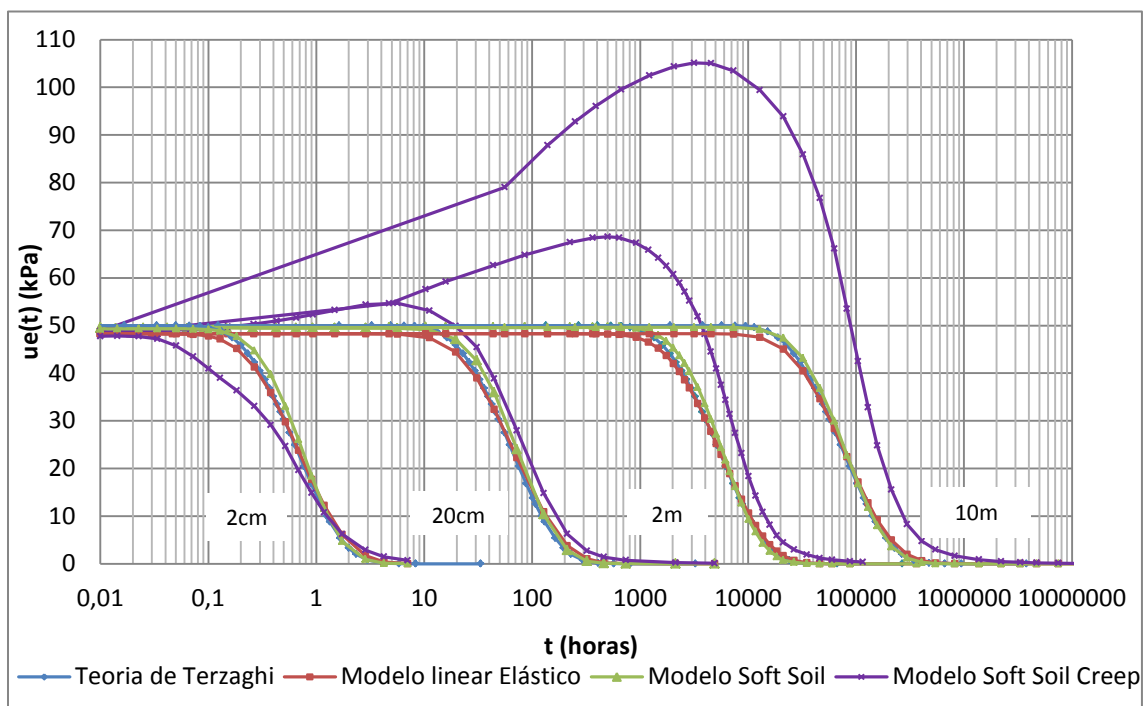


Figura 4 - Variação do excesso de pressão intersticial na base

- ii) Os resultados obtidos com a solução de Terzaghi e o modelo elástico-linear são coincidentes, uma vez que se baseiam nos mesmos pressupostos e em parâmetros equivalentes, que conduzem ao mesmo valor de coeficiente de consolidação, c_v . Estes resultados pressupõem que o c_v é uma constante do solo e se mantém constante durante o processo de consolidação. O valor de c_v adoptado é igual ao valor médio determinado a meia altura da camada de solo, para o incremento de tensões aplicado, como descrito na secção 2.
- iii) O modelo Soft Soil tem em consideração a variação da rigidez do solo com o nível de tensão, e portanto a variação do coeficiente de consolidação c_v , em profundidade e ao longo do processo de consolidação (m_v diminui e c_v aumenta com o nível de tensão). A Figura 4 mostra que os resultados obtidos com o modelo Soft Soil e o modelo elástico linear são em geral semelhantes; observam-se diferenças, nomeadamente, que o modelo Soft Soil prevê maiores excessos de pressão intersticial no início e menores no fim do processo de consolidação, que o modelo elástico linear para o mesmo instante de tempo.
- iv) Os resultados obtidos com o modelo Soft Soil Creep divergem significativamente dos obtidos com os restantes modelos. Para os estratos com 0,2m, 2m e 10m o modelo Soft Soil Creep prevê, no início do

processo de consolidação, a ocorrência de excessos de pressão intersticial junto à fronteira impermeável muito superiores àqueles que seriam expectáveis para o incremento da tensão vertical imposto, igual a 50kPa. Este acréscimo é tanto maior quanto mais espessa é a camada. Apenas para o estrato com 2 centímetros não é visível este fenómeno e, em vez disso, verifica-se que a dissipação do excesso de pressão intersticial, no início da consolidação, é mais rápida do que o previsto pela teoria de Terzaghi (e restantes modelos considerados).

Este comportamento é explicado pela formulação do modelo Soft Soil Creep que prevê a ocorrência de deformação a tensão efectiva constante durante todo o processo de consolidação e após. Para os estratos com espessura igual a 0,2m ou superior, devido à maior distância à fronteira drenante, mantêm-se condições não drenadas junto à fronteira impermeável por um período de tempo significativo; devido à condição imposta de volume constante junto à fronteira impermeável, o solo não pode sofrer fluência e ocorre, em vez, relaxação (diminuição da tensão a volume constante), implicando um acréscimo de pressões intersticiais.

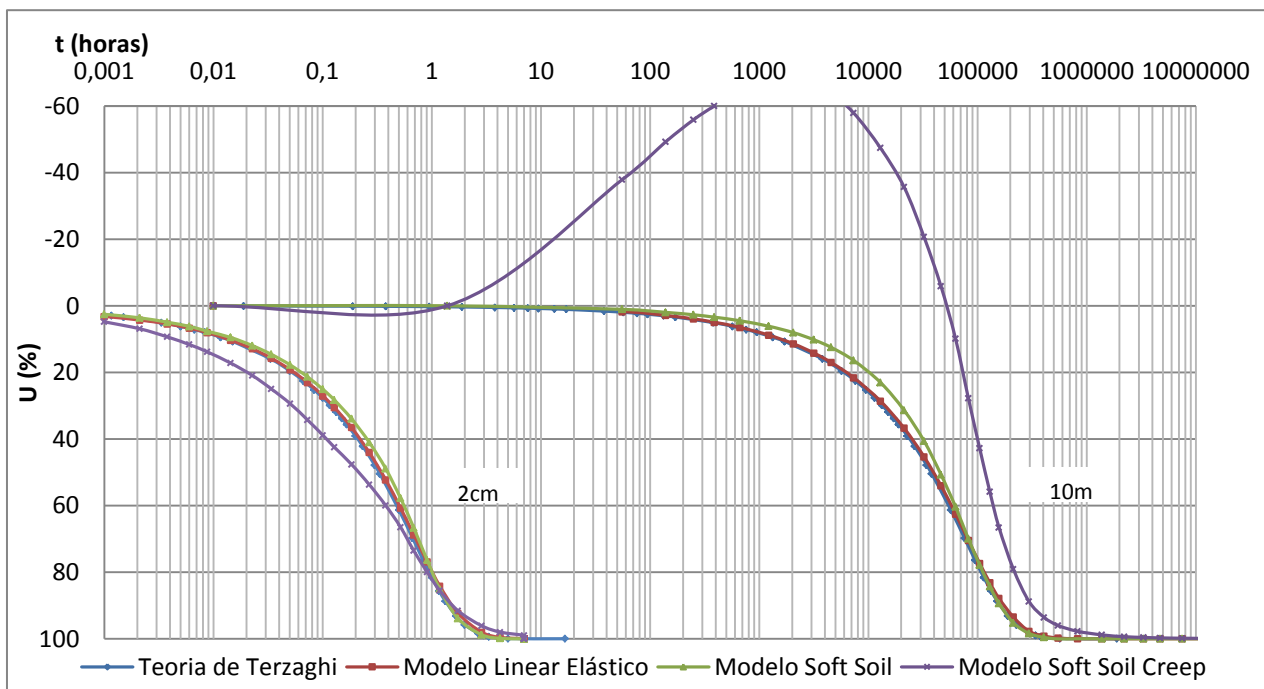


Figura 5 - Grau médio de consolidação (dissipação do excesso de pressões) para estratos de 2cm e 10m (consolidação vertical)

A Figura 5 mostra a evolução do grau médio de consolidação (ou grau médio de dissipação dos excessos de pressão intersticial) de estratos de 2cm e 10m. Muitas das observações a fazer a respeito desta figura foram já referidas a propósito da Figura 4. Acresce dizer que:

- i) O modelo Soft Soil, em comparação com os modelos elásticos (modelo elástico-linear e Teoria de Terzaghi), prevê que a consolidação é mais lenta numa fase inicial e mais rápida na fase final da consolidação. Os modelos elásticos assumem que o c_v é constante enquanto que o modelo Soft Soil prevê que o c_v aumenta durante a consolidação (devido à diminuição de m_v com o aumento da tensão efectiva), o que justifica o comportamento observado. À medida que o excesso de pressões intersticiais se vai dissipando nas camadas superficiais o coeficiente de consolidação, c_v , vai aumentando gradualmente, devido ao aumento da tensão efectiva e ao facto da dissipação se dar subsequentemente a maior profundidade. No início do processo de consolidação o c_v é inferior ao do modelo elástico-linear porque o modelo elástico-linear toma o valor no ponto médio do estrato, no intervalo de tensões aí aplicadas.
- ii) O efeito da variação do coeficiente de consolidação com o nível de tensão é tanto mais notório quanto mais espesso é o estrato. No entanto, para as situações aqui analisadas, a diferença observada entre os modelos elástico linear e Soft Soil não é significativa, em particular próximo do fim da consolidação,

e em comparação com os erros que são potencialmente introduzidos pela incerteza na determinação das características geotécnicas do solo.

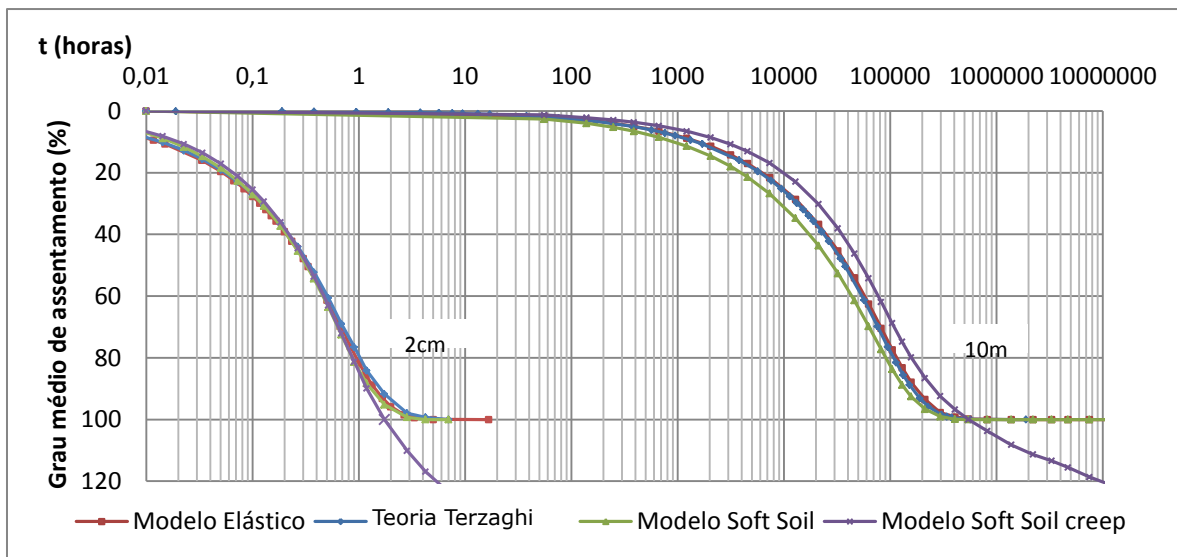


Figura 6 - Grau médio de assentamento para estratos de 2cm e 10m - consolidação vertical

A Figura 6 apresenta a variação do grau médio de assentamento para estratos com 10m e 2cm de espessura. O grau médio de assentamento é a razão entre o assentamento num dado instante e o assentamento no final da consolidação. Quando se emprega o modelo Soft Soil Creep assume-se que o assentamento no fim da consolidação é o assentamento registado para um grau médio consolidação (dissipação do excesso de pressão intersticial) igual a 95%. Na Figura 6 é possível observar que:

- i) De acordo com a teoria de Terzaghi (e o modelo elástico linear) o grau médio de consolidação é coincidente com o grau de assentamento, dado que se admite uma relação linear e única entre o índice de vazios e a tensão vertical efectiva. Desta forma, a curva obtida por aplicação da teoria de Terzaghi pode ser usada como referência para comparar o grau médio de assentamento e consolidação obtidas pelos restantes modelos, que se ilustram separadamente nas Figuras 5 e 6.
- ii) O grau de assentamento obtido com o modelo Soft Soil evolui de forma ligeiramente mais rápida do que o obtido com os modelos elásticos, ou seja a curva encontra-se deslocada para a esquerda. Estes resultados decorrem da adopção de um m_v variável com o nível de tensão durante o processo de consolidação. Acresce que, devido à localização da fronteira drenante, a dissipação dos excessos de pressão intersticial (e associada deformação volumétrica) ocorre primeiro junto à superfície do terreno onde o solo é mais deformável (sujeito a tensões menores).
- iii) No modelo Soft Soil Creep a fluência faz com que o grau médio de assentamento evolua para além do valor de 100%, aumentando aproximadamente de forma linear com o logaritmo do tempo após o fim da consolidação primária. Observa-se que a evolução do grau de assentamento previsto pelo modelo Soft Soil Creep tem o mesmo andamento que o obtido com a teoria de Terzaghi, mas move-se ligeiramente para a direita (mais lento) à medida que a espessura do estrato aumenta. Esta diferença parece estar associada à escolha do instante de tempo em que o grau médio de assentamento é considerado igual a 100%.
- iv) Em qualquer dos casos considera-se a evolução do grau médio de assentamento prevista pelos vários modelos é muito semelhante e é bem reproduzida pela teoria de Terzaghi.
- v) Comparando as Figuras 5 e 6 verifica-se que quando se considera o efeito da fluência, e para camadas de solo de espessura elevada (10 metros), podem ocorrer diferenças muito significativas entre o grau médio de assentamento e consolidação, sendo o primeiro significativamente superior ao segundo. Esta situação faz com que na prática, em obra, se deva quantificar o grau médio de consolidação sempre com recurso a piezómetros e não por extrapolação do grau de assentamento. A diferença entre o grau

de assentamento e o grau de dissipação será tanto maior quanto mais importante for o efeito da fluência no solo em estudo e a espessura do estrato.

3.2 Consolidação Radial

A análise da consolidação radial é dividida em duas partes. Numa primeira fase é apresentado um conjunto de análises com recurso ao modelo elástico-linear em que se analisa a influência da variação das características geométricas e o modo como é materializado o dreno. Seguidamente, analisam-se as implicações da consideração da não linearidade dos solos (com a utilização do modelo Soft Soil) e da fluência (com a utilização do modelo Soft Soil Creep).

Com o intuito de compreender as implicações da utilização da condição de fronteira *drain* procedeu-se à análise da consolidação de uma coluna de solo com 10 m de espessura e raio variável igual a 0,5m, 1,0m e 2,0m com um dreno no eixo, materializado pela condição de fronteira "drain". A Figura 7 mostra a evolução do grau médio de consolidação com o factor de tempo adimensional, T_h , por forma a permitir a comparação de modelos com diferentes raios de influência, que implicam diferentes tempos de consolidação. A série 500 corresponde à solução de Barron (equação [7]), em que o valor 500 representa a relação entre o raio de influência e o raio do dreno, ou seja o valor de n .

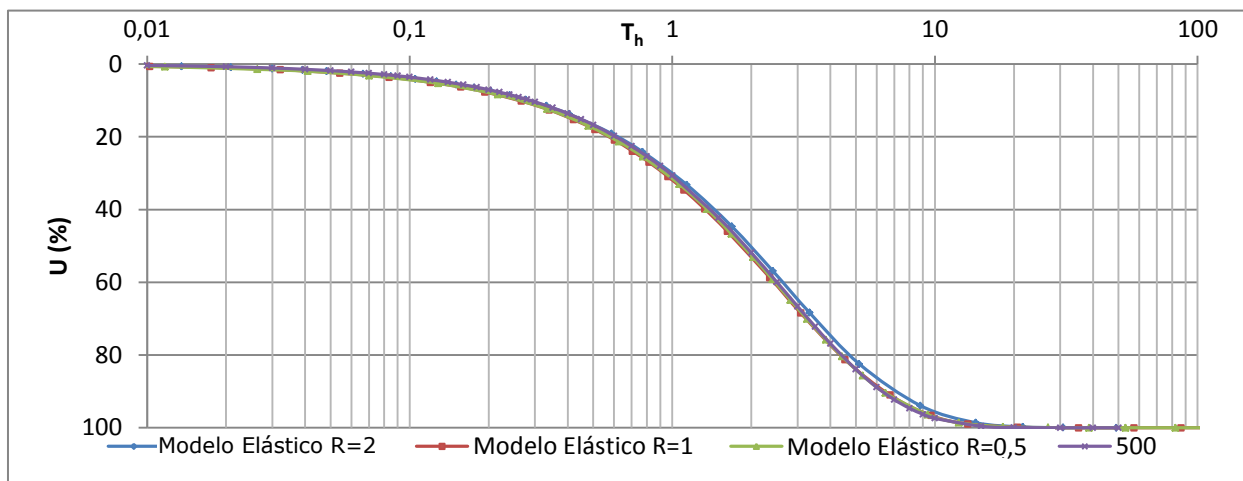


Figura 7 - - Análise da influência da condição de fronteira *drain* em modelos elástico-lineares - consolidação radial

A Figura 7 permite observar que as curvas de consolidação são muito semelhantes entre si e próximas da solução de Barron para $n=500$. Conclui-se assim, que sempre que é utilizada a condição de fronteira *drain* para materializar drenos inseridos num solo com $k_h = 10^{-9}m/s$ obtém-se uma resposta correspondente a um n muito elevado próximo de 500. Uma vez que os resultados para as 3 situações correspondem à solução de Barron para n aproximadamente igual a 500, verifica-se que o tempo para atingir um dado grau de consolidação médio é aproximadamente proporcional ao quadrado do raio de influência.

Análises adicionais, não incluídas neste artigo, permitiram concluir que o valor n de Barron, associado à condição de fronteira *drain* varia de forma muito significativa com a permeabilidade do solo em que está inserido e as condições de simetria (análise em axissimetria ou estado plano de deformação).

Ao constatar-se que n de Barron obtido nestas simulações com a condição de fronteira *drain* não tem qualquer correspondência real com a geometria modelada, conclui-se que esta é somente uma ferramenta do programa Plaxis 2D que representa uma superfície em que o excesso de pressões intersticiais é nulo. A utilização desta condição deve ser cuidadosa e ensaiada sempre que seja utilizada em projeto para a representação de drenos verticais, uma vez que o raio de dreno que pode representar vai variar de modelo para modelo e depende da permeabilidade do solo.

A Figura 8 apresenta a evolução do grau médio de consolidação com o tempo, durante a consolidação de uma coluna de solo com 10 metros de espessura e 2 metros de raio, em que o dreno é materializado através da condição de fronteira *drain*, utilizando diferentes modelos constitutivos (Elástico-linear, SSM e SSCM). Nesta secção apenas é considerado um estrato com 10 m de espessura porque a consolidação radial é

independente da espessura do estrato e em termos geométricos depende apenas do raio de influência do dreno (caminho máximo de percolação) e o raio do dreno.

De forma idêntica ao verificado para a consolidação vertical observa-se que:

- i) Para o modelo elástico linear, o grau médio de consolidação é igual ao grau médio de assentamento;
- ii) Para o modelo Soft Soil, o grau médio de consolidação é muito próximo do grau médio de assentamento, sendo as diferenças associadas com o facto do modelo Soft Soil considerar a variabilidade da rigidez do solo com o nível de tensão (m_v diminui e c_v aumenta). No caso de consolidação radial as diferenças são menores do que as observadas na consolidação vertical, uma vez que a dissipação de excessos de pressão intersticial, e conseqüentemente a deformação volumétrica ocorre primeiro junto ao dreno, sendo independente da profundidade; U_s e U_c obtido pelo modelo Soft Soil é muito próximo daquele obtido com o modelo elástico linear.
- iii) À semelhança do que se verifica na consolidação vertical, quando se considera o efeito da fluência observa-se um acréscimo do excesso de pressões intersticiais no início da consolidação, em relação ao gerado pela aplicação do carregamento à superfície, o que faz com que o grau médio de consolidação atinja valores negativos. Este fenómeno é justificado pela prevalência de condições não drenadas junto da fronteira impermeável, por um período de tempo significativo, que leva à ocorrência de relaxação das tensões efectivas.
- iv) O grau médio de assentamento (U_s) previsto pelo Soft Soil Creep é ligeiramente inferior àquele dado pelo modelo elástico e o modelo Soft Soil, o que poderá advir da definição do valor de assentamento no final da consolidação. Para o modelo Soft Soil Creep o grau médio de assentamento é muito superior ao grau médio de consolidação. Como referido, este aspecto tem implicações importantes para o projecto

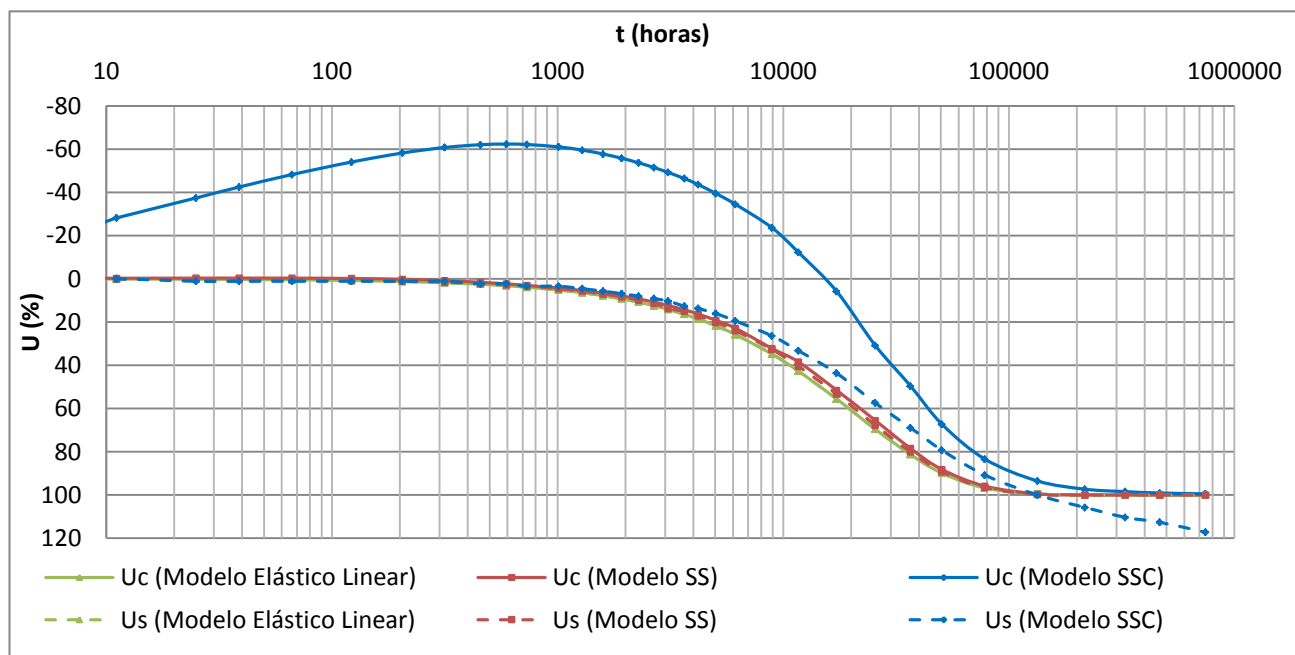


Figura 8 - Variação do grau médio de consolidação e assentamento durante a consolidação radial de um estrato de 10m com raio de influência de 2m utilizando a condição de fronteira drain

3.3 Consolidação combinada (vertical + radial)

A Figura 9 apresenta a evolução do grau médio de consolidação com o tempo, obtido através da equação teórica de Carrillo, durante a consolidação de estratos com 2 e 10 metros de espessura, em que se varia o valor de n - a razão entre o raio de influência e o raio do dreno - admitindo a ocorrência de consolidação vertical e radial, em simultâneo. Constata-se que a colocação de drenos verticais no solo desempenha um

papel mais preponderante na aceleração da consolidação em camadas de solo mais espessas. No caso da camada de 2 metros de espessura, a variação de n (ou espaçamento dos drenos) tem um efeito mínimo na redução do tempo para atingir o fim da consolidação, enquanto que na camada de 10 metros, este efeito é muito significativo.

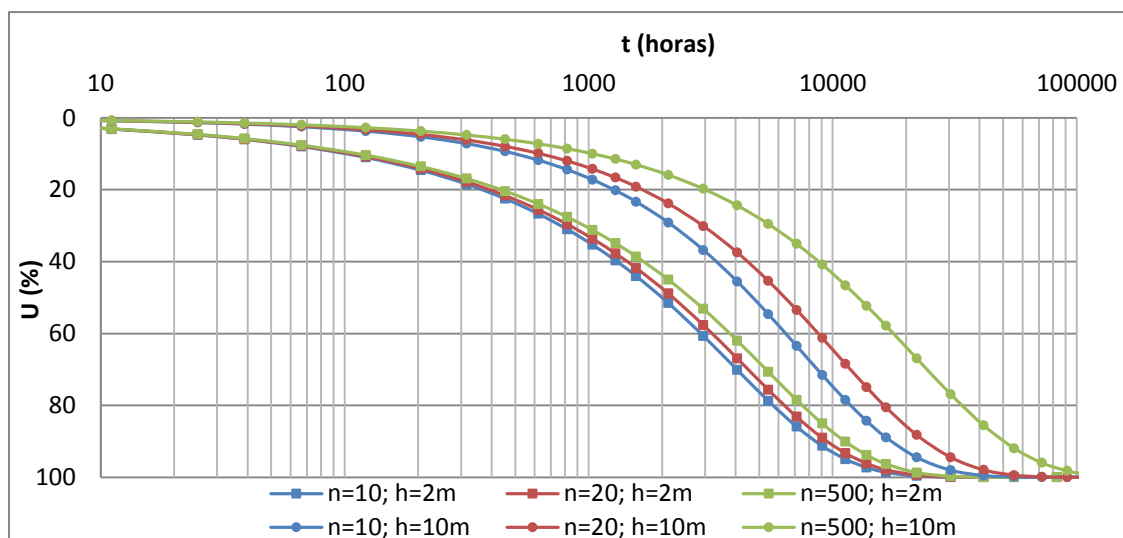


Figura 9 - Evolução do grau de consolidação por aplicação do teorema de Carrillo para estratos de 2m e 10m variando o valor de n – consolidação combinada

A Figura 10 mostra a variação do grau médio de consolidação com o tempo durante a consolidação de uma coluna com 2 e 10 metros de espessura e 2 metros de raio, quando se permite consolidação vertical e radial simultânea, em que os drenos são materializados pela condição de fronteira *drain* e se utilizam os modelos constitutivos elástico-linear, Soft Soil e Soft Soil Creep.

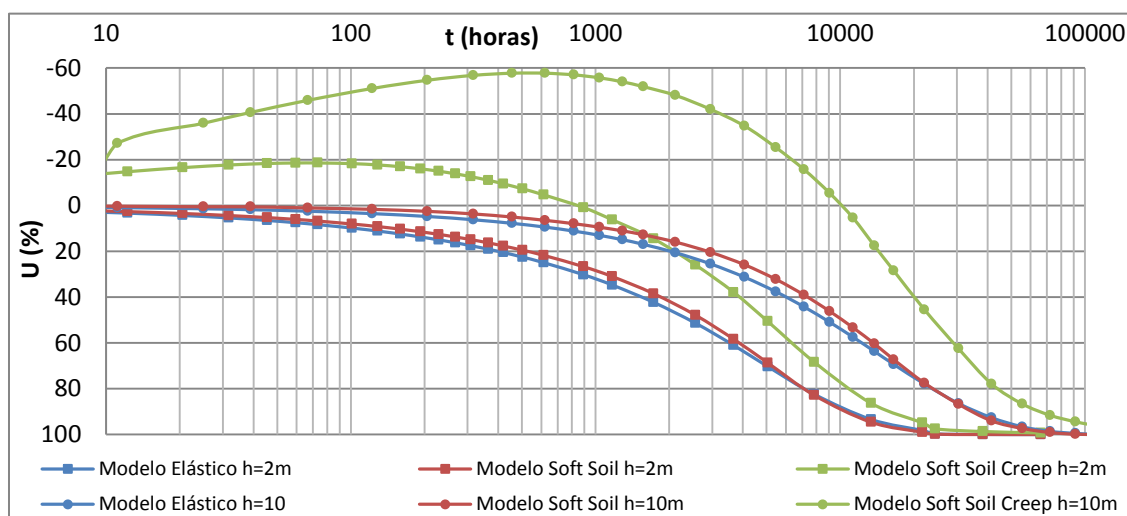


Figura 10 - Evolução do grau médio de consolidação para estrato de 2m e 10m sob consolidação combinada

Com base na Figura 10 podemos concluir que o que foi dito nas secções 3.1 e 3.2, relativamente ao efeito da não linearidade da rigidez do solo e da ocorrência de deformações por fluência durante o processo de consolidação vertical e radial, é aplicável para a consolidação combinada.

4 PREVISÃO DE ASSENTAMENTOS

Para compreender e quantificar o efeito da fluência na previsão dos assentamentos por consolidação e duração do processo de consolidação, recorre-se à informação que se apresenta no Quadro 2. O Quadro 2 inclui informação sobre a deformação de estratos com diferentes espessuras, sujeitos a consolidação puramente vertical, no final da consolidação primária. Considera-se o fim da consolidação primária o

instante em que o grau médio de consolidação (dissipação de excesso de pressões intersticiais) é igual a de 95%. Os valores obtidos com o modelo Soft Soil Creep são comparados com os valores obtidos com o modelo Soft Soil, que não considera o efeito da fluência.

Quadro 2 -Dados relativos aos assentamentos no final da compressão primária no caso de consolidação puramente vertical

Espessura (m)	0,02	0,2	2	10
Tempo para atingir o fim da consolidação primária (EOP) (SSC Model)	2,9 horas	13,4 dias	37,2 meses	95,4 anos
Taxa de deformação (SSC Model) (1/s) no EOP	7,00E-07	7,30E-09	9,83E-11	4,27E-12
Assentamento (SSC Model) (mm)	1,31	18,08	207,32	997,26
Assentamento (SS Model) (mm)	1,47	14,71	126,05	407,65

Como seria de esperar, verifica-se que o assentamento e o tempo necessário para atingir o fim da consolidação aumentam com a espessura da camada, independentemente do modelo constitutivo adoptado.

A ocorrência de deformações por fluência durante o processo de consolidação, prevista pelo modelo Soft Soil Creep, justifica que, para uma dada espessura de camada, o assentamento obtido com o modelo Soft Soil Creep é maior do que o obtido com o modelo Soft Soil, e a diferença aumenta com a duração do processo de consolidação. Isto pode ser observado no Quadro 2 para as camadas de 0,2 m, 2 m e 10m. Apenas a camada de 0,02 m, representativa de um ensaio edométrico, apresenta um assentamento no fim da consolidação inferior quando se considera a fluência. Isto deve-se ao facto de o fim da consolidação primária ocorrer para $t = 2,9$ horas e a curva de compressibilidade especificada no modelo Soft Soil corresponder a 24 horas.

Os valores da taxa de deformação no fim da consolidação primária obtidos pelo modelo Soft Soil Creep foram calculados através dos valores do assentamento no fim da consolidação e no instante de tempo subsequente. Verifica-se que a taxa de deformação no final da compressão primária evolui da forma prevista, diminuindo com o aumento da espessura das camadas. Durante um processo de consolidação a taxa de deformação diminui ao longo do tempo. Desta forma, quanto mais demorado for o processo de consolidação, menor a taxa de deformação no fim da consolidação.

No Quadro 3 apresentam-se os valores da extensão vertical média no final da consolidação primária obtidos através do programa de elementos finitos para os modelos Soft Soil (SSM) e Soft Soil Creep (SSCM), calculadas como a razão entre o assentamento e a altura inicial da camada.

Quadro 3 - Valores da extensão vertical no fim da consolidação primária para camadas com diferentes espessuras em consolidação vertical

Estrato	ϵ_v SSM	ϵ_v SSCM	ϵ_v só por efeito da fluência
0,02 m	0,0735	0,066	-0,0080
0,2 m	0,0736	0,090	0,0169
2 m	0,0630	0,104	0,0406
10 m	0,0408	0,100	0,0590

Com o modelo Soft Soil a extensão vertical no fim da consolidação primária diminui com o aumento da espessura do estrato de solo, porque diminui a rigidez média (aumenta a tensão efectiva no ponto médio).

Com o modelo Soft Soil Creep a extensão vertical parece aumentar com a espessura da camada, mas a relação não é clara. O primeiro modelo considera a variação da rigidez em profundidade enquanto o segundo considera adicionalmente o efeito da fluência. Ao fazer-se a diferença entre as extensões previstas pelos dois modelos pode isolar-se o efeito da fluência. Observa-se, então, que a contribuição do efeito da fluência para o valor final da extensão aumenta com o aumento da espessura da camada.

Os Quadros 4 e 5 ilustram o efeito da aplicação de drenos verticais num estrato de 2 metros e 10 metros, respectivamente, com diferentes raios de influência. O objectivo é observar que alterações ocorrem na duração da consolidação e na taxa de deformação vertical no fim da consolidação primária.

Quadro 4 - Efeito da aplicação de drenos verticais na aceleração da consolidação de um estrato de 2m

	Sem drenos	R=2	R=1
Tempo (meses)	37,2	30,2	6,2
Taxa de deformação (1/s)	9,83E-11	4,54E-10	6,45E-10

Quadro 5 - Efeito da aplicação de drenos verticais na aceleração da consolidação de um estrato de 10m

	Sem drenos	R=2	R=1
Tempo (s)	1144,4	138,8	42,3
Taxa de deformação (1/s)	4,27E-12	2,59E-11	7,38E-11

Os quadros permitem concluir que a aplicação de drenos verticais tem um peso importante na diminuição do tempo de consolidação, principalmente se os drenos forem dispostos segundo um afastamento muito inferior à espessura do estrato. A taxa de deformação no final da consolidação varia de forma inversa com o tempo necessário para atingir o fim da consolidação.

No Quadro 6 apresentam-se os assentamentos no final da consolidação primária e 50 anos após a mesma, para um estrato de 10 metros de espessura, para a situação sem drenos verticais e com drenos com raio de influência igual a 1m e 2m. Observa-se que o assentamento no fim da compressão primária é tanto maior quanto mais rápida for a consolidação primária (maior taxa de deformação no fim da consolidação primária - EOP) mas que o assentamento total 50 anos após o EOP é idêntico nos três casos analisados. Isto significa que, com a aceleração da consolidação ocorre um aumento dos assentamentos por fluência pura, após o EOP, que no caso em que o raio de influência do dreno é igual a 1m (R=1m) se estima em 20cm.

Quadro 6 - Previsão de assentamentos no fim do período de vida útil (50 anos) para um estrato de 10 metros após o final da compressão primária

Raio influência (m)	Fim da compressão primária (m)	Após 50 anos (m)	Diferença (m)
1	0,811	1,010	0,199
2	0,881	1,010	0,129
sem drenos	0,997	1,030	0,033

Os resultados apresentados no Quadro 6 levam a sugerir o uso cuidadoso das técnicas de aceleração da consolidação. Pois, se é verdade que permitem atingir o grau de consolidação pretendido mais rapidamente, também é verdade que atingem esse instante com uma taxa de deformação superior, o que pode originar deslocamentos pós construtivos por fluência não desprezáveis.

As análises efectuadas assumem que após a aplicação das cargas definitivas o solo se encontra normalmente consolidado (utilização do princípio do "quanto baste" no dimensionamento da pré-carga). Caso as tensões impostas pela pré-carga sejam superiores àquelas que serão impostas pela estrutura definitiva (aumentando o valor da pré-carga ou o tempo de aplicação da mesma), o solo ficará num estado ligeiramente sobreconsolidado em condições de serviço, o que poderá permitir reduzir o assentamento por fluência (Alonso et al., 2000).

5 Conclusões

Este artigo apresenta um estudo numérico, pelo método dos elementos finitos, utilizando o programa Plaxis 2D, em que se analisa a consolidação de estratos de diferentes espessuras sob consolidação vertical, radial e combinada, utilizando vários modelos constitutivos.

Verificou-se que a não consideração da variação da rigidez do solo com o nível de tensão conduz a erros pouco significativas na evolução do grau médio de consolidação e do excesso de pressão intersticial junto à fronteira impermeável com o tempo, em comparação com os erros introduzidos pela incerteza na determinação das características geotécnicas do solo. Contudo, a variação da rigidez do solo com o nível de tensão tem implicações muito importantes na estimativa do valor dos assentamentos.

A consideração da ocorrência da fluência durante o processo de consolidação conduz a diferenças importantes entre o grau médio de assentamento e consolidação, verificando-se que o primeiro é em geral superior ao segundo. Esta situação faz com que na prática, em obra, se deva quantificar o grau médio de consolidação sempre com recurso a piezómetros e não por extrapolação do grau de assentamento. A diferença entre o grau de assentamento e o grau de dissipação será tanto maior quanto mais importante for o efeito da fluência no solo em estudo e a espessura do estrato.

A aplicação de drenos verticais diminui o tempo necessário para a conclusão do processo de consolidação o que provoca um aumento da taxa de deformação no final da mesma. Consequentemente os assentamentos pós consolidação, por fluência pura, aumentam podendo mesmo deixar de ser desprezáveis.

Os resultados aqui apresentados deverão ser validados através da análise de casos de obra em que são utilizados drenos verticais como técnica de aceleração da consolidação, por forma a permitir a comparação dos resultados numéricos com os valores observados em obra. Sugere-se também a análise do efeito do grau de sobreconsolidação na diminuição dos assentamentos pós construtivos.

6 Bibliografia

- Augustensen, A., Liingaard, M., & Lade, P. V. (2004). Evaluation of Time-Dependent Behavior of Soils. *International Journal of Geomechanics, ASCE*.
- Barron, R. A. (1948). Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells. *Transactions of ASCE, 113(2346)*, 718-724.
- Brinkgreve, R., Broere, W., & Waterman, D. (2002). *Plaxis 2D- Version 8 - Reference Manual*. Delft: A. A. Balkema Publishers.
- Budhu, M. (2000). *Soil Mechanics and Foundations*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Buisman, K. (1936). Results of long duration settlement tests. *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1*, pp. 103-107.
- Butterfield, R. (1979). A natural compression law for soils (an advance on e -log p') (technical note). *Géotechnique 29(4)*, 469-480.
- Carrillo, N. (1942). Simple two and three dimensional consolidation. *Jnl. Math. and Phys*, vol 21, no.1.
- Hausmann, M. R. (1990). *Engineering principles of ground modification*. New York: McGraw-Hill .

- Leroueil, S. K. (1985). Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays. *Géotechnique* 35, 159-180.
- Maranha das Neves, E. (2006). *Mecânica dos Solos e das Rochas*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Maranha das Neves, E. (2007). *Modelação Avançada em Geotecnia*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Matos Fernandes, M. d. (2011). *Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais* (2ª Edição ed., Vol. Volume 1). Porto: FEUP edições.
- Mesri, G., & Choi, Y. (1985). Settlement analysis of embankments on soft clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111, 441 – 464.
- Terzaghi, K. (1923). Die Berechnung der Durchlaassigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungserscheinungen. *Szber Akademie Wissenschaft Vienna, Mathnaturwissenschaft Klasse IIa*, 132, 125-138.
- Terzaghi, K. v., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3ª ed.). Wiley-Interscience.
- Van Impe, W. (1989). *Soil Improvement Techniques and their Evolution*. Roterdão, Países Baixos: A.A. Balkema.