

ATERROS SOBRE SOLOS MOLES REFORÇADOS COM COLUNAS DE JET-GROUTING ENCABEÇADAS POR LAJE DE BETÃO ARMADO: ANÁLISE DOS EFEITOS DA DEFORMABILIDADE DAS COLUNAS E DO SEU ESPAÇAMENTO

EMBANKMENTS ON SOFT SOILS REINFORCED WITH JET-GROUT COLUMNS HEADED BY REINFORCED-CONCRETE SLAB: ANALYSIS OF THE EFFECTS OF THE COLUMN DEFORMABILITY AND SPACING

Gonçalves, José Ribeiro, *FEUP, Porto, Portugal, ec04204@fe.up.pt*

Borges, José Leitão, *FEUP, Porto, Portugal, leitao@fe.up.pt*

RESUMO

Usando um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos, é realizado um estudo paramétrico para avaliação dos efeitos da deformabilidade das colunas e do seu espaçamento no comportamento de um aterro sobre solos moles reforçados com colunas de jet-grouting encabeçadas por plataforma de transferência de carga (PTC) em betão armado. Utiliza-se o conceito de célula unitária, que consiste numa coluna de jet-grouting e no solo mole envolvente, na PTC em betão armado e no aterro da sua área de influência, com comportamento axissimétrico confinado. O modelo numérico incorpora a teoria multidimensional de consolidação de Biot (formulação acoplada das equações de equilíbrio e de escoamento) com relações constitutivas do solo simuladas pelo modelo de estados críticos $p-q-\theta$. É dada especial atenção à análise dos assentamentos, dos excessos de pressão neutra, dos esforços na PTC de betão armado, do coeficiente de redução dos assentamentos e do coeficiente de eficácia do sistema de reforço.

ABSTRACT

Using a numerical model based on the finite element method, a parametric study is conducted to evaluate the effects of the column deformability and of the column spacing on the behaviour of an embankment on soft soils reinforced with jet-grout columns headed by a reinforced-concrete load transfer platform (LTP). The unit cell formulation is used, which consists of one jet-grout column and the soft soil, reinforced-concrete LTP and embankment fill from its influence area, with confined axisymmetric behaviour. The numerical model incorporates the Biot consolidation theory with the soil constitutive relations simulated by the $p-q-\theta$ critical state model. Special emphasis is given to the analysis of the settlements, excess pore pressures, stresses in the reinforced-concrete LTP, settlement reduction coefficient and reinforcement efficiency coefficient.

1. PREÂMBULO

Variadíssimas técnicas têm sido utilizadas para melhorar o comportamento de obras de aterro sobre solos moles, podendo destacar-se a técnica de pré-carga ou sobrecarga temporal, a remoção-substituição do solo mole, a utilização de drenos verticais, o reforço com colunas de brita, a construção do aterro por fases e o reforço com colunas rígidas encabeçadas por plataformas de transferência de carga (PTC). As vantagens da solução de reforço através de plataformas de

transferência de carga sobre colunas prendem-se essencialmente com a redução significativa dos assentamentos totais e diferenciais, tanto na base da PTC como no topo do aterro, e com a possibilidade da construção do aterro numa etapa única, evitando intervalos de tempo prolongados. As plataformas de transferência de carga podem ser constituídas por diversos materiais, dentro dos quais se destacam os geossintéticos e o betão armado (Gonçalves, 2009).

Neste artigo, usando um programa de cálculo automático baseado no método dos elementos finitos (desenvolvido por Borges, 1995), é realizado um estudo paramétrico para avaliação dos efeitos de dois parâmetros (deformabilidade das colunas e do seu espaçamento) no comportamento de um aterro sobre solos moles reforçados com colunas de jet-grouting encabeçadas por plataforma de transferência de carga (PTC) em betão armado. Sinteticamente, o programa, para as aplicações em questão, possui as seguintes características (Borges, 1995): i) simulação de estados planos e axissimétricos de deformação e de escoamento; ii) formulação acoplada das equações de equilíbrio e escoamento considerando as relações constitutivas do solo (modelo elastoplástico) formuladas em tensões efectivas (extensão da teoria de consolidação multidimensional de Biot); iii) utilização do modelo de estados críticos $p-q-\theta$ na simulação do comportamento constitutivo dos solos de fundação e de aterro; iv) utilização de um modelo elástico linear bidimensional na simulação do comportamento constitutivo da coluna de jet-grouting e da PTC.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste na construção de um aterro de 3 m de altura sobre solo mole saturado, reforçado com colunas de jet-grouting encabeçadas por PTC em laje de betão armado (Figura 1a). O tempo total de execução da laje de betão armado e do aterro é de 49 dias. Considerou-se 28 dias para a execução da laje (englobando o tempo de cura do betão necessário para se atingir a resistência característica do mesmo). O aterro é executado, a ritmo constante, em 21 dias. A camada de solo argiloso tem 7 m de espessura e assenta num maciço rígido e impermeável que estabelece as condições de fronteira inferior do problema. O nível freático encontra-se à superfície do solo argiloso. As colunas de jet-grouting têm 1,3 m de diâmetro e estão dispostas segundo uma malha quadrangular em planta; o seu comprimento é igual à espessura da camada argilosa, ou seja, a extremidade inferior apoia-se no estrato rígido.

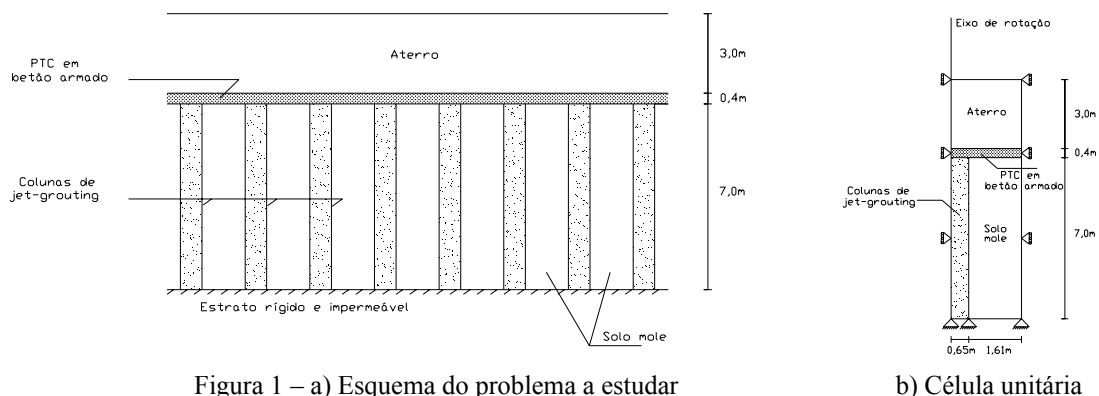


Figura 1 – a) Esquema do problema a estudar

b) Célula unitária

Dada a grande extensão planimétrica do aterro, para o estudo do problema recorreu-se ao conceito de célula fundamental ou unitária cilíndrica (Figura 1b), que consiste numa única coluna de jet-grouting e no solo mole, na PTC em betão armado e no aterro da sua área de influência, com

comportamento axissimétrico confinado. Considera-se que a área circular da célula unitária é igual à área de influência (quadrangular) de cada coluna. Para a simulação do comportamento real do solo foram impostas condições de fronteira. Os deslocamentos horizontais foram impedidos em todos os pontos da fronteira lateral da célula (superfície cilíndrica). Como o problema é limitado inferiormente por um estrato rígido que se admite indeformável, os deslocamentos verticais e horizontais da fronteira inferior da célula também foram impedidos (Figura 1b). Admitiu-se que, antes da execução da laje de betão armado, é colocada uma pequena camada de material granular, com funções drenantes, na superfície do solo mole. Desprezou-se, na simulação do problema, o comportamento mecânico desta camada, simulando somente o seu efeito drenante. Assim, como condição de fronteira, foram impostos iguais a zero os excessos de pressão neutra nessa superfície. A PTC de betão armado encontra-se localizada no topo das colunas.

Para aplicação do modelo numérico, foi necessário discretizar o meio através de elementos finitos. A Figura 2 mostra a malha de elementos finitos triangulares utilizada nas diferentes fases consideradas do cálculo.

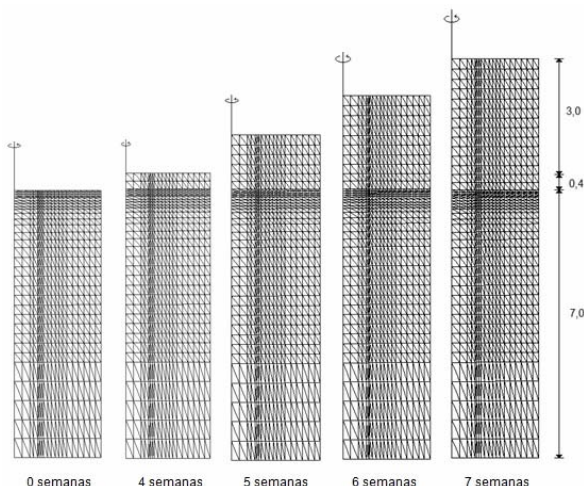


Figura 2 – Malha de elementos finitos

No Quadro 1 são apresentadas as características mecânicas e hidráulicas adoptadas para o solo mole e para o material que constitui o aterro, simulados pelo modelo de estados críticos $p-q-\theta$. No caso do material de aterro, tomou-se para o coeficiente de impulso em repouso (K_0) o valor de 0,43. No Quadro 2 são expostos os valores de K_0 e de OCR (grau de sobreconsolidação) para o solo argiloso, em profundidade. Trata-se assim de uma argila ligeiramente sobreconsolidada até à profundidade de 1,8 m e normalmente consolidada para profundidades superiores.

Quadro 1 – Características do solo argiloso e do material de aterro

Material	λ	k	Γ	ϕ' (°)	ν'	N	γ (kN/m ³)	k_x (m/s)	k_y (m/s)
Argila	0,22	0,020	3,26	30	0,25	3,400	17	10^{-9}	10^{-9}
Aterro	0,03	0,005	1,80	35	0,30	1,817	20	-	-

λ – declive da linha de compressão isotrópica em 1ª carga; k – declive das linhas de descompressão-recompressão isotrópica; Γ – volume específico do solo em estado crítico sujeito a uma tensão média efectiva de 1 kPa; ϕ' – ângulo de atrito definido em termos de tensões efectivas; ν' – coeficiente de Poisson definido em termos de tensões efectivas; N – volume específico de solo sujeito a uma compressão isotrópica de 1 kPa; γ – peso específico; k_x e k_y – permeabilidade na direcção horizontal e vertical, respectivamente.

Quadro 2 – Valores de K_0 e OCR para a argila

Profundidade (m)	K_0	OCR
0 – 1	0,7	2,43
1 – 1,8	0,7 – 0,5	2,43 – 1,00
1,8 – 7	0,5	1,00

A PTC em betão armado e as colunas de jet-grouting foram simuladas com comportamento elástico linear isotrópico. Para o betão armado da PTC foi adoptado um valor de 18 GPa como módulo de elasticidade (E) – valor estimado tendo em conta os efeitos de fluência – e considerado um coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2. O valor adoptado para a altura total da laje foi 0,40 m. As características consideradas para o jet-grouting foram as seguintes: módulo de elasticidade, $E=150$ MPa; coeficiente de Poisson, $\nu=0,22$. No estudo paramétrico realizado, foram feitos vários cálculos em que se variou somente o módulo de elasticidade das colunas de jet-grouting e o seu espaçamento. No Quadro 3 é apresentada uma síntese dos cálculos efectuados, sendo indicados também os valores do raio da célula unitária correspondente.

Quadro 3 – Síntese dos cálculos efectuados nos estudos paramétricos

Caso de estudo	Nome do cálculo	E_{coluna} (MPa)	Espaçamento entre colunas (m)	Raio da célula unitária (m)
Deformabilidade das colunas	E0	150	4,0	2,26
	E1	100	4,0	2,26
	E2	1500	4,0	2,26
	E3	10000	4,0	2,26
	E4	18000	4,0	2,26
Espaçamento entre colunas	L0	150	4,0	2,26
	L1	150	3,0	1,69
	L2	150	5,0	2,82
	L3	150	6,0	3,39

3. INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS COLUNAS

Analisa-se nesta secção a influência da deformabilidade das colunas no comportamento do problema. Com este estudo pretende-se analisar a importância deste factor no comportamento do sistema estrutural, nomeadamente nos mecanismos de transferência de tensões, e para que valores do módulo de deformabilidade esta influência é mais significativa. O reforço de aterros pode ser realizado com colunas de diversos materiais, pelo que se considerou pertinente analisar o comportamento do sistema estrutural para além dos valores do módulo de deformabilidade que caracterizam colunas de jet-grouting, considerando também no estudo valores mais elevados, da ordem de grandeza dos que caracterizam colunas de betão.

3.1. Análise dos resultados

Na Figura 3 encontram-se representados os assentamentos médios na base da PTC ($z=0$ m) sobre o solo mole e sobre a coluna, para os diferentes cálculos efectuados. Os resultados dos assentamentos médios na base da PTC, tanto no solo como na coluna (que são praticamente coincidentes), permitem concluir que, como esperado, a tendência global é a redução dos assentamentos com o aumento do módulo de elasticidade da coluna. Esta redução no valor dos assentamentos assume elevada expressão quantitativa quando se passa de $E=100$ MPa para $E=1500$ MPa, sendo menos expressiva para valores superiores a 1500 MPa. Verifica-se ainda, que a deformabilidade da coluna,

para os cálculos efectuados, e para as condições do problema, não tem qualquer influência no valor do assentamento diferencial.

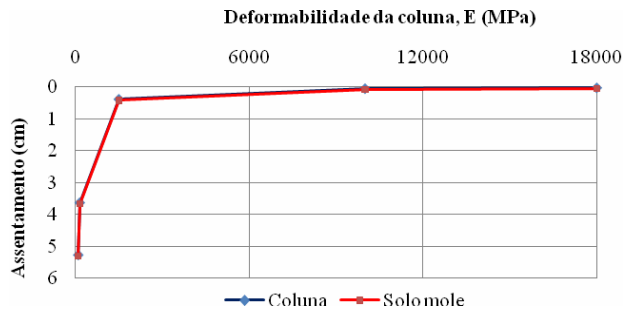


Figura 3 – Assentamento médio do solo mole e da coluna, na base da PTC de betão armado ($z=0m$), no final da consolidação, para diferentes deformabilidades da coluna

A avaliação da velocidade de consolidação nos diferentes cálculos é apresentada na Figura 4. Pela análise da figura constata-se que o processo de consolidação se efectua mais rapidamente para colunas mais rígidas, com valor de E entre 1500 e 18000 MPa. Estes resultados estão associados a uma redução da transferência de carga total para o solo mole, levando a que valores do módulo de deformabilidade mais elevados apresentem um processo de consolidação mais rápido.

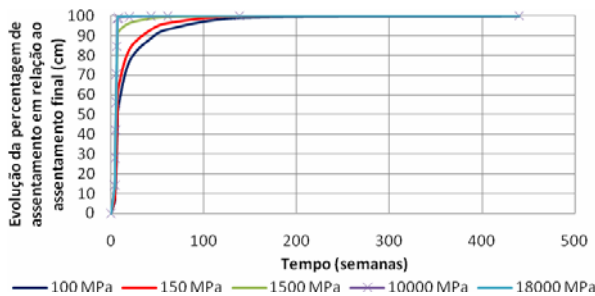


Figura 4 – Evolução da percentagem de assentamento médio na base da PTC ($z=0m$) em relação ao assentamento médio final, para diferentes deformabilidades da coluna

Para quantificar a percentagem de carga aplicada, pela laje de betão armado, na superfície do solo mole, considerou-se a seguinte expressão:

$$\rho_i = \frac{q_i}{q_t} \quad [1]$$

em que q_i representa a tensão média vertical aplicada na superfície do solo mole e q_t a tensão total vertical devida ao peso da laje de betão armado e do aterro sobrejacente (no caso presente, $q_t = 70$ kPa). O valor de ρ_i corresponde pois à percentagem de carga que está instalada sobre o solo mole e que não é transmitida, pela PTC de betão armado, para o topo das colunas. A Figura 5 mostra que ρ_i , no final da consolidação, diminui com o aumento da rigidez da coluna. Este facto está relacionado, naturalmente, com os menores deslocamentos da face inferior da laje para maiores rigidezes das colunas (Figura 3), o que implica menores acções desta sobre o solo mole.

Os momentos flectores na laje de betão armado, no final da consolidação, para os diferentes cálculos são apresentados na Figura 6. No caso das colunas mais rígidas, isto é, com valor de E

entre 1500 e 18000 MPa, regista-se uma alteração da forma do diagrama de momentos flectores. Esta alteração tem origem no grande valor de rigidez da coluna, que por sua vez, provoca uma concentração de tensões (Gonçalves, 2009) e correspondentemente uma translação do valor máximo de momento negativo para o alinhamento da interface coluna/solo mole ($x=0,65m$). Para valores de E compreendidos entre 100 e 150 MPa, a laje de betão armado funciona, aproximadamente, como uma laje duplamente encastrada nos pontos correspondentes aos eixos das colunas de jet-grouting e sujeita às cargas verticais do aterro executado sobre ela.

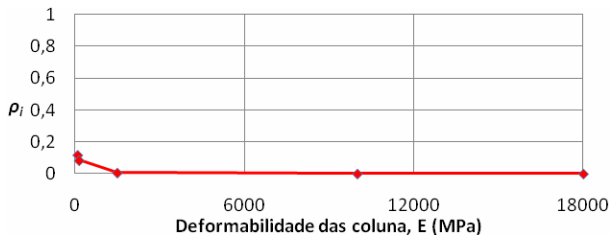


Figura 5 – ρ_i , no final da consolidação, para diferentes deformabilidades da coluna

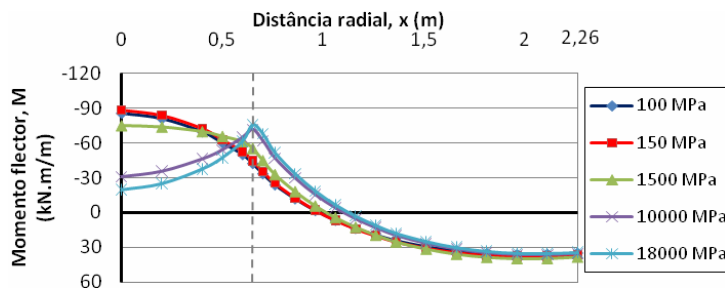


Figura 6 – Momentos flectores na laje de betão armado, em função da distância radial, no final da consolidação, para diferentes deformabilidades da coluna

Para avaliar a eficácia do sistema de reforço composto pelas colunas de jet-grouting encabeçadas por PTC em laje de betão armado neste problema, foi adoptado um parâmetro (Marques, 2008) que avalia a percentagem de carga total que é transmitida para as colunas. Este parâmetro, que se designa por coeficiente de eficácia do sistema de reforço, é definido por $f=Q_c/Q_t$, em que Q_c representa a carga suportada por uma coluna e Q_t a carga total da laje de betão armado e do aterro na célula unitária. O cálculo de Q_c é feito a partir da determinação do assentamento médio, ΔL , do topo da coluna. Dado o comportamento elástico que se admitiu para o material da coluna, e conhecido ΔL , obtém-se o valor de Q_c (Marques, 2008; Gonçalves, 2009). A Figura 7 mostra que o coeficiente de eficácia do sistema de reforço (f) aumenta até o módulo de deformabilidade das colunas atingir o valor de 1500 MPa. Para colunas mais rígidas, a eficiência do sistema é praticamente constante e de valor igual a 0.98. O aumento de f com o aumento da rigidez das colunas está directamente relacionado com a diminuição do coeficiente ρ_i , como se viu anteriormente.

Por forma a poder-se quantificar o efeito da solução de reforço em termos de redução de assentamentos, analisa-se também o valor do coeficiente de redução de assentamentos (CRA). Este coeficiente é definido como a razão entre o assentamento médio na base da laje de betão armado e o assentamento na base do aterro do mesmo problema não reforçado (sem colunas e sem PTC em betão armado). Como seria expectável, pelos resultados dos deslocamentos (Figura 3) e do coeficiente de eficácia do sistema de reforço (Figura 7), o coeficiente de redução de assentamentos

(*CRA*) diminui com o aumento do módulo da deformabilidade das colunas (Figura 8). Logo, quanto mais rígidas forem as colunas que constituem a solução de reforço, maior é a eficácia do sistema em termos de assentamentos. O valor de *CRA* obtido para *E* igual a 18000 MPa foi de 8.5×10^{-4} .

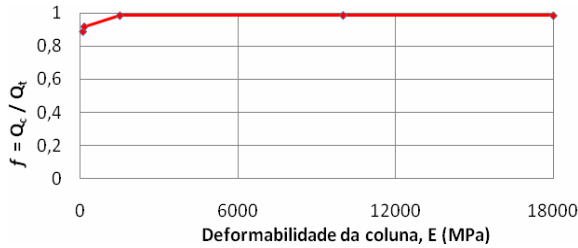


Figura 7 – Coeficiente de eficácia do sistema de reforço, no final da consolidação, para diferentes deformabilidades da coluna

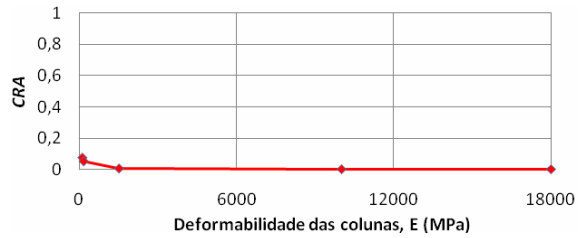


Figura 8 – Coeficiente de redução de assentamentos, no final da consolidação, para diferentes deformabilidades da coluna

Na Figura 9 são apresentados os excessos de pressão neutra para o final do processo construtivo. Verifica-se que quando a coluna é mais deformável ($E=100\text{MPa}$) se observa um excesso de pressão neutra máximo de 56.4 kPa, superior ao observado para os outros cálculos com colunas menos deformáveis. Esta diferença deve-se, naturalmente, ao facto de que as colunas mais rígidas “chamam” para si mais carga, aliviando a acção que se transmite para o solo mole saturado durante a construção, isto é, gerando menores excessos de pressão neutra no solo mole. De realçar ainda, a igualdade das colorações no caso dos cálculos E3 e E4, uma vez que, a partir de valor do módulo de deformabilidade de 10000 MPa, nas condições deste problema, o aumento da deformabilidade da coluna não introduz alterações significativas no comportamento do sistema estrutural (ver também Figura 4).

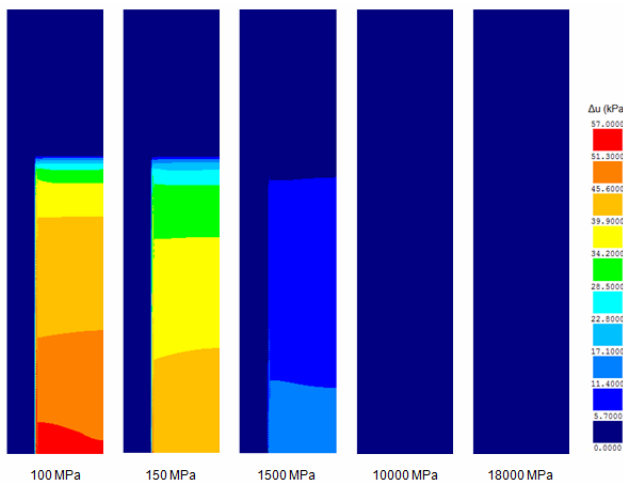


Figura 9 – Excessos de pressão neutra, no final da construção, para diferentes deformabilidades da coluna

4. INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE COLUNAS

O espaçamento entre colunas *e*, conseqüentemente, a área de influência de cada coluna, é um dos parâmetros com maior influência no comportamento do sistema estrutural. O aumento da área de influência da coluna na célula unitária resulta numa maior carga a ser suportada pelos elementos de

reforço e pelo solo mole. No problema base (cálculo L0) foi considerado um espaçamento entre colunas em malha quadrangular de 4 m, correspondendo a um raio da célula unitária igual a 2,26 m. Com o objectivo de avaliar a influência deste parâmetro no comportamento do sistema estrutural, neste estudo foram considerados outros três espaçamentos entre colunas (Quadro 3).

4.1 Análise dos resultados

Os assentamentos médios na base da PTC (Figura 10) crescem com o aumento do espaçamento entre colunas de jet-grouting, sendo este crescimento ligeiramente mais acentuado no solo mole, que no topo da coluna. A variação dos assentamentos é aproximadamente linear com o aumento do espaçamento entre colunas, registando-se para o topo da coluna uma variação entre 2.08 e 7.69 cm, quando se passa do cálculo L1 para o cálculo L3, respectivamente. Enquanto que, o assentamento no solo mole varia entre 2.09 e 7.91 cm quando se passa do cálculo L1 para o cálculo L3, respectivamente. Como esperado face aos resultados da Figura 10, verifica-se que o assentamento diferencial aumenta com o aumento do espaçamento entre colunas, sendo o maior valor registado para o cálculo L3 (0.3 cm).

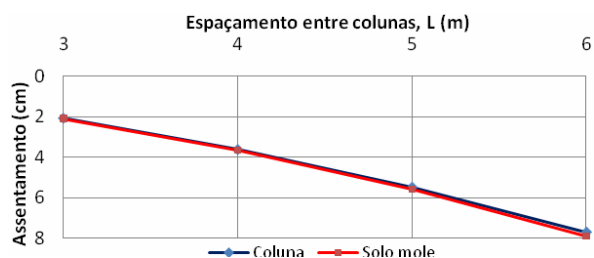


Figura 10 – Assentamento médio do solo mole e da coluna, na base da PTC de betão armado (z=0m), no final da consolidação, para diferentes espaçamentos entre colunas

A avaliação da percentagem de assentamento em função do tempo, para os diferentes espaçamentos entre colunas é apresentada na Figura 11. Verifica-se que 1,2 anos (61,4 semanas) após o início da obra, para o cálculo L1, o assentamento médio no solo mole já atingiu 98.6% do assentamento médio final, enquanto que no cálculo L0 se processou 96.2%; no cálculo L2, 93.3% e no cálculo L3 apenas 89%. Assim sendo, à medida que aumenta o espaçamento entre colunas diminui a velocidade de consolidação. Mostra-se na Figura 12 a percentagem de carga aplicada pela laje de betão armado na superfície do solo mole (ρ_i), no final da consolidação, para os diferentes cálculos. ρ_i aumenta ligeiramente com o aumento do espaçamento entre colunas. Regista-se para ρ_i um valor de 0.06 quando L=3m e de 0.14 quando L=6m.

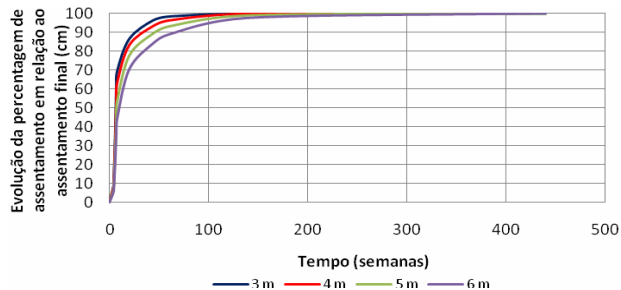


Figura 11 – Evolução da percentagem de assentamento médio na base da PTC (z=0m) em relação ao assentamento médio final, para diferentes espaçamentos entre colunas

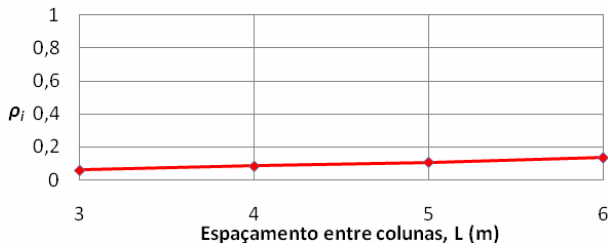


Figura 12 – ρ_i , no final da consolidação, para diferentes espaçamentos entre colunas

Observando a Figura 13, verifica-se que os momentos flectores na laje de betão armado, no final da consolidação, para os diferentes cálculos, aumentam com o aumento do espaçamento entre as colunas. Este comportamento seria esperado, uma vez que a laje de betão armado funciona, globalmente, como uma laje apoiada nas colunas e sujeita às cargas verticais do aterro executado sobre ela, existindo assim, aproximadamente, proporcionalidade entre o valor do momento flector e o quadrado do comprimento do vão.

Como esperado, o coeficiente de eficácia do sistema de reforço (f) diminui com o aumento do espaçamento entre colunas (Figura 14). Este comportamento está intimamente relacionado com a redução da percentagem de carga que é transmitida directamente para o topo das colunas pela acção da laje de betão armado, aumentando assim, a parcela de carga transmitida para o solo mole de fundação (como visto na Figura 12) e, em consequência, diminuindo a eficácia do sistema de reforço.

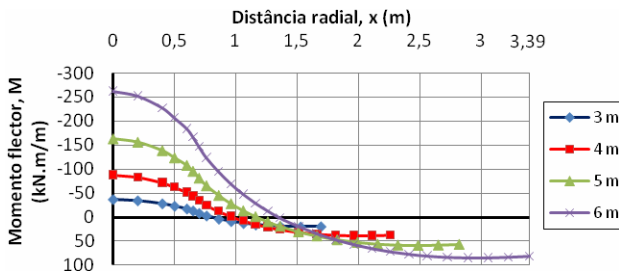


Figura 13 – Momentos flectores na laje de betão armado, em função da distância radial, no final da consolidação, para diferentes espaçamentos entre colunas

Mostra-se na Figura 15 os valores do coeficiente de redução de assentamentos (CRA) para os diferentes cálculos. Como seria expectável, pelos resultados apresentados anteriormente dos assentamentos e do coeficiente f , CRA aumenta com o aumento do espaçamento entre colunas. Logo, quanto maior for o comprimento do vão entre colunas, menor é a redução de assentamentos por parte do sistema de reforço. No entanto, em termos práticos, os valores de CRA continuam muito baixos, mesmo para espaçamentos elevados entre colunas, o que comprova a eficácia desta solução no que respeita à redução dos assentamentos.

Na Figura 16 é apresentado o campo de excessos de pressão neutra instalado no final da construção, para todos os cálculos efectuados. É possível verificar que quanto maior é a área de influência da coluna, mais elevados são os excessos de pressão neutra no solo mole. Como a transmissão dos esforços para a coluna é mais difícil com o aumento do espaçamento entre colunas e uma maior carga solicita o solo mole (ver Figura 14), verificam-se excessos de pressão neutra mais elevados resultantes duma solicitação praticamente não drenada do solo mole por uma maior carga que não foi transmitida para as colunas.

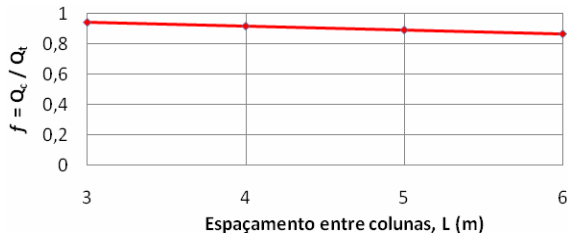


Figura 14 – Coeficiente de eficácia do sistema de reforço, no final da consolidação, para diferentes espaçamentos entre colunas

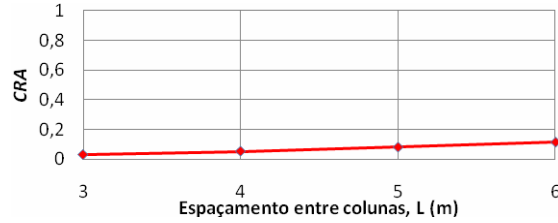


Figura 15 – Coeficiente de redução de assentamentos, no final da consolidação, para diferentes espaçamentos entre colunas

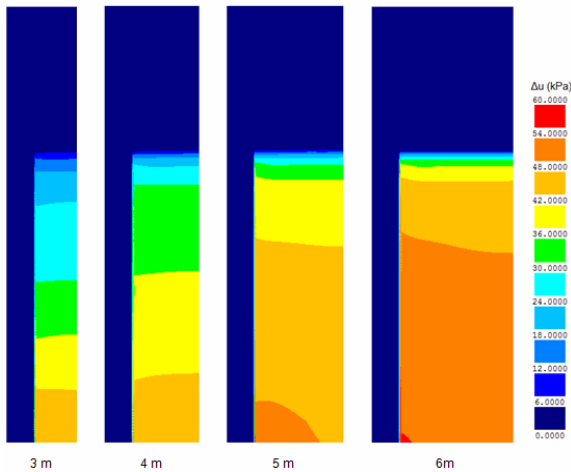


Figura 16 – Excessos de pressão neutra, no final da construção, para diferentes espaçamentos entre colunas

5. CONCLUSÕES

Avaliou-se neste artigo os efeitos da variação da deformabilidade das colunas e do seu espaçamento no comportamento de um aterro sobre solos argilosos moles reforçados com colunas de jet-grouting encabeçadas por PTC em betão armado. Da análise dos resultados destaca-se que: (1) Com o aumento de rigidez das colunas, existe uma redução significativa no valor dos assentamentos (tanto na coluna como no solo mole), a velocidade do processo de consolidação é mais rápida e a eficácia do sistema de reforço aumenta. (2) O espaçamento entre colunas tem grande influência no valor do assentamento médio na base da PTC e nos momentos flectores da laje de betão armado; a eficácia do sistema de reforço diminui com o aumento deste parâmetro.

REFERÊNCIAS

- Abdullah, C.H. (2006). *Evaluation of Load Transfer Platforms and Their Design Methods for Embankments supported on geopiers*. Tese de Doutoramento, University of Wisconsin.
- Borges, J.L. (1995). *Aterros sobre Solos Moles Reforçados com Geossintéticos. Análise e Dimensionamento*. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto
- Gonçalves, J.R. (2009). *Reforço de Solos de Fundação com Colunas de Jet-Grouting e Plataformas de Transferência de carga em Betão Armado*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.
- Marques, D.O. (2008). *Reforço de Solos de Fundação com Colunas de Jet Grouting Encabeçadas por Geossintéticos*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.