

ATERROS SOBRE SOLOS MOLES REFORÇADOS COM COLUNAS DE JET GROUTING ENCABEÇADAS POR GEOSSINTÉTICO

Geosynthetic-reinforced and jet-grout column-supported embankments on soft soils

Daniela Oliveira Marques*

José Leitão Borges**

RESUMO – Usando um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos, é analisado o comportamento de um aterro sobre solos moles reforçados com colunas de jet grouting encabeçadas por geossintético funcionando como membrana. Utiliza-se o conceito de célula unitária, que consiste numa coluna de jet grouting e no solo mole envolvente, no geossintético e no aterro da sua área de influência, com comportamento axisimétrico confinado. O modelo numérico incorpora a teoria multidimensional de consolidação de Biot (formulação acoplada das equações de equilíbrio e de escoamento) com relações constitutivas simuladas pelo modelo de estados críticos p-q- θ . É dada especial atenção à análise, durante e após a execução do aterro, dos assentamentos, dos excessos de pressão neutra, das tensões efectivas, dos níveis de tensão, das tracções no geossintético, do efeito de arco, do coeficiente de redução de assentamentos, do factor de concentração de tensões e do coeficiente de eficácia do sistema de reforço.

SYNOPSIS – Using a numerical model based on the finite element method, the behaviour of a geosynthetic-reinforced and column-supported embankment on soft soils is analysed. The unit cell formulation is used, which consists of one jet grout column and the soft soil, geosynthetic and embankment fill from its influence area, with confined axisymmetric behaviour. The numerical model incorporates the Biot consolidation theory (coupled formulation of the flow and equilibrium equations) with constitutive relations simulated by the p-q- θ critical state model. Special emphasis is given to the analysis, during and after the construction period, of the settlements, excess pore pressures, effective stresses, stress levels, tension in the geosynthetic, arching effect, stress concentration ratio and reinforcement efficiency coefficient.

PALAVRAS CHAVE – Solos moles, aterros, colunas de jet-grouting, geossintéticos, modelação numérica.

1 – INTRODUÇÃO

A ocupação crescente das áreas superficiais em muitos países tem obrigado à utilização de maciços com fracas características geotécnicas como fundação de aterros, o que coloca, em geral, diversos problemas à engenharia geotécnica. Estes problemas estão relacionados com a dificuldade de garantir a segurança relativamente à estabilidade global e com a existência de assentamentos (totais e diferenciais) que se processam lentamente no tempo e assumem valores elevados a longo prazo.

Existem diversas técnicas construtivas que permitem obviar os inconvenientes levantados pela execução das obras em questão. Entre elas encontram-se a técnica de pré-carga ou sobrecarga temporal, o emprego de materiais leves no corpo do aterro, a remoção-substituição do solo mole, o

* Mestre em Engenharia Civil, FEUP

** Doutor em Engenharia Civil, Professor da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

reforço com geossintéticos, a utilização de drenos verticais (geodrenos ou drenos de areia), o reforço com colunas de brita, a construção do aterro por fases, a construção de bermas laterais, o reforço com colunas “rígidas” e plataformas de transferência de carga sobre colunas, etc..

As vantagens do método de reforço de solos moles através de plataformas de transferência de carga sobre colunas “rígidas” prendem-se essencialmente com a redução significativa dos assentamentos totais e diferenciais, tanto na base como no topo do aterro, e com a possibilidade de construção do aterro numa etapa única, evitando intervalos de tempo prolongados. As plataformas de transferência de carga (PTC) podem incluir, ou não, geossintéticos. Na Figura 1 mostram-se diversos tipos de PTC em aterros sobre colunas.

Quando comparada com a solução tradicional de plataforma granular não reforçada, a utilização de geossintéticos no sistema de reforço aumenta a eficiência da transferência de carga, reduzindo consideravelmente a percentagem de área coberta por colunas necessária para assegurar a transmissão de esforços, minimiza a cedência do solo sobre as colunas e reduz potencialmente os assentamentos totais e diferenciais.

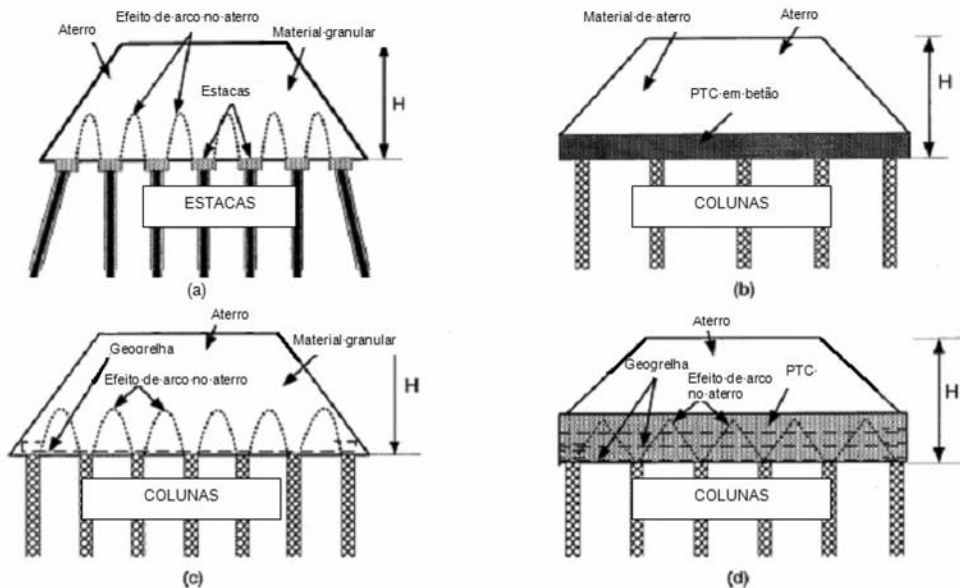


Fig. 1 – Diferentes tipos de plataformas de transferência de carga (PTC) em aterros sobre colunas: (a) granular não-reforçada; (b) em betão (rígida); (c) com geossintético funcionando como membrana; (d) em viga flexível com vários níveis de geossintéticos.

Diversos tipos de colunas podem ser usados no sistema de reforço com plataformas de transferência de carga, designadamente estacas de betão pré-fabricadas, estacas de aço, colunas de madeira, colunas de *jet grouting*, etc..

Por se tratar de uma técnica relativamente recente, muitos aspectos do comportamento das plataformas de transferência de carga com geossintéticos sobre colunas não estão ainda completamente explicados, não obstante o contributo importante para este assunto de trabalhos recentes (Marques, 2008; Abdullah, 2006; Gangakhedkar, 2004; Han e Gabr, 2002 e Rao, 2006).

Usando um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos (Borges, 1995), é analisado neste artigo o comportamento de um aterro sobre solos moles reforçados com colunas de *jet grouting* encabeçadas por geossintético funcionando como membrana. É utilizado o conceito de

célula unitária, sistema constituído por uma só coluna de *jet grouting* e pelo solo mole envolvente, geossintético e aterro da sua área de influência, simulado com comportamento axissimétrico confinado.

Neste estudo numérico são investigadas as interações solo mole-aterro-geossintético-coluna de *jet grouting*, procurando-se compreender de que forma se processam as transferências de carga para os elementos de reforço, as distribuições de tensões, a evolução dos deslocamentos, assim como avaliar as grandezas interpretativas do funcionamento da obra, tais como o coeficiente de redução dos assentamentos, o factor de concentração de tensões e os coeficientes de efeito de arco e de eficácia do sistema de reforço.

No presente trabalho, as hipóteses teóricas fundamentais presentes no modelo numérico (desenvolvido por Borges, 1995) são as seguintes: (i) simulação de estados planos e axissimétricos de deformação e de escoamento; (ii) formulação acoplada das equações de equilíbrio (problema mecânico) e escoamento (problema hidráulico), tendo em conta as relações constitutivas do solo (modelo elastoplástico) formuladas em termos de tensões efectivas (extensão da teoria de consolidação multidimensional de Biot) (Borges, 1995; Borges e Cardoso, 2000; Lewis e Schrefler, 1987; Britto e Gunn, 1987); esta formulação é aplicada em todas as fases do problema, durante e após a construção do aterro; (iii) utilização do modelo de estados críticos $p-q-\theta$, na simulação do comportamento constitutivo dos solos de fundação e de aterro (Borges, 1995; Borges e Cardoso, 1998; Lewis e Schrefler, 1987); (iv) utilização do modelo elástico linear (bidimensional) na simulação do comportamento constitutivo das colunas de *jet grouting*; (v) utilização do modelo elástico linear (unidimensional) na modelação do comportamento constitutivo do geossintético.

Tendo presente, nas análises acopladas, o carácter incremental da integração no tempo das equações governativas (equações de equilíbrio e escoamento), utilizam-se no modelo técnicas incrementais. Assim, em cada cálculo (que corresponde à resolução do sistema de equações global que define o problema, cujas incógnitas são os deslocamentos e os excessos de pressão neutra nos pontos nodais), está implícito um determinado intervalo de tempo (incremento de tempo) durante o qual se pode aplicar, ou não, uma determinada acção exterior (incremento de carga).

De forma a simular o funcionamento do geossintético como membrana, é utilizado no programa a opção correspondente à actualização das coordenadas dos nós da malha após cada cálculo incremental.

2 – DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema diz respeito à construção contínua, em 14 dias, de um aterro de 2m de altura sobre um solo argiloso mole saturado, reforçado com colunas de *jet grouting* encabeçadas por geossintético, funcionando como membrana (Figura 2a).

A camada de argila tem 6m 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* estão dispostas segundo malha quadrangular em planta e têm comprimento igual à possança da camada argilosa, ou seja, a sua extremidade inferior apoia-se no estrato rígido.

Como o aterro apresenta grande extensão planimétrica, recorreu-se, como se referiu anteriormente, ao conceito de célula fundamental ou unitária para o estudo do problema. Assim, aplicou-se o modelo numérico a um sistema constituído por uma coluna de *jet grouting* e pelo solo mole envolvente, geossintético e aterro da sua área de influência (Figura 2b). Este sistema admite simetria relativamente ao eixo vertical que passa pelo centro da coluna. Esta particularidade permite tratar o problema simplificado como um problema bidimensional axissimétrico, considerando que cada coluna tem uma área de influência circular (com área igual à do quadrado de influência de cada coluna na malha quadrangular considerada).

A simulação do comportamento confinado do solo é garantida através da imposição de condições fronteira. Com esse intuito foram impedidos os deslocamentos horizontais de todos os pontos na fronteira lateral da célula (superfície cilíndrica). Como o problema é limitado inferiormente por um estrato rígido admitido como indeformável, os deslocamentos verticais e horizontais da extremidade inferior da coluna e do solo mole foram impedidos (Figura 2b). Na superfície de drenagem, na base do aterro, foram impostos para os excessos de pressão neutra valores iguais a zero.

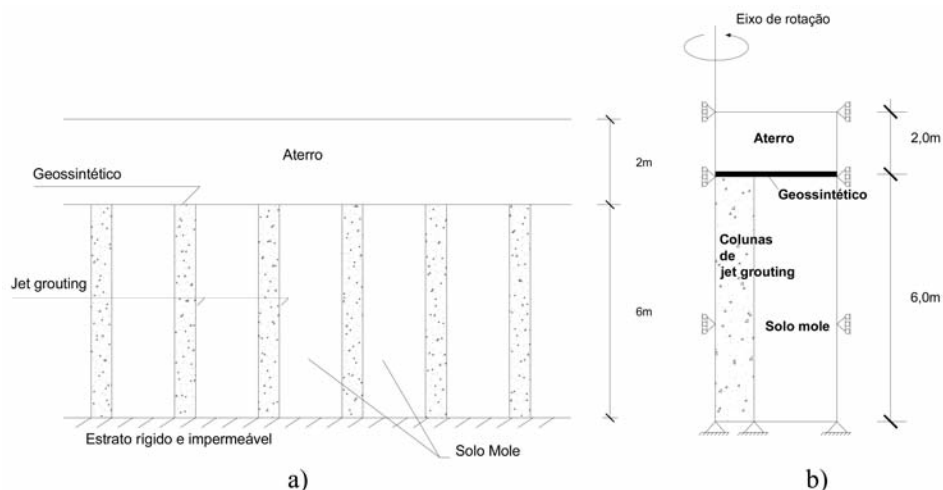


Fig. 2 – a) Representação esquemática do problema; b) célula unitária.

Uma revisão bibliográfica acerca de aterros reforçados mostra que o espaçamento típico entre colunas varia entre 1,5 a 4,5m (Han, 1999). Neste estudo, considerou-se o raio da célula unitária igual a 2,15m, o que corresponde a um espaçamento entre colunas de 3,81m em malha quadrangular. As colunas têm diâmetro de 1,2 m. A camada de geossintético foi colocada no topo das colunas. Assumiu-se que o geossintético tem propriedades idênticas em todas as direções.

A Figura 3 mostra a malha de elementos finitos usada na discretização do meio em diferentes fases do problema, a qual é constituída, no total, por 1190 elementos bidimensionais (triangulares de seis nós) e 17 elementos unidimensionais (elementos-barra de 3 nós, para modelação do geossintético).

Face às características de permeabilidade dos materiais envolvidos, considerou-se comportamento acoplado (isto é, com incógnitas-deslocamentos e incógnitas-excesso de pressão neutra) no solo mole, por um lado, e comportamento drenado (excessos de pressão neutra nulos) no aterro, por outro. Na coluna de *jet grouting* usou-se, como no aterro, o mesmo tipo de elemento finito não-acoplado (isto é, tendo somente incógnitas-deslocamentos), mas simulou-se o seu comportamento como “impermeável” (impondo fronteira “impermeável” na interface coluna-solo mole). Os elementos triangulares usados na simulação acoplada do solo mole apresentam 6 pontos nodais para os deslocamentos (nos vértices e nos pontos médios dos lados) e 3 pontos nodais para o excesso de pressão neutra (nos vértices). Os elementos triangulares usados na simulação “impermeável” da coluna e na modelação drenada do aterro apresentam apenas 6 pontos nodais para deslocamentos, nos vértices e nos pontos médios dos lados.

Relativamente à modelação das interfaces solo-colunas de *jet grouting*, optou-se pela não utilização de elementos de junta. Esta opção justifica-se, em parte, pela elevada irregularidade da superfície de contacto solo-coluna e pelo facto de ser no corpo do aterro e no geossintético que o

mecanismo de transferência de carga essencialmente se desenvolve, isto é, que grande parte da carga se transmite para a coluna. Por outro lado, assegurou-se uma boa discretização da malha nessa zona (malha com espaçamentos de 5cm). A sustentar esta opção está também o facto de a maior parte dos casos relativos à simulação deste tipo de obras reportados na bibliografia da especialidade realizarem a mesma simplificação (Gangakhedkar, 2004; Rao, 2006 e Abdullah, 2006).

O funcionamento do geossintético como membrana justificou igualmente a não consideração de elementos de junta nas interfaces solo-geossintético. Esses elementos de junta só se justificam quando o mecanismo de transferência de tensões para o geossintético se faz por atrito-aderência nas interfaces, o que não é o caso do funcionamento como membrana. Neste caso, a mobilização de tracções no geossintético está associada à sua deformação (aumento de comprimento) determinada pelos assentamentos na base do aterro, onde se situa o geossintético, que são maiores no solo mole que na coluna. Como referido anteriormente, de forma a simular o funcionamento do geossintético como membrana, é utilizado no programa a opção correspondente à actualização das coordenadas dos nós da malha após cada cálculo incremental.

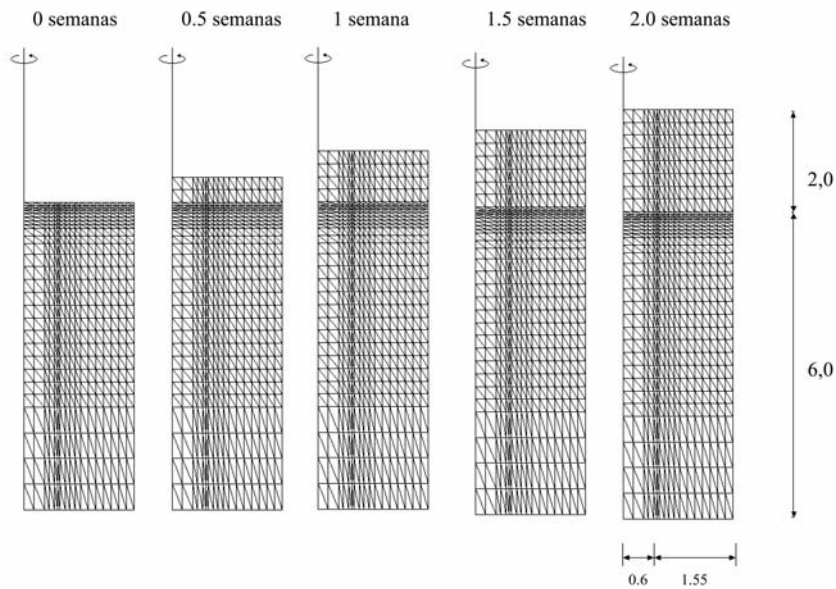


Fig. 3 – Malha de elementos finitos (ao longo do processo construtivo).

O comportamento do solo argiloso e do material de aterro foram simulados pela aplicação do modelo de estados críticos $p-q-\theta$. No Quadro 1 são apresentadas as características adoptadas para as duas formações. Relativamente ao material de aterro, tomou-se para o coeficiente de impulso em repouso, K_0 , o valor de 0,43 e o grau de sobreconsolidação, OCR, foi considerado igual a 1.

No Quadro 2 são apresentados os valores do grau de sobreconsolidação e do coeficiente de impulso em repouso da argila, em profundidade. Trata-se pois de uma argila ligeiramente sobreconsolidada até à profundidade de 1,8 m e normalmente consolidada para profundidades superiores.

Para o geossintético foi adoptado um modelo de comportamento elástico linear. O limite máximo de deformação recomendado para este tipo de obra é 6%. Deste modo, ao longo da vida útil da obra, o geossintético apresentará um comportamento que se encontra na parte linear elástica da curva tracção-deformação. Para o geossintético, adoptou-se a rigidez à tracção de $J=E \cdot t=6000\text{kN/m}$, sendo E o módulo de elasticidade ($E=1,5 \cdot 10^6 \text{ kPa}$) e t a espessura ($t=0,004\text{m}$).

Na simulação das colunas de *jet grouting* adoptou-se um modelo elástico linear isotrópico, caracterizado pelo módulo de elasticidade e pelo coeficiente de Poisson. As características do *jet grouting* são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Características da argila e do material de aterro

	λ	k	Γ	$\phi' (^{\circ})$	v'	N	γ (kN/m ³)	k_x (m/s)	k_y (m/s)
Argila	0,22	0,02	3,26	30	0,25	3,40	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 1^a carga; k – declive das linhas de descompressão-recompressão isotrópica; N – volume específico de solo sujeito a uma compressão isotrópica de 1 kPa; Γ – volume específico do solo em estado crítico sujeito a uma tensão média efectiva de 1 kPa; ϕ' – ângulo de atrito definido em tensões efectivas; v' – coeficiente de Poisson definido em tensões efectivas; γ – peso específico; k_x, k_y – permeabilidades nas direcções horizontal e vertical, respectivamente.

Quadro 2 – Coeficiente de impulso em repouso (K_0) e grau de sobreconsolidação da argila (OCR).

PROFUNDIDADE (m)	K_0	OCR
0 - 1	0,7	2,43
1 – 1,8	0,7 – 0,5	2,43 - 1
1,8 - 6	0,5	1

Quadro 3 – Características do *jet grouting*.

	E (MPa)	ν	γ (kN/m ³)
<i>Jet grouting</i>	150	0,2	22

Por se tratar de uma técnica relativamente recente e em virtude das particularidades da própria técnica, caracterizada pela mistura parcial de calda de cimento com o solo, e cujas características mecânicas são de difícil determinação, os valores das propriedades do *jet grouting* disponíveis na bibliografia da especialidade são escassos e caracterizam-se por uma grande dispersão, especialmente no que se refere ao módulo de deformabilidade. O módulo de deformabilidade adoptado foi o referido por Jaritngam (2003), para as colunas de *jet grouting* construídas para reforço de um solo argiloso mole de fundação, durante a construção de uma estrada na Tailândia.

3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 – Preâmbulo

A construção do aterro provoca alterações nos estados de tensão efectiva e de pressão neutra do solo mole de fundação. Como a permeabilidade do solo é baixa e o período de construção curto, o carregamento é efectuado em condições praticamente não drenadas. Este carregamento introduz no solo argiloso excessos de pressão neutra. No período pós-construção, as variações dos estados de tensão e de deformação passam a estar totalmente associadas à dissipação dos gradientes de pressões neutras (estabelecidos durante a construção) com a conseqüente prossecução no tempo do escoamento do fluido até à reaquisição final das condições hidrostáticas de equilíbrio (Borges, 1995).

Para ilustrar o comportamento da obra ao longo de todo o processo (desde o início da construção até ao final da consolidação) são apresentadas resultados relativos aos deslocamentos (malhas deformadas e assentamentos), aos estados de tensão (excessos de pressão neutra, tensões efectivas verticais, cruzetas de tensões principais efectivas e níveis de tensão) e às grandezas interpretativas do mecanismo de efeito de arco e de eficiência do sistema de reforço (factor de concentração de tensões e coeficientes de efeito de arco, eficácia do sistema e redução de assentamentos) em diversas fases do período construtivo e pós-construtivo.

3.2 – Deslocamentos

Na Figura 4 são apresentadas as configurações das deformadas, ampliadas de um factor de 5, ao fim de 2 semanas (final da construção), de 70 semanas, 2,6 anos e 14,7 anos (final da consolidação).

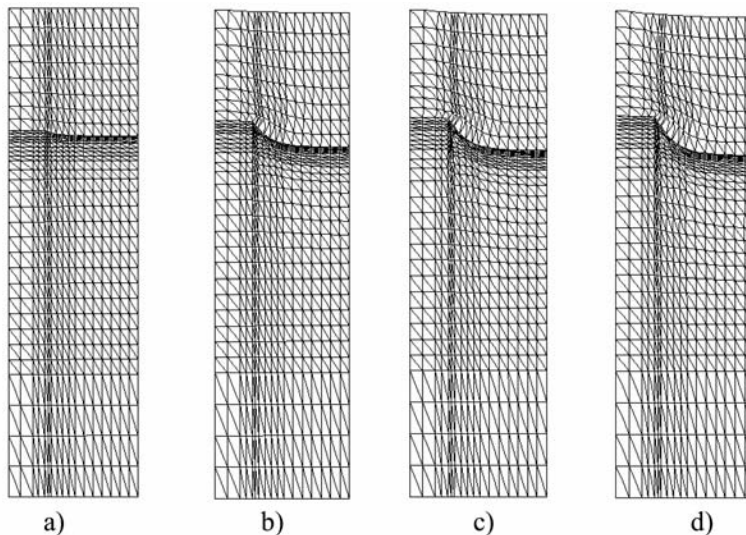


Fig. 4 – Configuração das deformadas ao fim de: a) 2 semanas (final da construção); b) 70 semanas; c) 2,6 anos; d) 14,7 anos

A Figura 5 apresenta as evoluções temporais dos assentamentos médios na coluna de *jet grouting* e no solo mole envolvente, e do assentamento médio do conjunto coluna-solo, na base do aterro ($z=0m$). Estes assentamentos médios são calculados tendo em conta os valores dos assentamentos nos pontos nodais, multiplicados pelas respectivas áreas de influência (“coroas” circulares) na célula unitária. Portanto, os assentamentos dos nós mais afastados do eixo de simetria contribuem mais, na média ponderada pelas áreas, para o valor do assentamento médio (os raios da “coroa” circular são maiores).

A zona onde se observa uma maior deformação da malha é na vizinhança da interface entre a coluna e o solo, na zona superior do solo de fundação, onde se visualiza a grande deformação do geossintético, devido à diferença de rigidez entre solo e coluna (Figura 4).

Os assentamentos começam na fase de construção e aumentam à medida que decorre o processo de consolidação, sendo maiores no solo do que na coluna de *jet grouting*, como seria de esperar. No final da consolidação, os assentamentos médios apresentam os valores de 1,75cm para a coluna e 12,32cm no solo, o que representa um assentamento diferencial médio de 10,6cm. Nas primeiras 7 semanas após a construção do aterro estar concluída, ocorreram já cerca de 30% do assentamento

total na coluna e 37% do assentamento total do solo. Aproximadamente 1 ano após a construção processaram-se 70% dos assentamentos totais na coluna e no solo mole.

A observação da Figura 5b permite concluir que o assentamento do solo ao ser muito superior ao da coluna influencia de uma forma determinante o assentamento médio da célula unitária. Desta forma, a variação do assentamento médio ao longo do tempo acaba por não ser a grandeza mais explícita da evolução do comportamento do solo ao longo de todo o processo de consolidação.

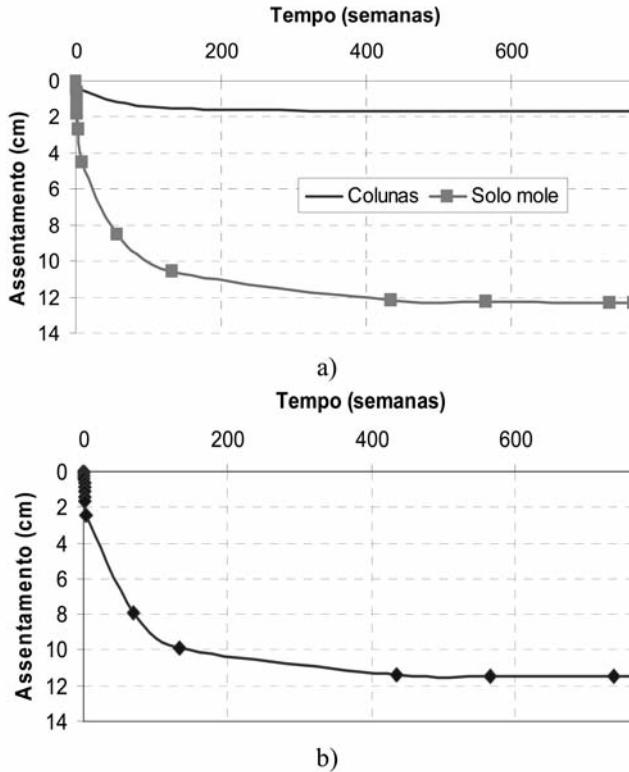
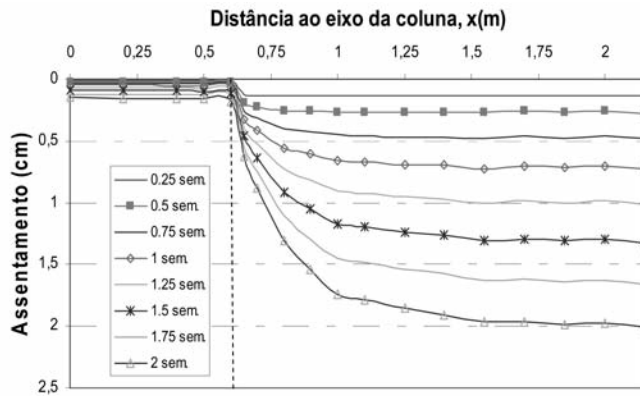


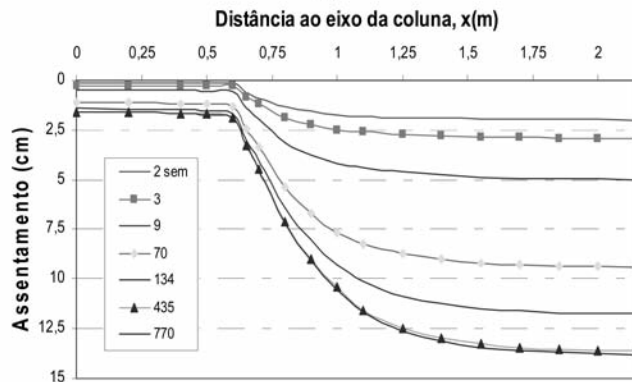
Fig. 5 – a) Evolução temporal : a) do assentamento médio na coluna de jet grouting e no solo, na base do aterro; b) assentamento médio do conjunto coluna-solo, na base do aterro.

Apresenta-se na Figura 6 os assentamentos na base do aterro em função da distância radial ao eixo da coluna, durante e após a construção do aterro. Verifica-se, durante a construção, que os assentamentos começam logo após a colocação da primeira camada de aterro de 0,25m de espessura. A meio vão entre as colunas, atinge-se no final da segunda semana cerca de 15% do assentamento máximo. No período pós-construção (Figura 6b), verifica-se que, a partir da semana 134, ou seja 2,6 anos após o carregamento, grande parte dos assentamentos já se processaram. Verifica-se ainda que ao fim de 4,3 anos (435 semanas) já se processou cerca de 99% do assentamento médio total. Como se verá mais à frente, o processo de consolidação é mais rápido que no mesmo problema não reforçado (sem colunas e sem geossintético).

A Figura 7 mostra, para além da evolução no tempo dos assentamentos no centro da coluna ($x=0$) e na periferia da célula ($x=2,15m$), ou seja, a meio vão entre as colunas, onde se verifica o assentamento máximo, a evolução do assentamento diferencial entre estes dois pontos. O assentamento máximo do solo toma o valor de 13,8cm. O assentamento mínimo no centro da coluna é de 1,6 cm. O assentamento diferencial máximo é, desta forma, 12,2 cm.



a)



b)

Fig. 6 – Assentamento na base do aterro ($z=0$): a) durante a construção; b) no período pós-constutivo.

pós-constutivo.

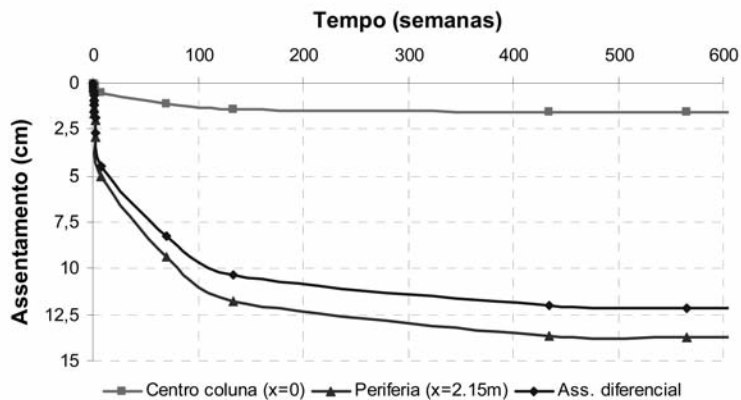


Fig. 7 – Evolução temporal do assentamento no centro da coluna ($x=0$), na periferia da célula ($x=2,15m$) e do assentamento diferencial entre eles, na base do aterro ($z=0$).

A Figura 8 ilustra a evolução dos assentamentos à superfície do aterro ao longo de todo o processo de consolidação.

O exame da figura sugere os seguintes comentários: (i) o assentamento máximo à superfície do aterro sobre o solo mole é de 10,7cm, atingido ao fim de 443 semanas (8,4 anos); (ii) o assentamento máximo sobre a coluna de jet grouting é de 9,6cm, ao fim de 443 semanas; (iii) o assentamento diferencial máximo à superfície do aterro é de 1,3cm. O assentamento diferencial estabiliza a partir da 320ª semana (aproximadamente 6,2 anos).

Destes resultados, merece ser especialmente realçado o muito pequeno valor do assentamento diferencial à superfície do aterro (1,3cm), quando comparado com o assentamento diferencial na base do mesmo (12,2cm). Este facto, muito importante para a análise dos efeitos sobre eventuais obras executadas na plataforma do aterro, é justificado pelo processo de transferência de cargas no corpo do aterro, que mais à frente se analisa.

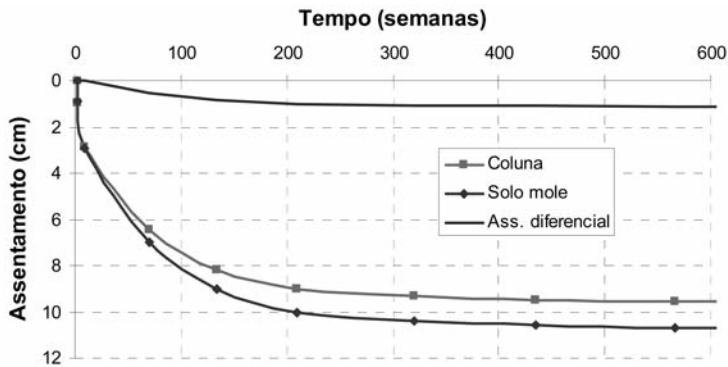


Fig. 8 – Evolução ao longo do tempo dos assentamentos máximos à superfície do aterro ($z=-2m$), sobre a coluna ($x=0$) e sobre o solo ($x=2,15m$), e assentamento diferencial entre a coluna e o solo.

3.3 – Tensões

Os excessos de pressão neutra, em consequência do carregamento em condições praticamente não drenadas, aumentam durante a construção do aterro e atingem o valor máximo no final da segunda semana, correspondente ao final da construção. A evolução dos excessos de pressão neutra durante o período construtivo é representada na Figura 9. No final da construção o valor máximo é de 41kPa, muito próximo do correspondente ao peso dos 2,0 m de aterro (40kPa).

A observação da Figura 9 permite identificar a fronteira drenante na base do aterro. Nas proximidades da fronteira os excessos de pressão neutra dissipam-se, naturalmente, mais rapidamente que no solo mais distante. É possível verificar que até aproximadamente 0,5m sob a fronteira drenante a consolidação se processa mais depressa que no solo subjacente.

Na Figura 10 é apresentada a evolução dos excessos de pressão neutra no período pós-construção.

Após o máximo atingido com a conclusão da construção do aterro, os excessos de pressão neutra dissipam-se ao longo do tempo até que ao fim de 566 semanas (aproximadamente 11 anos) não se observam alterações dos excessos de pressão neutra. Ao fim de 28 semanas já se dissipou perto de metade do excesso de pressão neutra máximo introduzido com a construção do aterro.

A dissipação dos excessos de pressão neutra é acompanhada pelo aumento das tensões efectivas (Figura 11), principalmente na coluna de *jet grouting* (neste material as tensões efectivas coincidem, naturalmente, com as tensões totais, uma vez que se trata de um material “impermeável”, como referido no ponto 2).

A partir da semana 3, ou seja, uma semana após a conclusão do aterro, verifica-se que há uma concentração de tensões na coluna. Pela observação da Figura 11 constata-se também que o ponto de encontro do geossintético na coluna é um ponto de grande concentração de tensões, o que é natural pois trata-se um ponto “singular” de transferência de carga (quer do geossintético para a coluna, quer do aterro para a coluna por efeito de arco).

Nas Figuras 12, 13 e 14 apresentam-se os incrementos de tensão efectiva vertical (σ'_y), em função da distância ao eixo da coluna para as profundidades $z=0m$ (base do aterro), $z=0,5m$ e $z=1,0m$, respectivamente. São analisadas as variações para diversos instantes de tempo tanto no período de construção, como no período pós-constructivo.

Os incrementos de tensão efectiva vertical são muito elevados na coluna de jet grouting e apresentam valores bastante inferiores no solo argiloso, o que vai de encontro ao que se pretende com a introdução desta técnica de reforço, isto é, aliviar o solo das tensões introduzidas pelo aterro.

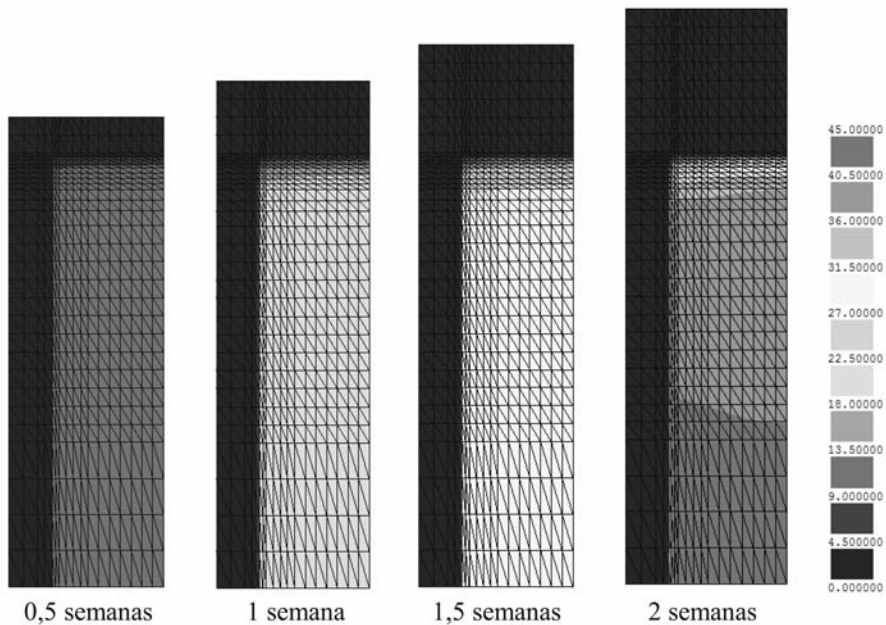


Fig. 9 – Excessos de pressão neutra durante a construção.

Observa-se que os incrementos de tensão efectiva vertical na coluna não são uniformes, sendo maiores nas extremidades da coluna do que no centro. Este efeito é apreciável a partir da segunda semana, quando a construção do aterro está concluída. Abdullah (2006) constatou o mesmo efeito na coluna, nos seus trabalhos com colunas de geopier reforçadas com geossintético. A parte externa da coluna é a que recebe o geossintético e a carga por ele transmitida e é também nessa zona que se desenvolvem tensões de corte muito expressivas, por efeito de arco, no aterro, que transmitem as cargas à coluna.

Os incrementos de tensão efectiva no solo mantêm-se praticamente uniformes ao longo de toda a distância radial, excepto na base do aterro em que se observa um acréscimo da tensão no solo na zona próxima da coluna, em consequência do efeito de arco nessa zona.

Na Figura 15 é mostrada a evolução da tensão tangencial, τ , na interface coluna-solo ($x=0,6m$). O sinal de τ é positivo quando o solo exerce sobre a coluna uma acção descendente e negativo na situação inversa.

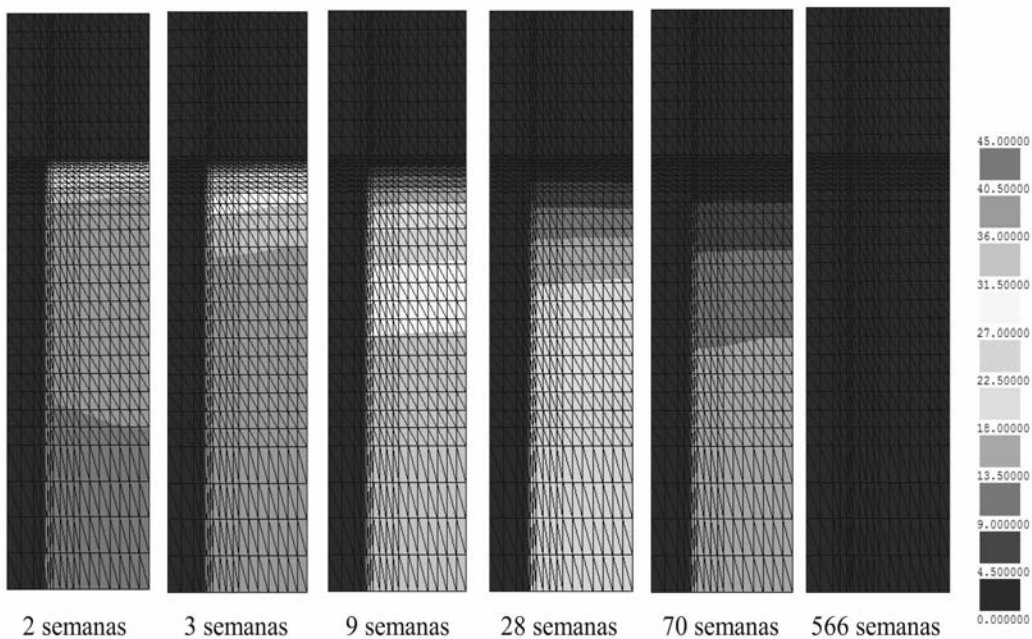


Fig. 10 – Excessos de pressão neutra após a construção (kPa).

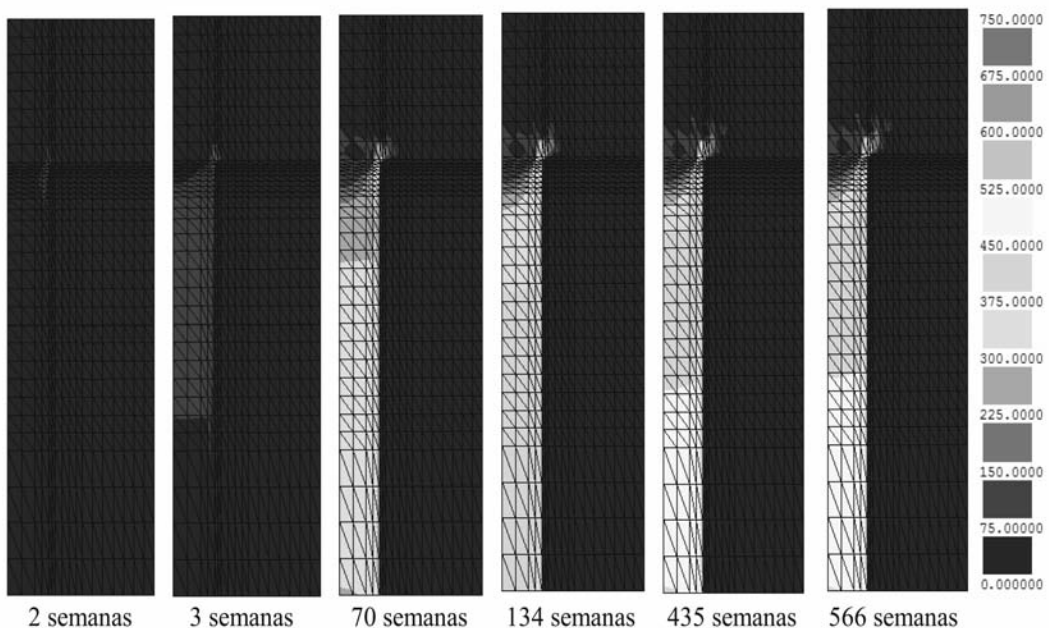


Fig. 11 – Acréscimos de tensão efectiva vertical, σ'_v , ao longo do período de consolidação (kPa).

A análise da figura sugere vários comentários. As tensões tangenciais tomam valores muito elevados até aproximadamente 0,5m de profundidade. O solo sob o geossintético tende a assentar muito mais que a coluna, introduzindo desse modo tensões de corte positivas que incrementam a carga suportada pela coluna (efeito de arco, no solo mole).

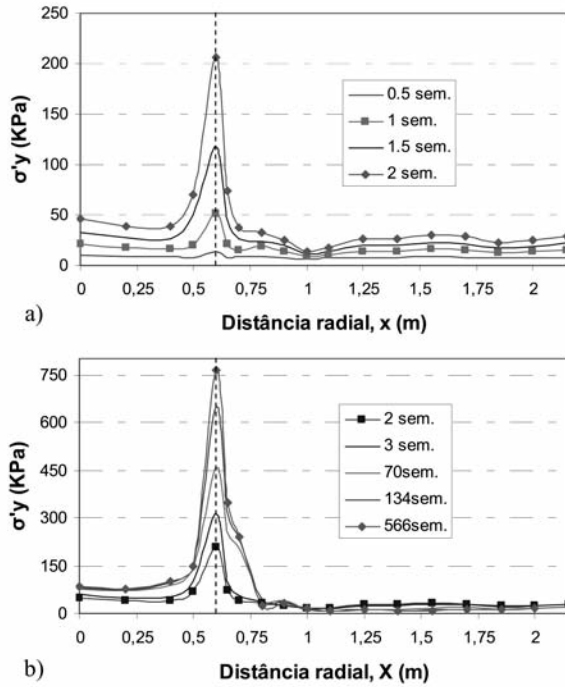


Fig. 12 – Incrementos de tensão efectiva vertical na base do aterro ($z=0m$), durante: a) a construção do aterro; b) após a construção do aterro.

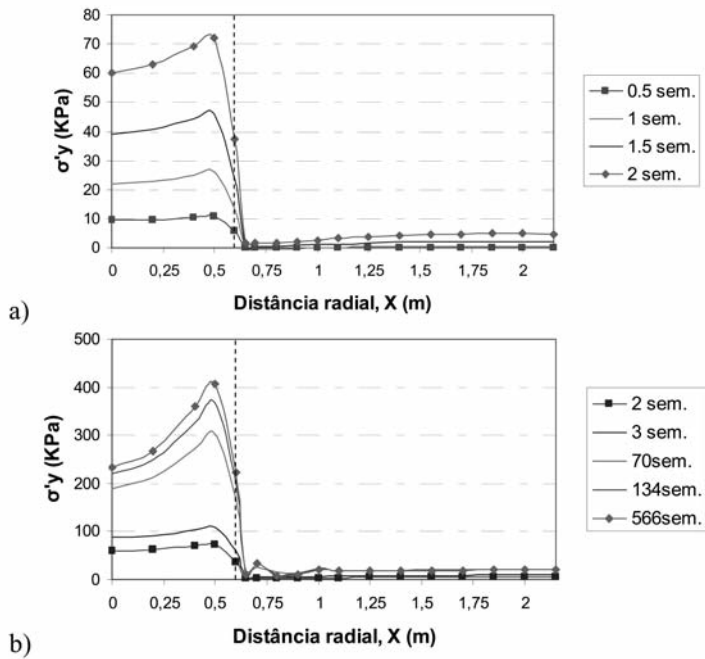


Fig. 13 – Incrementos de tensão efectiva vertical à profundidade de 0,5m, durante: a) a construção do aterro; b) após a construção do aterro.

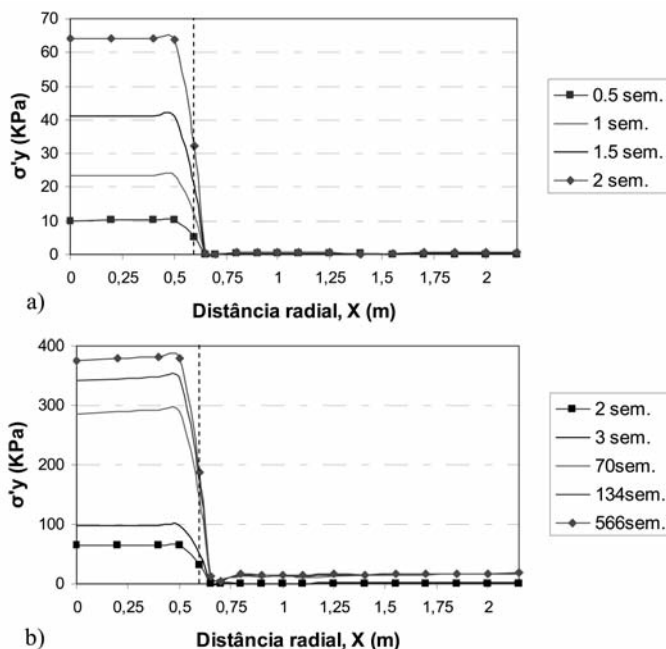


Fig. 14 – Incrementos de tensão efectiva vertical a uma profundidade de 1,0m: a) durante a construção do aterro; b) após a construção

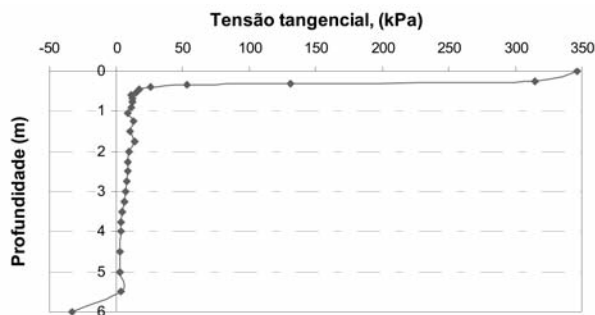


Fig. 15 – Evolução da tensão tangencial ao longo da interface coluna-solo, no final da consolidação.

A partir da profundidade de 0,5m, o efeito das tensões tangenciais dilui-se, apresentando desde 0,5m até 5,5m valores perto de 10kPa. Do mesmo modo, embora com valores menos expressivos, o solo tende a assentar e “apoiar-se” na coluna, transmitindo-lhe tensões por efeito de arco. Este efeito aumenta as tensões verticais na coluna, reduzindo-as no solo mole.

Para profundidades superiores a 5,5m, verifica-se uma inversão do sentido das tensões tangenciais, ou seja, a coluna exerce sobre o solo uma acção descendente.

O fenómeno de concentração de tensões verticais pode ser avaliado pelo factor de concentração de tensões. Este factor é definido pela relação:

$$FC = \frac{\Delta\sigma'_{v(col)}}{\Delta\sigma'_{v(solo)}} \quad (1)$$

em que $\Delta\sigma'_{v(\text{col})}$ é $\Delta\sigma'_{v(\text{solo})}$ representam, respectivamente, os acréscimos médios da tensão vertical efectiva na coluna e no solo (os valores médios são obtidos considerando a ponderação das áreas correspondentes – “coroas” circulares – na célula unitária).

Quanto maior for o factor de concentração de tensões, maior é a tensão transferida para as colunas. O valor do FC aumenta em profundidade, partindo de um valor de 7,2 à superfície até 53,4, à profundidade de 6m (Figura 16a).

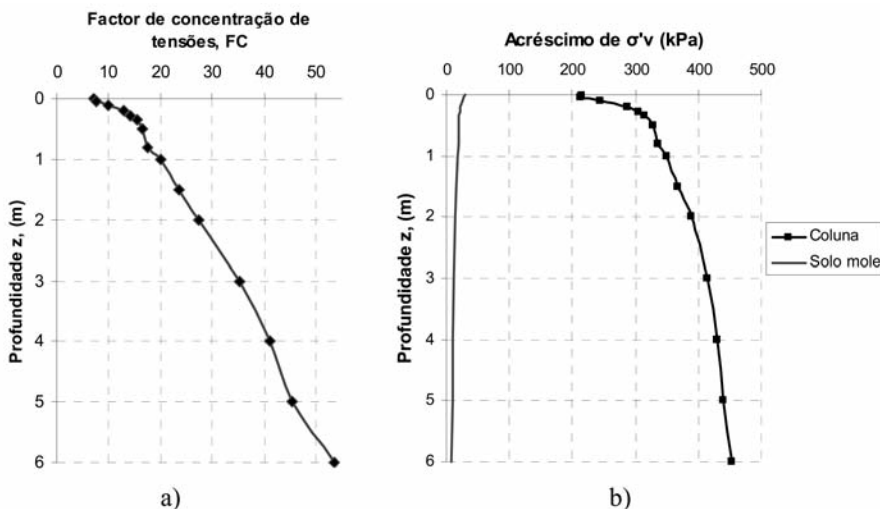


Fig. 16 – a) Factor de concentração de tensões em profundidade, no final da consolidação;
b) acréscimos de tensão efectiva vertical na coluna e no solo em profundidade, no final da consolidação.

O gráfico da Figura 16a parece apresentar duas fases distintas em profundidade. O factor de concentração de tensões aumenta rapidamente até à profundidade de 1m, para a qual FC toma o valor de aproximadamente 20. A partir de 1m de profundidade, FC aumenta praticamente de uma forma linear em profundidade.

Para se tentar perceber melhor a variação do FC em profundidade apresenta-se na Figura 16b os diagramas dos acréscimos médios da tensão vertical efectiva no solo e na coluna.

Verifica-se que há um crescimento rápido do acréscimo da tensão vertical na coluna até 1 metro de profundidade. A tensão vertical na coluna aumenta em profundidade e diminui no solo, devido às tensões de corte, por efeito de arco, na interface solo-coluna (dirigidas para baixo sobre a coluna, e dirigidas para cima no solo). Esta diminuição de tensão efectiva vertical no solo mole, aliada aos baixos valores que apresenta e ao aumento na coluna, leva a que FC apresente valores muito elevados e crescentes em profundidade.

Na Figura 17 é apresentada a evolução do FC em profundidade no final da construção (2 semanas), ao fim de 28 semanas, 70 semanas, 134 semanas e no final da consolidação (770 semanas). Ao fim de 2 semanas o factor de concentração de tensões apresenta valores muito elevados a partir da profundidade de 1m. Este crescimento muito pronunciado em profundidade justifica-se fundamentalmente pelo facto de o solo no final da construção ainda não ter consolidado abaixo da profundidade de 1m, pelo que apresenta valores de incrementos de tensão efectiva vertical muito baixos, que no papel de divisor no cálculo de FC torna este parâmetro muito elevado.

Na Figura 18 mostra-se a evolução de FC na base do aterro ao longo do tempo. O factor de concentração de tensões cresce à medida que decorre o processo de consolidação, em virtude do

aumento dos incrementos de tensão efectiva vertical na coluna de *jet grouting* muito superiores ao aumento dos incrementos de tensão efectiva vertical no solo mole. O valor do FC estabiliza a partir da semana 435, na qual toma um valor muito próximo de 7, que apresenta no final da consolidação.

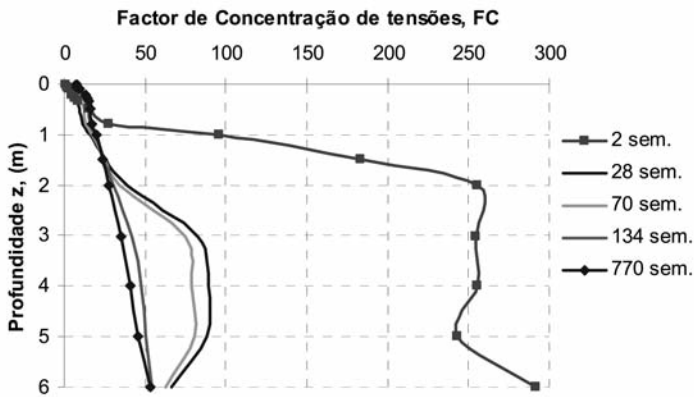


Fig. 17 – Evolução do factor de concentração de tensões em profundidade, no período pós-constutivo.

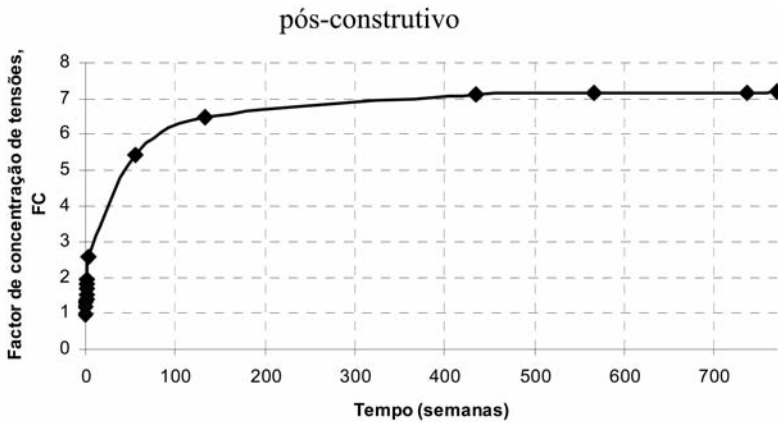


Fig. 18 – Evolução ao longo do tempo do factor de concentração de tensões para a base do aterro.

A noção de nível de tensão, *SL* (*stress level*), permite quantificar no solo a proximidade do estado de tensão em relação à situação de estado crítico, sendo definido da seguinte maneira:

$$SL = \frac{q}{M \cdot p} \quad (2)$$

em que p é a tensão média efectiva, q a tensão de desvio e M o declive da linha de estados críticos no referencial p - q . Em solos normalmente consolidados ou ligeiramente sobreconsolidados, como no caso presente, este parâmetro varia entre 0 e 1, sendo 1 o valor correspondente ao estado crítico. Nas Figuras 19 e 20 ilustram-se, através de mapas de colorações, os níveis de tensão mobilizados respectivamente durante a construção do aterro e no período pós-constutivo.

A análise destas figuras permite destacar vários aspectos. Identifica-se uma zona do solo em estado crítico logo após a colocação da primeira camada de aterro. Este facto prende-se com o aumento da tensão de desvio associado às distorções nessa zona (assentamentos não uniformes).

Na segunda e terceira semanas verifica-se que o solo em estado crítico se encontra a uma cota inferior relativamente à semana inicial, aproximadamente a 0,4-0,5m de profundidade na segunda semana e a 0,65m na terceira semana. Este rebaixamento deve-se à existência da fronteira drenante na base do aterro que permite a dissipação dos excessos de pressão neutra do solo mais próximo da superfície, que consolida (aumento da tensão média efectiva, diminuindo SL).

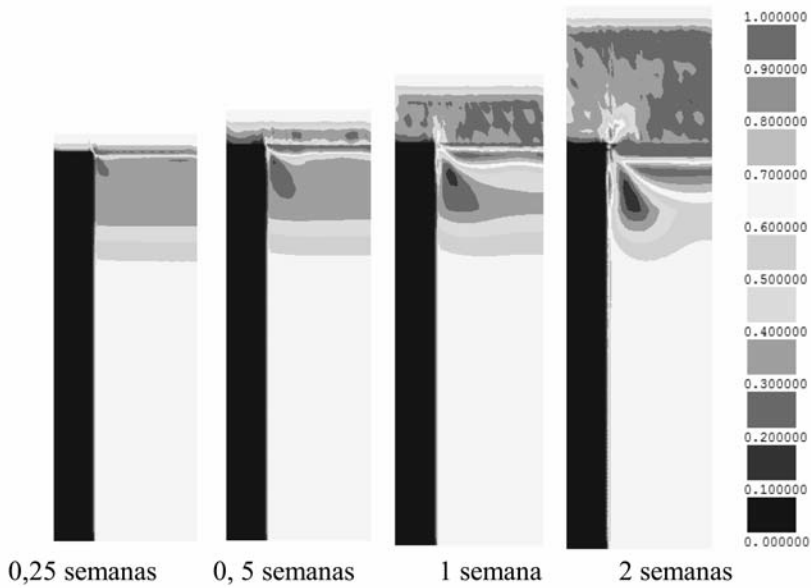


Fig. 19 – Níveis de tensão durante a construção do aterro.

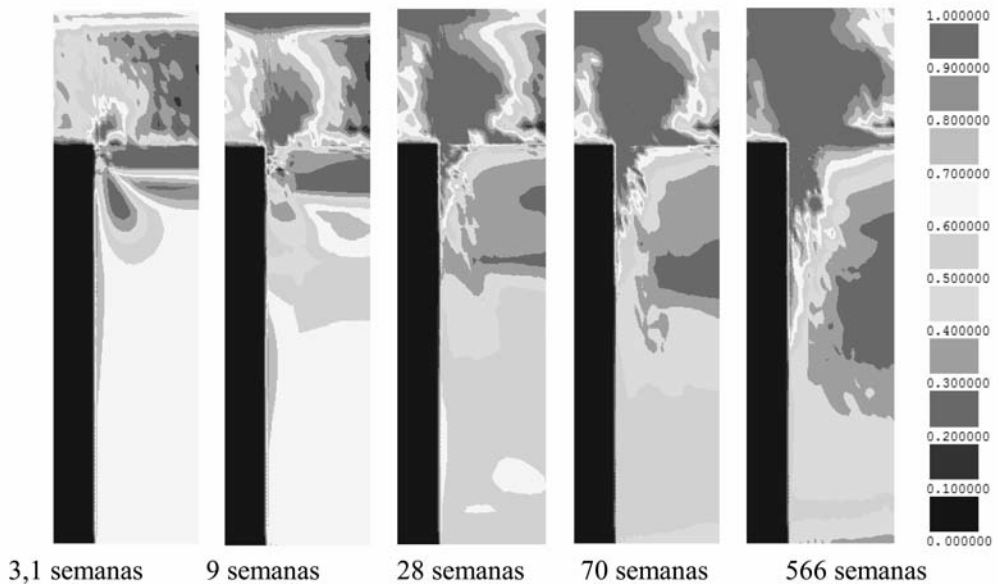


Fig. 20 – Níveis de tensão após a construção do aterro.

Na primeira semana verifica-se que na ligação do geossintético à coluna se começa a notar uma zona do material de aterro em estado crítico. Esta é a zona de ligação entre os quatro elementos diferentes, solo mole, geossintético, coluna de *jet grouting* e material de aterro e é o ponto mais crítico de toda a célula unitária.

Com o assentamento do solo entre colunas, há lugar à formação do mecanismo de efeito de arco e, consequentemente, ao desenvolvimento de tensões de corte no material de aterro. O desenvolvimento desse mecanismo é perceptível através dos mapas de colorações dos níveis de tensão (Figura 20). O desenvolvimento de tensões de corte no corpo do aterro é acompanhado por níveis de tensão críticos.

A partir da semana 28 o solo na interface solo argiloso-coluna, até à profundidade de 1,5m, está em estado crítico em consequência do desenvolvimento de tensões de corte na interface solo mole-coluna por materialização do efeito de arco no solo de fundação. De acordo com o que foi referido relativamente às tensões tangenciais na interface (Figura 15), o solo mole tende a assentar e “apoia-se” na coluna, transmitindo-lhe tensões. A partir de 3 m da base do aterro verifica-se uma diminuição das tensões tangenciais na interface e é possível verificar que o solo nessa zona não atinge o estado crítico.

O efeito de arco que se materializa no solo e no aterro é perceptível através das cruzetas de tensões efectivas para o final da consolidação (Figura 21). Verifica-se grande concentração de tensões no ponto de encontro dos materiais de aterro, coluna de *jet grouting*, geossintético e solo mole. Nesta zona materializa-se em grande parte a transferência de carga do aterro para a coluna por efeito de arco e por “entrega” da força do geossintético.

É visível a existência de concentrações de tensões na interface coluna-solo mole, o que está de acordo com o diagrama de tensões tangenciais nesta interface. Observa-se ainda a inversão da orientação das cruzetas de tensão no solo mole junto à extremidade inferior da coluna de *jet grouting*, o que vai também de encontro ao comportamento das tensões tangenciais nesta zona (Figura 15).

O coeficiente de efeito de arco é definido como a razão entre a tensão vertical sobre o geossintético, t , e a tensão vertical devida à carga do aterro:

$$p = t/\gamma H \quad (3)$$

em que γ e H representam o peso volúmico e a altura do aterro, respectivamente. Portanto, este coeficiente é tanto menor (tendendo, no limite, para zero) quanto maior for o efeito de arco na massa do aterro, transmitindo a carga para o topo das colunas.

Importa, no entanto, referir que, na realidade, as tensões verticais sobre o geossintético não são uniformes (ver Figura 12). Na expressão 3 considerou-se t como a tensão média sobre o geossintético ponderada pelas respectivas áreas de influência na célula unitária (“coroas” circulares), e não a tensão média na direcção radial. Com esta opção, o valor p corresponde pois à percentagem de carga que está instalada sobre o geossintético e que não foi transmitida, por efeito de arco, no corpo do aterro, para o topo as colunas. É assim a opção mais adequada quando o objectivo pretendido é analisar este mecanismo de transferência de carga.

Considerando então t como a tensão vertical média ponderada pelas respectivas áreas de influência, são apresentadas nas Figura 22, as evoluções do coeficiente de efeito de arco no período construtivo e no período pós-construção, respectivamente.

É possível constatar que o coeficiente de efeito de arco diminui, ou seja, que a percentagem de carga transmitida para as colunas por efeito de arco no corpo do aterro aumenta, quer na fase de carregamento, quer após a construção. No final da construção apenas 35% da carga é transferida para as colunas no corpo do aterro. Ao longo do tempo, o assentamento diferencial na base do aterro, que está na origem da mobilização do efeito de arco no aterro, faz com que a carga seja progressivamente transferida para as colunas, aliviando o geossintético, o que se reflecte num valor do coeficiente de efeito de arco mais baixo.

A força de tracção desenvolvida no geossintético em função da distância ao centro da coluna, no final da consolidação, é apresentada na Figura 23. A força de tracção no geossintético não é constante ao longo de toda a distância radial, apresentando um valor máximo de 50,8 kN/m.

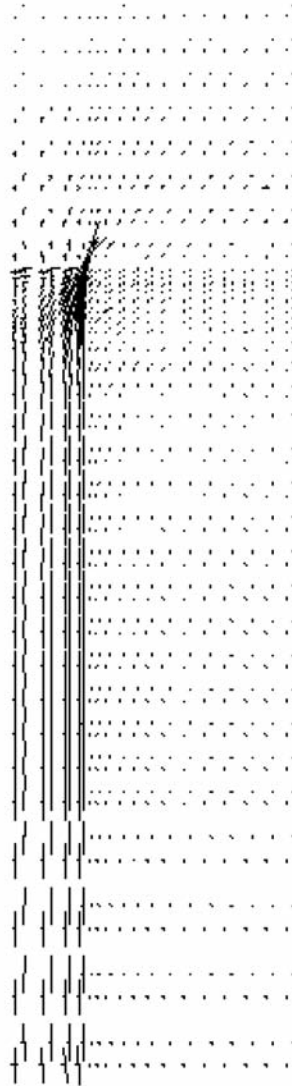


Fig. 21 – Cruzetas de tensões efectivas no final da consolidação.

Para avaliar a eficiência do sistema de reforço com as colunas de *jet grouting* encabeçadas por geossintético neste estudo, foi definido um parâmetro que avalia a percentagem da carga total do aterro que é transmitida para as colunas. Este parâmetro, que aqui se designa por coeficiente de eficácia do sistema de reforço, é definido por:

$$f = \frac{Q_c}{Q_t} \quad (4)$$

em que Q_c representa a carga suportada por uma coluna e Q_t a carga total do aterro na célula unitária.

O cálculo de Q_c é feito a partir da determinação do assentamento médio, ΔL , da extremidade superior da coluna. Este assentamento médio corresponde à média ponderada, pelas respectivas áreas de influência na célula unitária (“coroas” circulares), dos assentamentos nos pontos nodais correspondentes. Dado o comportamento elástico linear do material da coluna, conhecido ΔL , obtém-se Q_c aplicando sucessivamente as seguintes expressões:

$$\varepsilon_{m(coluna)} = \frac{\Delta L}{L} \quad (5)$$

$$\sigma_{(coluna)} = E \cdot \varepsilon_{m(coluna)} \quad (6)$$

$$Q_c = \sigma_{(coluna)} \cdot A_{(coluna)} \quad (7)$$

em que $\varepsilon_{m(coluna)}$ é a extensão média, L o comprimento da coluna, $\sigma_{(coluna)}$ o acréscimo de tensão médio sobre a coluna, E o módulo de elasticidade da coluna e $A_{(coluna)}$ a área da coluna.

A carga total do aterro na célula unitária é:

$$Q_t = \gamma H \cdot A_{(célula\text{-}unitária)} \quad (8)$$

em que γ e H são respectivamente o peso volúmico do material de aterro e a altura do aterro e $A_{(célula\text{-}unitária)}$ a área da célula unitária.

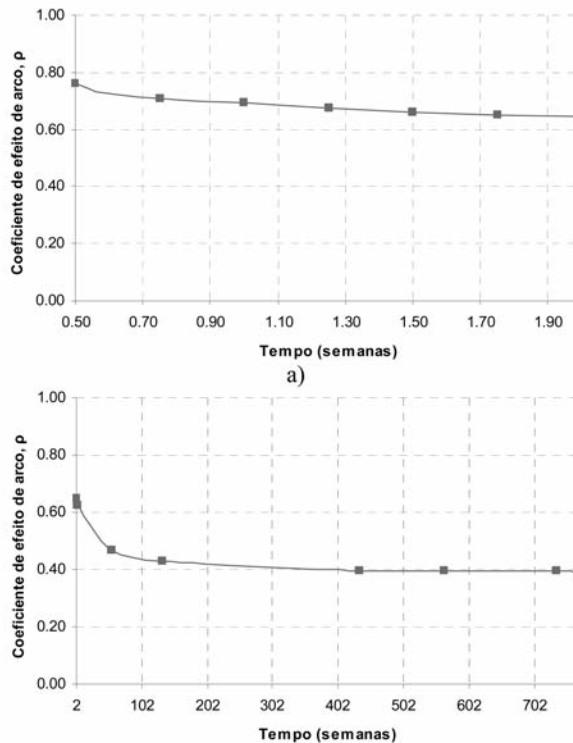


Fig. 22 – Evolução no tempo do coeficiente de efeito de arco: a) durante a construção; b) após a construção.

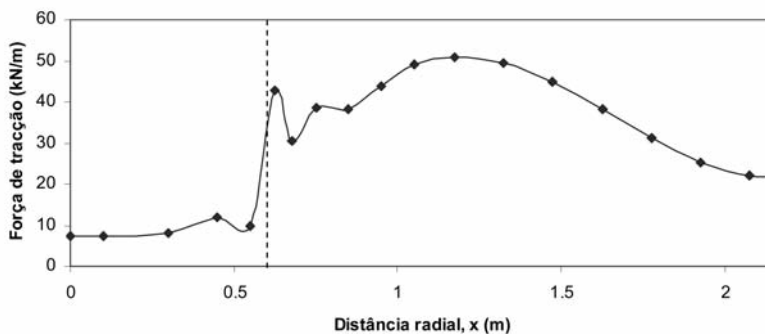


Fig. 23 – Força de tração no geossintético no final da consolidação, em função da distância radial.

A evolução deste parâmetro durante e após a construção é apresentada na Figura 24. É possível constatar que a percentagem de carga transmitida para as colunas aumenta quer na fase de carregamento quer após a construção. No final da construção apenas 8% da carga total é suportada pelas colunas. Nesta fase, grande parte da carga está pois aplicada no fluido intersticial (excessos de pressão neutra). Só com a consolidação é que o processo de transmissão de carga para a coluna continua. A partir da semana 400 mais de 80% da carga introduzida pelo aterro é suportada pelas colunas de *jet grouting*. No final da consolidação este coeficiente atinge o valor de 0,85, valor suficientemente próximo do valor teórico óptimo, 1 (correspondente à situação em que toda a carga do aterro seria suportada pelas colunas).

Note-se que o coeficiente f tem em conta, globalmente, os três mecanismos de transferência de carga para a coluna: por efeito de arco na massa do aterro; por transferência de carga do geossintético para a coluna; por efeito de arco, abaixo do aterro, no solo mole (tensões tangenciais de atrito na superfície lateral da coluna).

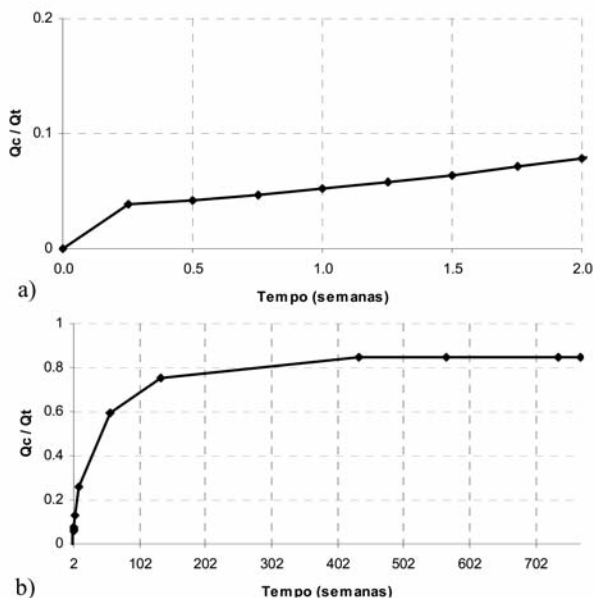


Fig. 24 – Evolução no tempo do coeficiente de eficácia do sistema de reforço: a) durante a construção; b) após a construção

3.4 – Assentamentos. Comparação com o problema não reforçado

O coeficiente de redução de assentamentos é definido como a relação entre os assentamentos na base do aterro do problema reforçado e do problema não-reforçado (sem colunas e sem geossintético). Para avaliar este coeficiente modelou-se também o problema não-reforçado. Apresenta-se na Figura 25 a evolução do assentamento médio na base do aterro para ambas as situações.

Constata-se que pela introdução do reforço com colunas de *jet grouting* encabeçadas pelo geossintético, há uma diminuição do assentamento médio final de 41,0 cm para 11,5 cm, que corresponde a uma redução de 72%. O coeficiente de redução de assentamentos (CRA) é de 0,28. O factor de melhoramento, n , definido como o inverso de CRA, é 3,56.

Analisando ainda a Figura 25, nota-se que a evolução no tempo dos assentamentos (consolidação) é bastante mais rápida no problema reforçado que no problema sem colunas e sem geossintético. Enquanto que, no primeiro, o assentamento final é atingido por volta da semana 440, no último só o é por volta da semana 1250.

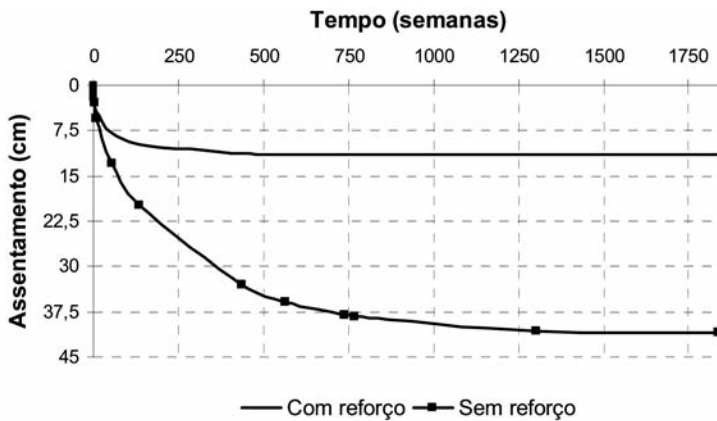


Fig. 25 – Assentamentos médios na base do aterro ao longo do tempo para situações com e sem reforço.

4 – CONCLUSÕES

Utilizando o conceito de célula unitária, analisou-se o comportamento de um aterro sobre solos moles reforçados com colunas de *jet grouting* encabeçadas por geossintético funcionando como membrana, através da aplicação dum modelo numérico baseado no método de elementos finitos. Da análise dos resultados, várias conclusões podem ser destacadas.

(1) A carga materializada pela construção do aterro é transmitida para as colunas essencialmente através de três mecanismos: efeito de arco no corpo do aterro; transferência de carga através do geossintético; efeito de arco no solo de fundação.

(2) A redistribuição de tensões no sistema influencia a distribuição dos excessos de pressão neutra no solo mole e, conseqüentemente, os estados de tensão efectiva. No final da consolidação, os acréscimos de tensão vertical no solo de fundação são consideravelmente inferiores aos que se encontrariam instalados num sistema não reforçado. Esta parcela de acréscimo de tensão vertical é devida à parcela de carga do aterro que não é transferida para as colunas.

(3) A técnica de reforço com colunas de *jet grouting* encabeçadas por geossintético em solos moles, sob acção de um carregamento exterior, reduz claramente os assentamentos na base do aterro.

(4) A distribuição de tensões na coluna não é uniforme. A tensão vertical é maior na periferia da coluna do que no centro, principalmente na zona superior, junto à superfície.

(5) As tensões verticais sobre o geossintético não são uniformes.

(6) O factor de concentração de tensões não é constante em profundidade, fruto dos acréscimos da tensão vertical crescentes na coluna e dos valores sucessivamente mais baixos dos acréscimos da tensão efectiva no solo mole, o que leva a que este factor apresente valores muito elevados e crescentes em profundidade.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, C. H. (2006) *Evaluation of Load Transfer Platforms and Their Design Methods for Embankments Supported on Geopiers*. Dissertação de Doutoramento, University of Wisconsin.
- Borges, J. L. (1995) *Aterros sobre Solos Moles Reforçados com Geossintéticos. Análise e Dimensionamento*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Borges, J. L.; Cardoso, A. S. (1998) *Simulação numérica do modelo de estados críticos (p,q,θ) em aterros sobre solos moles*. Revista Geotecnia, nº 84, pp. 39-63.
- Borges, J. L.; Cardoso, A. S. (2000) *Simulação numérica dos processos de consolidação em aterros sobre solos moles*. Revista Geotecnia, nº 89, pp. 57-75.
- Britto, A. M.; Gunn, M. J. (1987) *Critical State Soil Mechanics via Finite Elements*. Ellis Horwood Limited, England.
- Gangakhedkar, R. (2004) *Geosynthetic Reinforced Pile Supported Embankments*. Dissertação de Mestrado. University of Florida.
- Han, J. (1999) *Design and Construction of Embankments on Geosynthetic Reinforced Platforms Supported by Piles*. ASCE/PaDOT Geotechnical Seminar, 1999, Hershey.
- Han, J., Gabr, M. A. (2002) *Numerical Analysis of Geosynthetic-Reinforced and Pile-Supported Earth Platforms over soft soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(1), pp. 44-53, ASCE.
- Jaritngam, S. (2003) *Design Concept of Soil Improvement for Road construction on soft clay*. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 4, pp. 313-322.
- Lewis, R. W.; Schrefler, B. A. (1987) *The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Marques, D.O. (2008) *Reforço de Solos de Fundação com Colunas de Jet Grouting Encabeçadas por Geossintéticos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP.
- Rao, K. N. (2006) *Numerical Modeling and Analysis of Pile Supported Embankments*. Dissertação de Mestrado. University of Texas at Arlington.