

COLUNAS DE BRITA EM ATERROS SOBRE SOLOS MOLES. ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Stone columns in embankments on soft soils. Analysis by the finite element method

Tiago Sabino Domingues*

José Leitão Borges**

António Silva Cardoso***

RESUMO – O comportamento de um aterro sobre solos argilosos moles reforçados com colunas de brita é analisado usando um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos. Utiliza-se o conceito de célula unitária, que consiste no estudo isolado de uma coluna e do respectivo solo envolvente, com comportamento axissimétrico. O modelo numérico incorpora a teoria multidimensional de consolidação de Biot (formulação acoplada das equações 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 deslocamentos horizontais, dos excessos de pressão neutra, do factor de concentração de tensões e do factor de redução de assentamentos.

SYNOPSIS – The behaviour of an embankment on soft clayey soils reinforced with stone columns is analysed by a numerical model based on the finite element method. The unit cell formulation is used, which consists of the study of one column and its surrounding soil, with 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. In order to better understand the geotechnical behaviour of the problem, special emphasis is given to the analysis in time, during and after the construction period, of the settlements, horizontal displacements, excess pore pressures, stress concentration ratio and settlement reduction factor.

1 – PREÂMBULO

De entre as várias técnicas de melhoramento e de reforço de solos, a técnica das colunas de brita – preenchimento e compactação de aberturas cilíndricas no solo natural com material granular de melhores características mecânicas – é uma das mais usadas quando se pretende aumentar a estabilidade global e reduzir e acelerar assentamentos em obras de aterro sobre solos moles (Domingues, 2006).

Neste artigo é analisado o comportamento de um aterro de grandes dimensões em planta, construído sobre solos argilosos moles, reforçado com colunas de brita, através da aplicação dum modelo numérico, desenvolvido por Borges (1995), baseado no método dos elementos finitos.

Sinteticamente, o modelo, para a aplicação em questão, possui as seguintes características: i) formulação acoplada das equações de equilíbrio e de escoamento, considerando as relações consti-

* Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

** Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

E-mail: leitao@fe.up.pt

*** Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

E-mail: scardoso@fe.up.pt

tutivas (modelos elastoplásticos) em 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 qualquer fase, quer durante a execução do aterro quer no período pós-construção; ii) utilização do modelo de estados críticos p-q- θ na simulação do comportamento constitutivo dos solos (Borges, 1995; Borges e Cardoso, 1998; Lewis e Schrefler, 1987).

Por forma a melhor se entender a fenomenologia do problema, é dada especial atenção à análise, durante e após a execução do aterro, dos assentamentos, dos deslocamentos horizontais, dos excessos de pressão neutra, do factor de concentração de tensões e do factor de redução de assentamentos.

2 – DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema diz respeito a um maciço argiloso mole, com nível freático à superfície, reforçado com colunas de brita numa grande extensão, sobre o qual é construído um aterro com 2 m de altura; o solo mole está assente num estrato rígido e impermeável a 5,5 m de profundidade (Figura 1a).

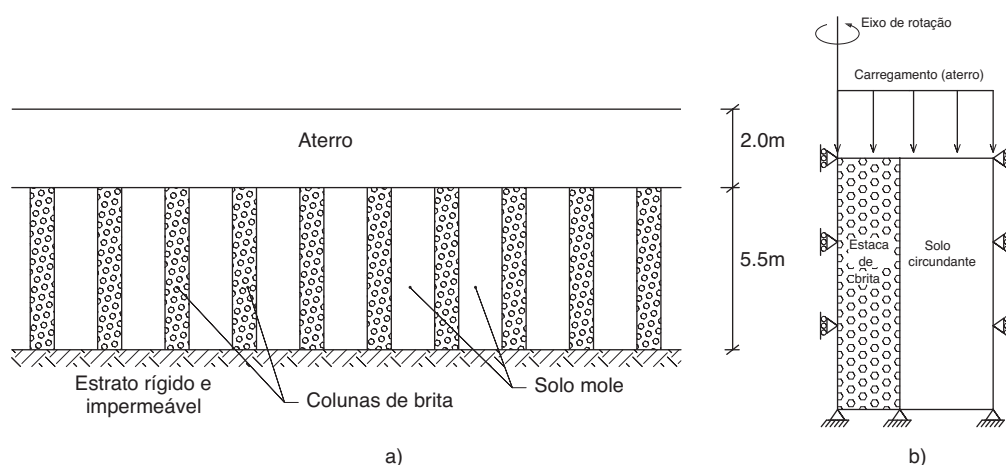


Fig. 1 – a) Esquema do problema; b) Célula fundamental ou unitária.

Para o estudo do problema recorre-se ao conceito de célula fundamental ou unitária (Figura 1b), usando o modelo numérico referido anteriormente. Esta abordagem consiste no estudo isolado de uma coluna de brita e do solo envolvente da sua área de influência, aplicando as condições de fronteira necessárias à simulação do comportamento real confinado, tendo em conta pois que a coluna está inserida num conjunto mais vasto de colunas.

Nestes termos, considerando axissimetria em relação ao eixo vertical que passa pelo centro da coluna, impediram-se os deslocamentos horizontais de todos os pontos situados na fronteira lateral (superfície cilíndrica vertical), de modo a simular o confinamento lateral e, face à existência do estrato rígido na base do solo mole, impediu-se qualquer deslocamento (quer vertical quer horizontal) na fronteira inferior do sistema analisado (Figura 1b).

As características geométricas do sistema de reforço (diâmetro e espaçamento das colunas) foram escolhidas tendo por base parâmetros médios observáveis na prática neste tipo de obras. O comprimento das colunas corresponde à possança do estrato mole, isto é, 5,5 m, sendo adoptado o

diâmetro de 1,0 m para as mesmas. O diâmetro da “área de influência” de cada coluna (coluna mais solo envolvente) é de 2,3 m e corresponde a um valor do coeficiente de substituição (CS) de cerca de 0,19 (o coeficiente de substituição é definido pela relação

$$CS = \frac{A_{col}}{A} = \frac{A_{col}}{A_{col} + A_{sol}} \quad (1)$$

em que A_{col} representa a área da coluna, A_{sol} a área do solo mole envolvente à mesma e A a área da célula unitária). Estas disposições geométricas correspondem a um espaçamento planimétrico em malha triangular de 2,2 m ou em malha quadrada de 2,03 m.

Na Figura 2 mostra-se a malha de elementos finitos triangulares considerada, indicando as diferentes fases construtivas do aterro.

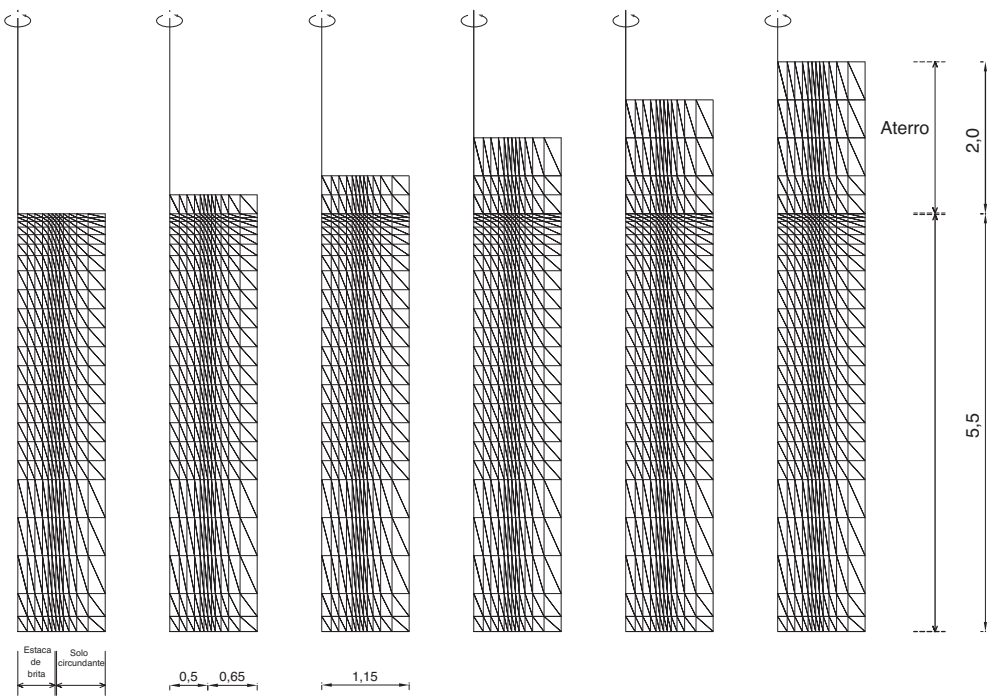


Fig. 2 – Malha de elementos finitos usada no problema.

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 e na coluna, por outro. 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 drenada da coluna e do aterro apresentam apenas 6 pontos nodais para deslocamentos, nos vértices e nos pontos médios dos lados. As condições de fronteira hidráulicas foram impostas fixando igual a zero o valor do excesso de pressão neutra nos pontos nodais dos elementos consti-

tuintes das diferentes superfícies de drenagem, isto é, da superfície do terreno natural (base do aterro) e da superfície lateral da coluna.

A simulação da construção do aterro foi estabelecida para um ritmo temporal contínuo de meio metro por semana, sendo pois de 4 semanas o tempo total de construção.

No Quadro 1 apresentam-se os parâmetros mecânicos e hidráulicos adoptados para cada material, designadamente: γ , peso volúmico; ν' , coeficiente de Poisson definido em termos de tensões efectivas; ϕ' , ângulo de resistência ao corte definido em termos de tensões efectivas; κ_h e κ_v , coeficientes de permeabilidade nas direcções horizontal e vertical; OCR, coeficiente de sobreconsolidação. Encontram-se igualmente representados os valores dos parâmetros do modelo de estados críticos p - q - θ utilizados na simulação do comportamento constitutivo: λ , declive da linha de consolidação em primeira carga e da linha de estados críticos; κ , declive das linhas de expansão e re-compressão; Γ , volume específico do solo, em situação de estado crítico, sujeito a uma tensão média efectiva igual a 1 kPa; N , volume específico do solo normalmente consolidado sujeito a uma tensão média efectiva isotrópica igual a 1 kPa. Todos estes parâmetros foram definidos tendo em conta valores experimentais típicos para este tipo de materiais (Borges, 1995; Lambe e Whitman, 1969).

Quadro 1 – Características mecânicas e hidráulicas dos materiais.

	κ	λ	Γ	ϕ' ($^{\circ}$)	ν'	N	γ (kN/m^3)	$k_x = k_y$ (m/s)	OCR
Coluna de brita	0,00275	0,011	1,8942	38	0,3	1,9	20	-	1
Solo circundante	0,02	0,22	3,26	30	0,25	3,40	17	10^{-9}	1
Aterro	0,005	0,03	1,8	35	0.3	1,81733	20	-	1

No que se refere ao estado de tensão inicial no solo mole, algumas considerações devem ser feitas. Em primeiro lugar, a execução de uma coluna de brita envolve sempre uma alteração do estado de tensão inicial, em maior ou menor grau dependendo obviamente do processo utilizado na construção. A instalação de uma coluna de brita causa necessariamente uma compressão lateral no solo envolvente, aumentando (em relação ao estado de repouso inicial) o confinamento que este fornece à própria coluna. Este aumento da tensão efectiva horizontal é traduzido pelo aumento do coeficiente de impulso em repouso, K_0 . Esta alteração é de muito difícil previsão face aos inúmeros factores envolvidos. Alguns autores, e numa perspectiva conservadora, não têm em conta este efeito, aconselhando a adopção de valores de K_0 idênticos antes e depois da execução das colunas (Besançon et al, 1984). Nayak (1982) adopta um valor de 0,6, correspondente ao estado de tensão inicial, sem melhoramento, e válido para execução de colunas através do método não vibratório com recurso a um pilão compactador. Outros autores consideram o efeito de melhoramento. Priebe (1995) adopta nos seus gráficos de dimensionamento de colunas de brita, executadas pelo método da vibrosubstituição, um estado de tensão hidrostático ($K_0=1$). O mesmo sugere Goughnour e Bayuk (1979). No presente trabalho estimou-se o valor de K_0 correspondente à situação antes da execução das colunas de brita, recorrendo à expressão semi-empírica proposta por Jaky (1944) para solos normalmente consolidados:

$$K_0 = 1 - sen\phi' \tag{2}$$

que, para o valor de 30° adoptado para o ângulo de resistência ao corte em termos de tensões efectivas do solo mole, conduz ao valor de K_0 de 0,5. Para atender ao efeito do método construtivo, no caso em estudo considerou-se uma situação intermédia entre K_0 e $K=1$, tendo-se adoptado o valor de 0,7.

3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 – Deslocamentos

Apresenta-se na Figura 3 as deformadas obtidas ao fim de 4 (final da construção), 7 e 78 (final da consolidação) semanas respectivamente (os deslocamentos estão representados a uma escala 5 vezes superior à escala geométrica). Na Figura 4 mostra-se a evolução no tempo do assentamento médio do conjunto coluna-solo na base do aterro.

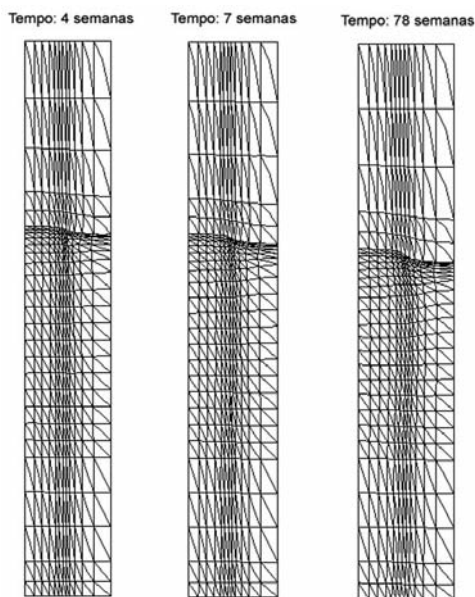


Fig. 3 – Deformadas ao fim de 4, 7 e 78 semanas (factor de ampliação de deslocamentos igual a 5).

Como primeiro comentário geral, observa-se que os assentamentos, processando-se logo desde o início da construção do aterro, aumentam, como seria de esperar, à medida que o carregamento aumenta e a consolidação se processa, até ao valor final médio de cerca de 29,2 cm. Observa-se também um alargamento da coluna contra o solo, idêntico ao modelo de rotura por expansão lateral (Hughes e Withers, 1974; Dayte, 1982).

Quanto à evolução temporal dos assentamentos (Figura 4), distinguem-se mais ou menos duas fases com comportamento distinto. Existe uma primeira fase em que o conjunto coluna-solo exibe uma alta taxa de assentamentos que é aproximadamente constante (cerca de 3 cm/semana) até uma altura em que há uma espécie de abrandamento progressivo (em termos relativos) até à estabilização do valor do assentamento. Com efeito, verifica-se que a maior parte dos assentamentos, cerca de 90%, dá-se até à semana 17, o que, descontando o primeiro mês para a construção do aterro, resulta em pouco mais de 3 meses para a materialização dos mesmos.

Observa-se igualmente que existem assentamentos apreciáveis durante a construção, de tal modo que no final da construção (4 semanas) o assentamento médio na base do aterro atinge já um valor não negligenciável, da ordem dos 12,5 cm, o que representa cerca de 43% do assentamento total.

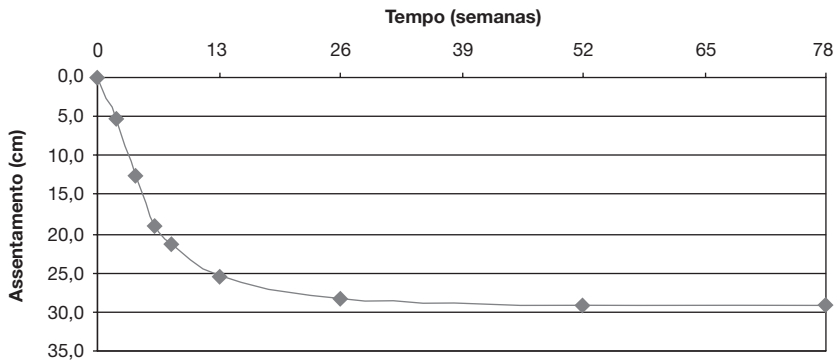


Fig. 4 – Assentamento médio do conjunto coluna-solo, na base do aterro, em função do tempo decorrido.

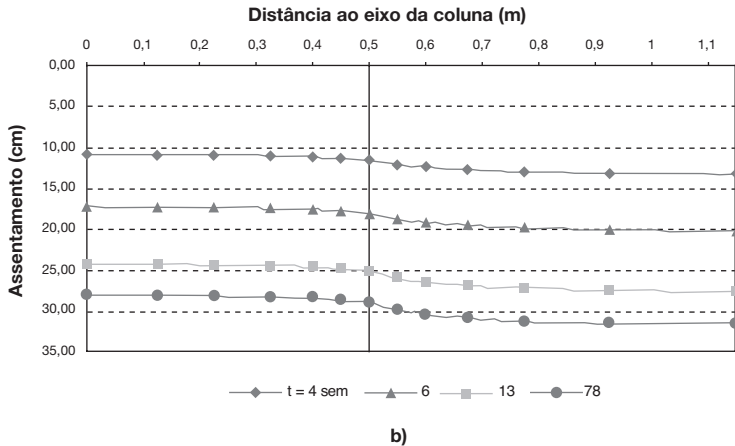
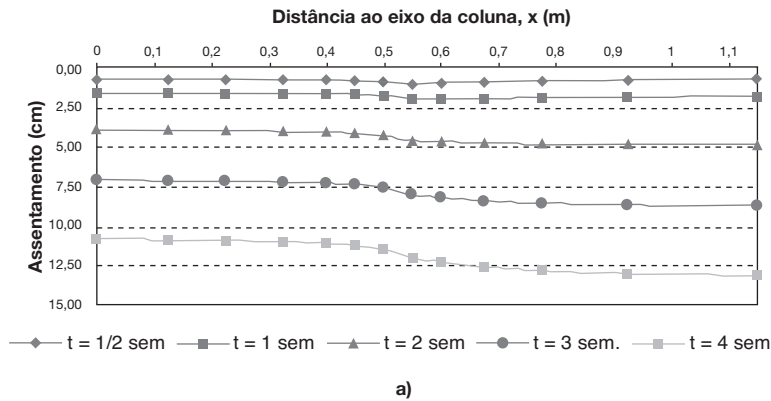


Fig. 5 – Assentamentos na base do aterro: a) durante a construção; b) no período pós-construtivo.

Mostra-se na Figura 5, os perfis dos assentamentos na base do aterro em diferentes instantes, durante e após a construção.

Analisando em pormenor esta figura, observa-se que, como seria de esperar, não existe igualdade de assentamentos na base do aterro, entre a coluna e o solo circundante, sendo notório – e previsível – um menor assentamento da coluna, dada a sua maior rigidez em comparação com a do solo circundante (em condições drenadas). No entanto, esta diferença não é apreciável – assentamentos médios finais (calculados entrando com os pesos das respectivas áreas) de 26,4cm e 29,6cm para a coluna e para o solo circundante respectivamente, conduzindo a uma diferença (3,2cm) da ordem de 11% do assentamento total médio – o que está de acordo com o apontado por diversos autores (Alamgir e Miura, 1997).

Esta pequena diferença de assentamentos no final da consolidação é devida à existência de efeito de arco que se processa quer no aterro propriamente dito quer na fundação. Este efeito – transferência de tensões do solo mole (mais deformável) para a brita (menos deformável) –, aumenta a carga na coluna e alivia-a na massa de solo circundante, o que tende a homogeneizar os assentamentos globais. Na Figura 6 ilustra-se o esquema de transmissão de cargas referido.

Este duplo efeito de arco (na camada de aterro e na fundação) também é visualmente perceptível através das cruzetas de tensões efectivas, que se encontram representadas na Figura 7, no final da consolidação. É aí bem visível o duplo efeito de arco, com a natural concentração de tensões verticais na zona da coluna (mais concentradas na coroa exterior da mesma) e o aliviar das tensões verticais no solo.

Na Figura 8 representa-se o perfil de deslocamentos horizontais na interface coluna-solo nos instantes correspondentes a 4, 9 e 78 semanas. Observando esta figura, verifica-se que processam-se deslocamentos horizontais ao longo de toda a coluna (com excepção óbvia da base) mas que é na zona até 2,5 m de profundidade que se concentram os maiores valores. Outra observação prende-se com o facto de até ao final do carregamento (4 semanas) a variação dos deslocamentos radiais ser aproximadamente constante em profundidade, notando-se que o “disparar” dos mesmos - nos primeiros 2,5 m – ocorre após a construção, com o processo de consolidação.

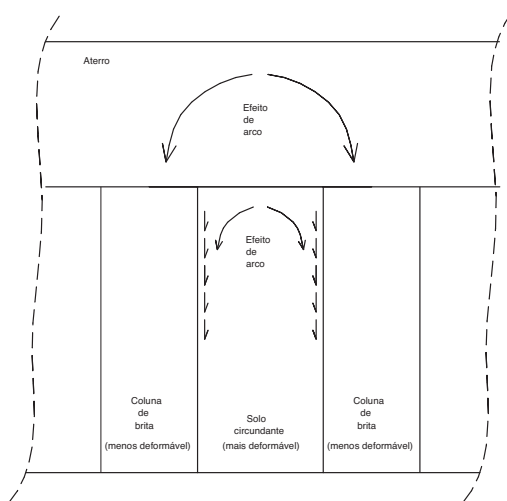


Fig. 6 – Efeito de arco no sistema coluna-solo circundante e no aterro.

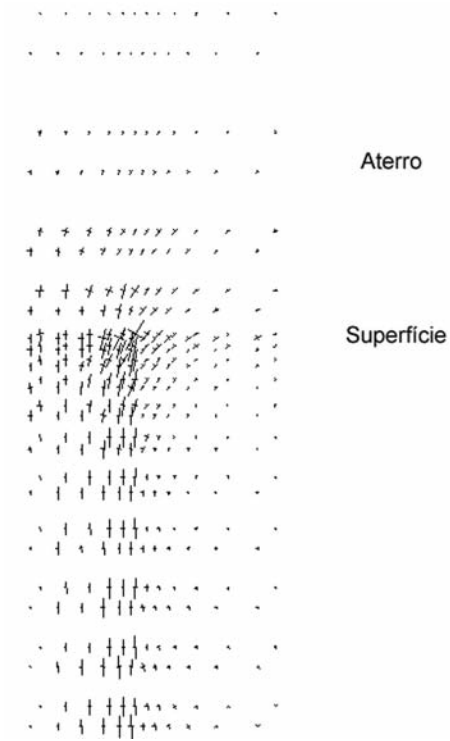


Fig. 7 – Cruzetas de tensões efectivas no final da consolidação (78 semanas).

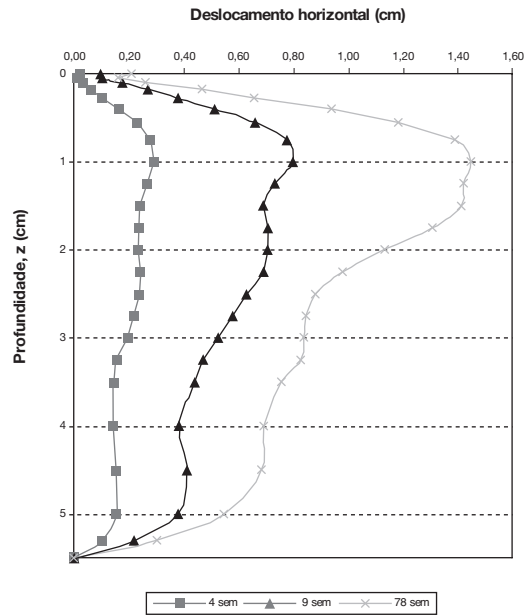


Fig. 8 – Evolução no tempo dos deslocamentos horizontais na interface coluna-solo.

3.2 – Tensões

Apresenta-se na Figura 9 os excessos de pressão neutra durante a fase de construção do aterro e no período pós-constutivo. É visível uma rápida evolução do excesso de pressão neutra com o tempo, sendo igualmente fácil de visualizar as duas fronteiras de drenagem existentes. No final da construção do aterro, ou seja às 4 semanas, o excesso de pressão neutra máximo é de cerca de 33,5 kPa (inferior aos 40 kPa correspondentes ao peso de terras dos 2 m de aterro, que teoricamente se obteriam supondo o solo carregado instantaneamente), e apenas na zona mais afastada da coluna a uma profundidade entre 0,5 a 2 diâmetros de coluna. É pois notório, mesmo durante o período construtivo, o efeito de aceleração da consolidação devido à drenagem provocada pela presença das colunas de brita. Também se pode observar que a forma das linhas isócronas do excesso de pressão neutra não é vertical.

Verifica-se igualmente que a partir das 9 semanas a parcela que falta dissipar dos excessos de pressão neutra é já pequena – o valor máximo, numa zona já de extensão muito reduzida, é de 21 kPa – e que entre as 13 e 26 semanas a consolidação está em grande parte realizada, o que está de acordo com a evolução com o tempo do assentamento médio na base do aterro, ilustrada na Figura 4.

Ao longo do processo de consolidação, com a consequente redução de volume pela expulsão de água à medida que se dissipam os excessos de pressão neutra, aumentam as tensões efectivas, especialmente na coluna de brita.

Este fenómeno de concentração de tensões na coluna pode ser observado na Figura 10, na qual se representam, para diferentes instantes de tempo, durante e após a construção, os diagramas dos acréscimos da tensão vertical efectiva, em função da distância ao centro da coluna, à profundidade de 0,4 m. Da observação desta figura ressalta que, em cada instante, o diagrama não é constante em cada um dos materiais. Particularmente na coluna, as variações são bastante apreciáveis, notando-se claramente a tendência para um maior aumento da tensão efectiva vertical na orla exterior da mesma.

Por outro lado, após a construção, continuam a aumentar, de modo bastante expressivo, as tensões verticais efectivas não só no solo mole mas também na coluna de brita. Dado o comportamento drenado da coluna e o facto de não aumentarem as cargas exteriores durante esse período, o aumento das tensões efectivas na coluna ilustra claramente a transferência de tensões, no tempo, do solo mole para a coluna (efeito de arco) associada aos processos de consolidação. Estes resultados mostram inequivocamente o funcionamento como elemento de reforço da coluna em todas as fases da obra, durante e após a construção.

O fenómeno de concentração das tensões verticais efectivas pode, igualmente, ser avaliado pelo designado factor de concentração de tensões, FC , dado pela relação:

$$FC = \frac{\Delta\sigma'_v(col)}{\Delta\sigma'_v(solo)} \quad (3)$$

em que $\Delta\sigma'_v(col)$ e $\Delta\sigma'_v(solo)$ representam, respectivamente, os acréscimos médios da tensão vertical efectiva na coluna e no solo. Este factor não é pois independente do tempo, nem é constante ao longo da profundidade da coluna.

Apresenta-se na Figura 11 um diagrama com a evolução em profundidade de FC para três instantes de tempo (final da construção do aterro, 13 semanas após o início do mesmo e no final da consolidação).

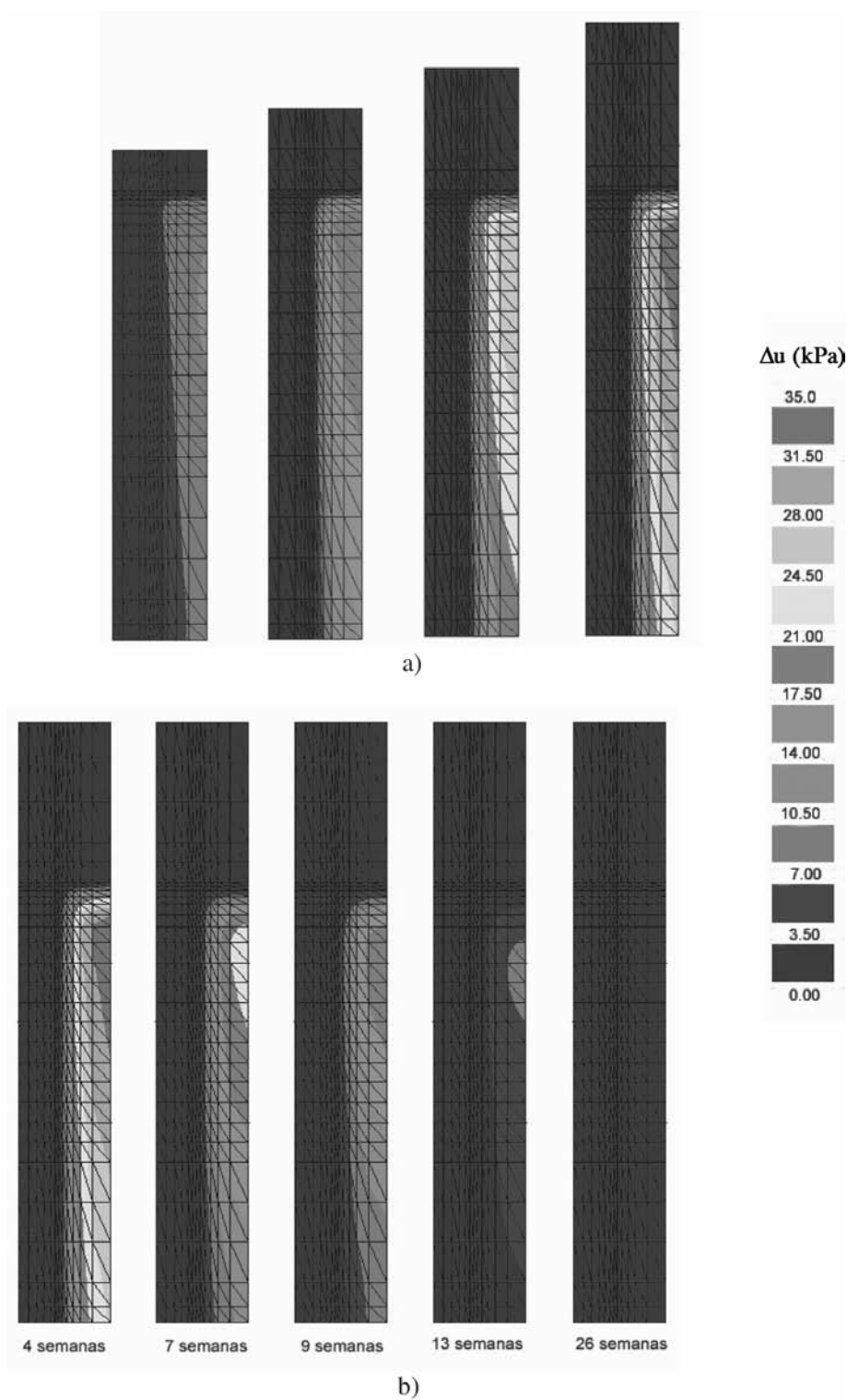


Fig. 9 – Excesso de pressão neutra: a) durante a construção; b) após a construção.

Analisando esta figura constata-se que FC decresce à medida que se processa a consolidação. Este efeito é explicado, naturalmente, pelo maior aumento relativo do acréscimo da tensão efectiva vertical no solo que na coluna.

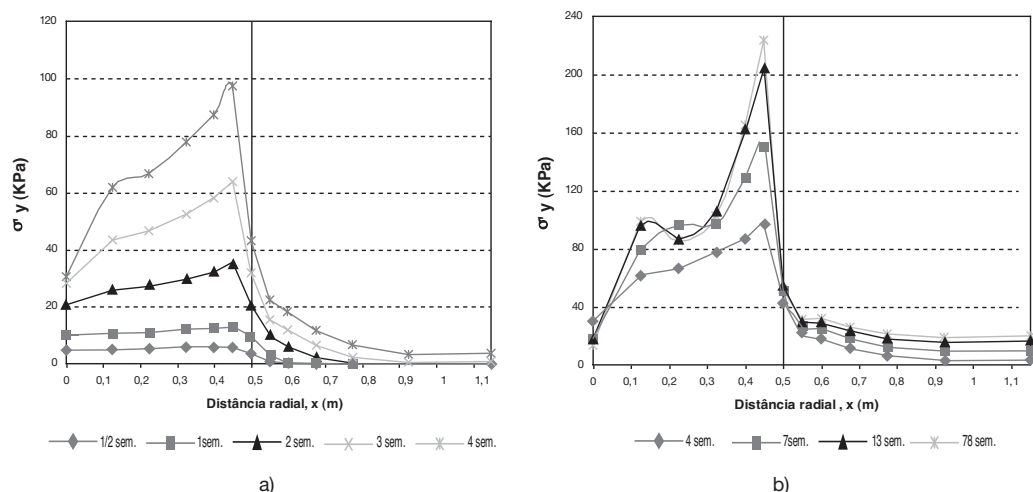


Fig. 10 – Incrementos de tensão vertical efectiva à profundidade de 0.4 m: a) durante a construção; b) após a construção.

No final da consolidação, o factor de concentração de tensões, partindo de um valor de 3,6 à superfície, aumenta rapidamente até uma profundidade de aproximadamente 0,5 m, onde atinge o valor mais elevado de cerca de 6,7. A partir dessa profundidade, decresce mais moderadamente e estabiliza num valor da ordem de 5. Constata-se ainda que: (i) existe, tal como referido anteriormente, mecanismo de efeito de arco no aterro propriamente dito, já que à superfície o valor de FC , 3,6, é já superior a metade do valor máximo atingido próximo de 0,5 m de profundidade; (ii) o efeito de arco na fundação (acréscimo de tensão vertical na coluna) está limitado, em termos significativos, às camadas mais superficiais (até cerca de 0,5 m), uma vez que é claramente nessa zona que FC aumenta rapidamente (tensões de corte na superfície lateral da coluna dirigidas para baixo); (iii) entre 0,5 e 2,0 m de profundidade, o efeito inverte-se (diminuição de FC , inversão do sentido das tensões de corte na interface coluna-solo), sendo inexpressivo para profundidades superiores. Não obstante a muito menor deformabilidade da coluna de brita quando comparada com a do solo envolvente, ao concentrarem-se mais tensões verticais efectivas naquela, entre 0,5 e 2,0 m a coluna deforma-se mais do que o próprio solo envolvente e passa a “apoiar-se” neste, diminuindo assim uma parte das suas tensões efectivas verticais e, consequentemente, o valor de FC .

Para comparação com o exemplo numérico estudado, indicam-se no Quadro 2 os valores esperados para o factor de concentração de tensões, no final da consolidação, segundo os autores aí referidos. Dada a variação de FC em profundidade, como constatado no presente trabalho, os valores indicados por Balaam e Poulos (1983) e Priebe (1976) traduzem valores médios de FC ao longo do comprimento da coluna. Para o caso numérico em análise, o valor médio de FC é de cerca de 5,0 e apresenta pois uma ordem de grandeza semelhante ao obtido pelo proposto por aqueles autores.

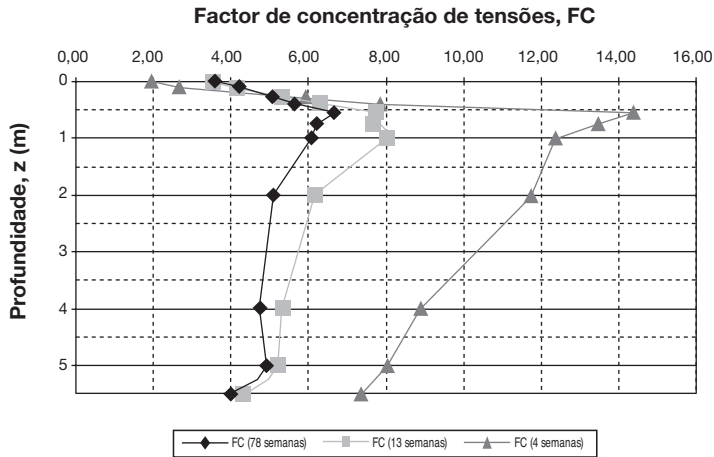


Fig. 11 – Variação em profundidade do factor de concentração de tensões, *FC*, nos instantes de 4, 13 e 78 semanas.

Quadro 2 – Valores do factor de concentração de tensões, *FC*, segundo diversos autores, para a relação $1/CS=5.3$, no final da consolidação.

Autor	Factor de Concentração de Tensões, <i>FC</i>
Balaam e Poulos (1983)	6,2
Priebe (1976)	5,5

3.3 – Factor de redução de assentamentos

O factor de redução de assentamentos, *FRA*, de grande importância prática na avaliação da eficiência do reforço, é definido pelo quociente entre o assentamento do solo reforçado com colunas de brita (s_R) e o assentamento do solo não reforçado para condições idênticas (s_{NR}):

$$FRA = \frac{s_R}{s_{NR}} \quad (4)$$

Muitas vezes é também usado o inverso de *FRA*, o designado factor de melhoramento, *n*.

Com o objectivo de se avaliar o valor de *FRA* no caso presente, modelou-se o problema anteriormente descrito mas não considerando a presença das colunas de brita. Foi adoptado no solo mole um valor de K_0 igual a 0,5, correspondente ao estado de repouso inicial. Apresenta-se na Figura 12 a evolução do assentamento médio ao longo do tempo na base do aterro para ambas as situações. Consta-se que, pela introdução do reforço com colunas de brita, há uma diminuição do valor do assentamento máximo de 44,7 para 29,2 cm, que corresponde a uma redução de cerca de 35%. O valor de *FRA*, é então de 0,65, e o factor de melhoramento, *n*, de 1,53.

De modo a balizar os resultados obtidos, apresenta-se no Quadro 3 o assentamento previsto por diversos métodos simplificados de autores distintos. Chama-se a atenção para o facto destas estimativas partirem todas de pressupostos diferentes, bem como alguns dos seus parâmetros serem

estimados indirectamente, pelo que a sua comparação com o resultado numérico deve ser considerada como meramente indicativa (as correlações entre parâmetros dos diferentes métodos é detalhadamente descrita em Domingues, 2006). Da observação do quadro conclui-se que não existe uma grande dispersão de resultados entre os diversos autores, nem grandes diferenças em relação à simulação numérica.

Observando de novo a Figura 12, nota-se igualmente que, para além da óbvia redução do assentamento com a introdução de colunas de brita, é notória também, como seria de esperar, uma forte aceleração da consolidação, a qual se encontra em grande parte realizada a partir da 12^a semana.

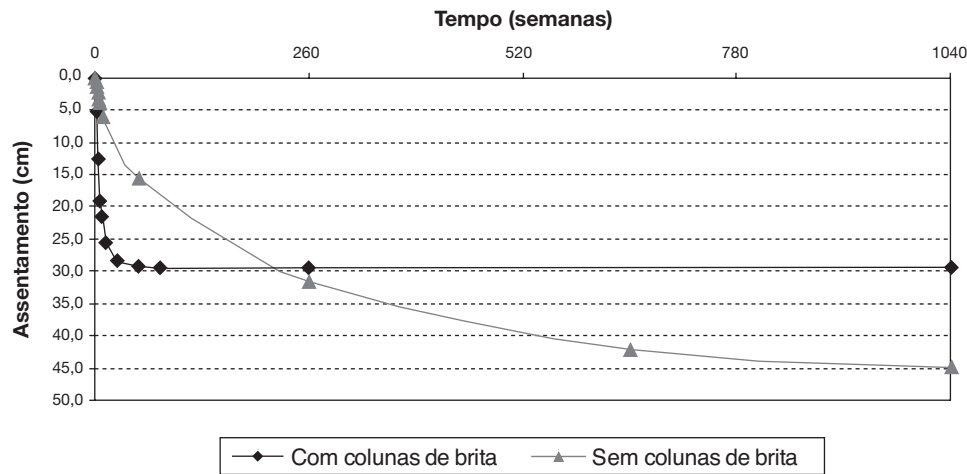


Fig. 12 – Assentamentos médios na base do aterro ao longo do tempo.

Quadro 3 – Assentamentos na base do aterro reforçado e valores de FRA e n, segundo diferentes métodos simplificados. Comparação com o cálculo numérico.

	Modelo numérico	Mattes e Poulos (1969)	Aboshi et al (1979)	Balaam e Booker (1985)	Priebe (1995)
FRA (%)	65	53	57	69	53
n	1,53	1,94	1,75	1,44	1,94
Assentamento (cm)	29,2	23	25,5	31	23

FRA - factor de redução de assentamentos; n - factor de melhoramento.

4 – CONCLUSÕES

Utilizando o conceito de célula unitária, analisou-se o comportamento dum aterro sobre solos moles reforçado com colunas de brita, através da aplicação dum modelo numérico baseado no método de elementos finitos. Da análise dos resultados, várias conclusões podem ser destacadas.

(1) Não são expressivos os assentamentos diferenciais na base do aterro no final da consolidação (11% do assentamento total médio), não obstante a grande diferença de rigidezes da coluna de brita e do solo mole circundante.

(2) Este facto é devido a transferência de carga, por efeito de arco, do material mais deformável (solo mole) para o menos deformável (coluna de brita), o que tende a homogeneizar os assentamentos, reduzindo significativamente o seu valor médio final.

(3) Em todas as fases da obra, ocorrem deslocamentos horizontais na interface coluna-solo em todo o seu comprimento; os valores mais expressivos ocorrem nas zonas mais superficiais, até 2,5 m de profundidade, e aumentam significativamente com o processo de consolidação.

(4) O efeito de drenagem devido à presença das colunas de brita acelera expressivamente a dissipação dos excessos de pressão neutra, sendo mesmo significativos, devido a este efeito, os assentamentos na base do aterro no final do período construtivo.

(5) Durante e após a construção, aumentam ao longo do tempo as tensões verticais efectivas no solo mole e na coluna de brita. Após a construção, o aumento das tensões na coluna processa-se por efeito de arco, ou seja, por transferência de tensões do solo mole para a coluna, à medida que naquele acontece a dissipação dos excessos de pressão de água nos poros.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboshi, H.; Ichimoto, E.; Enoki, M.; Harada, K. – *The Compozer - A method to improve characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns*. International Conference on soil reinforcement, Reinforced earth and other techniques, Vol. I. Paris, pp. 221-216, 1979.

Alamgir, M.; Miura, N. – *Time-Dependent response of Soft Ground Improved by Granular Columns*. Int. Conf. on Ground Improvement Techniques, Macau, 1997.

Balaam, N. P.; Poulos, H. G. – *The behaviour of foundations supported by clays stabilized by stone columns*. C.R. 8th European conference on SMFE, Helsinki, Vol.1, pp. 199-204, 1983.

Balaam, N. P.; Booker, J. R. – *Effect of stone column yield on settlement of rigid foundations in stabilized clay*. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 9, pp. 331-351, 1985.

Besançon, G.; Iorio, J. P.; Soyey, B. – *Analyse des paramètres de calcul intervenant dans le dimensionnement des colonnes ballastées*. Renforcement en place des sols et des roches, Paris, 1984.

Borges, J. L. – *Aterros sobre solos moles reforçados com geossintéticos. Análise e dimensionamento*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Porto, 1995.

Borges, J. L.; Cardoso, A. S. – *Simulação numérica do modelo de estados críticos (p,q,θ) em aterros sobre solos moles*. Revista Geotecnia, nº 84, pp. 39-63, 1998.

Borges, J. L.; Cardoso, A. S. – *Simulação numérica dos processos de consolidação em aterros sobre solos moles*. Revista Geotecnia, nº 89, pp 57-75, 2000.

Britto, A.M.; Gunn, M.J. – *Critical state soil mechanics via finite elements*. Ellis Horwood Limited, England, 1987.

Dayte, K. R. – *Settlement and bearing capacity of foundation system*. Symposium on recent developments in ground improvement techniques, Bangkok, 1982.

Domingues, T. S. – *Reforço de Fundações com Colunas de Brita em Aterros sobre Solos Moles. Análise e dimensionamento*. Dissertação de mestrado, FEUP, 2006.

Goughnour, R. R.; Bayuk, A. A. – *A field study of long-term settlement of loads supported by stone columns in soft ground*. Proc. Int. Conf. Soil Reinfor., Paris, Vol. 1, pp. 279-286, 1979.

- Hughes, J. O.; Withers, N. J. – *Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns*. Ground Engineering, pp. 42-49, 1974.
- Jaky, J. – *The coefficient of earth pressure at rest*. Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary, 1944.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. *Soil mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1969.
- Lewis, R.W.; Schrefler, B.A. – *The finite element method in the deformation and consolidation of porous media*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1987.
- Mattes, N. S.; Poulos, H. G. – *Settlement of single compressible pile*. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 95, SM1, pp. 189-207, 1969.
- Nayak, N. V. – *Recent innovations on ground improvement by stone columns*. Symposium on recent developments in ground improvement techniques, Bangkok, 1982.
- Priebe, H. J. – *Abschätzung des setzungsverhaltens lines durch stopverdish tung verbesserten baugrundes*, Die Bautechnik, 5, pp. 160-162, 1976.
- Priebe H. J. – *The design of vibro replacement*. Ground Engineering, Vol. 28, n° 10, 1995.