

# **ATERROS SOBRE SOLOS MOLES REFORÇADOS COM COLUNAS DE BRITA. ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

## **EMBANKMENTS ON SOFT SOILS REINFORCED WITH STONE COLUMNS. ANALYSIS BY A NUMERICAL MODEL BASED ON THE FINITE ELEMENT METHOD.**

Domingues, Tiago Sabino, *ISEP, Iperforma SA, Porto, Portugal, tsd@isep.ipp.pt*

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

Cardoso, António Silva, *FEUP, Porto, Portugal, scardoso@fe.up.pt*

### **RESUMO**

O comportamento de um aterro sobre solos moles reforçados com colunas de brita é analisado usando um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos. O modelo incorpora a teoria multidimensional de consolidação de Biot (formulação acoplada das equações de escoamento e de equilíbrio) com relações constitutivas simuladas pelo modelo dos estados críticos  $p-q-\theta$ . Recorre-se ao conceito de célula unitária, constituído por uma coluna de brita e o respectivo solo circundante, de modo a se perceber 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.

### **ABSTRACT**

The behaviour of an embankment on soft soils reinforced with stone columns is analysed by a numerical model based on the finite element method. The model incorporates the Biot's consolidation theory (coupled formulation of the flow and equilibrium equations) with constitutive relations simulated by the  $p-q-\theta$  critical state model. The elemental cell formulation is used, composed by one column and its surrounding soil, in order to understand the problem behaviour. Special emphasis is given to the analysis in time, during and after the construction period, of the settlements, horizontal displacements, excess of pore pressures, stress concentration ratio and settlement reduction factor.

### **1. PREÂMBULO**

A técnica de reforço de solos com colunas de brita em solos é uma das mais usadas quando se pretende aumentar a capacidade de carga e reduzir e acelerar assentamentos [1]. É indicada especialmente para fundações de aterros, bem como para quaisquer outras situações com cargas relativamente modestas que permitam tolerar assentamentos apreciáveis. A introdução de colunas de brita em solos moles é responsável por um aumento da estabilidade de aterros executados sobre os mesmos, uma vez que as superfícies de deslizamento passam a interceptar as referidas colunas que apresentam características mecânicas superiores às dos solos. Para além do aumento de resistência, também se tira partido da grande aceleração dos assentamentos processados, que ocorrerão na sua quase totalidade durante a fase de construção da obra.

Neste artigo é analisado, durante e após a construção, o comportamento de um aterro sobre solos argilosos moles reforçados com colunas de brita através da aplicação dum modelo numérico, desenvolvido por Borges [2]. Utiliza-se o conceito de célula unitária, que consiste no estudo isolado de uma coluna e respectiva área de influência, com comportamento axissimétrico.

Sinteticamente, o modelo, para a aplicação em questão, possui as seguintes características: i) formulação acoplada das equações de equilíbrio e escoamento considerando as relações constitutivas (modelos elastoplásticos) formuladas em tensões efectivas (extensão da teoria de consolidação de Biot) [2,3,5]; 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  $p$ - $q$ - $\theta$  na simulação do comportamento constitutivo dos solos de fundação e do aterro [2 – 4].

## 2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste na avaliação do comportamento de um solo mole reforçado com colunas de brita numa grande extensão, sujeito a um carregamento exterior materializado por um aterro; o solo mole está assente num estrato rígido impermeável a 5.5m de profundidade, tendo o aterro 2m de altura (ver Figura 1a).

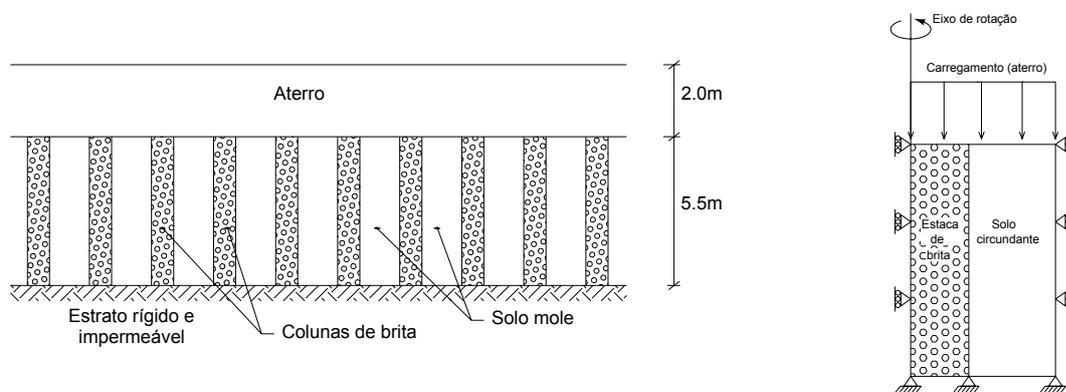


Figura 1 – a) Esquema do problema a estudar;

b) Célula fundamental

Dada a grande extensão planimétrica do aterro, para o estudo do problema recorreu-se ao conceito de célula fundamental ou unitária, usando o modelo numérico referido anteriormente. Esta abordagem consiste no estudo isolado de um sistema constituído por uma coluna de brita e pelo solo mole envolvente da sua área de influência, aplicando as condições de fronteira necessárias à simulação do comportamento real confinado, no pressuposto pois de que a coluna está inserida num conjunto mais vasto de colunas.

Nestes termos, dada a possibilidade de se considerar simetria em torno de um eixo de rotação (vertical e a passar pelo centro da coluna), pode simplificar-se a análise considerando-a axissimétrica. Impediu-se o deslocamento horizontal de todos os pontos situados na fronteira vertical (superfície cilíndrica), 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 (ver Figura 1b).

As características geométricas foram escolhidas com base em parâmetros médios observáveis na prática neste tipo de obras. O comprimento considerado para a coluna corresponde à possança do estrato mole, isto é, 5.5 metros, sendo adoptado para a mesma um diâmetro de 1.0m. A “área de influência” da coluna de brita tem 2.3m de diâmetro e foi definida tendo por base um valor para o coeficiente de substituição ( $CS$ ) de cerca de 0.19 (o coeficiente de substituição define-se pela relação entre a área de coluna efectivamente realizada e a área total de influência dessa coluna). Estas disposições geométricas correspondem a um espaçamento planimétrico em malha triangular de 2.2 m ou em malha quadrada de 2.03m.

Para aplicação do modelo numérico, foi preciso discretizar o meio contínuo através de elementos finitos. Na Figura 2 pode observar-se a malha de elementos finitos triangulares considerada, com indicação das dimensões mais importantes, para cada uma das fases consideradas no cálculo.

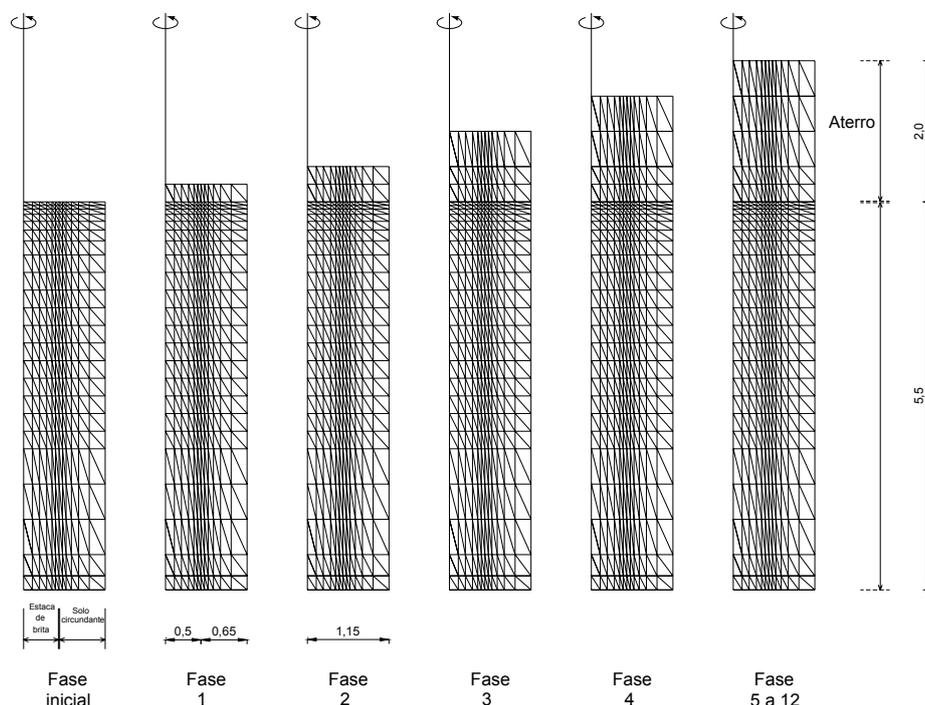


Figura 2 – Malha de elementos finitos usada no problema

Os elementos triangulares usados na simulação acoplada do solo mole apresentam 6 pontos nodais para deslocamentos (nos vértices e a meio dos três lados) e 3 pontos nodais para o excesso de pressão neutra (nos vértices). Os elementos triangulares que foram usados na simulação drenada da coluna e do aterro apresentam apenas 6 pontos nodais para deslocamentos, nos vértices e a meio dos lados.

A simulação da construção do aterro foi estabelecida para um ritmo temporal contínuo de meio metro por semana, perfazendo, pois, para a altura total do aterro (2.0m), o tempo de construção de 4 semanas.

No que refere aos parâmetros mecânicos e hidráulicos adoptados para cada material, eles encontram-se resumidos no Quadro 1.

Quadro 1 – Características mecânicas e hidráulicas dos materiais

	$k$	$\lambda$	$\Gamma$	$\phi'(^{\circ})$	$\nu'$	$N$	$\gamma(kN/m^3)$	$k_x$ (m/s)	$k_y$ (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	$10^{-9}$	$10^{-9}$	1
Aterro	0.005	0.03	1.8	35	0.3	1.81733	20	-	-	1

( $\lambda$ , inclinação da linha de compressão isotrópica virgem e da linha de estados críticos;  $k$ , inclinação das linhas de descompressão e recompressão isotrópicas;  $\Gamma$ , volume específico do solo em estado crítico sujeito a uma tensão média efectiva de 1kPa;  $N$ , volume específico do solo normalmente consolidado sujeito a uma tensão média efectiva de 1kPa;  $\phi'$ , ângulo de atrito em termos de tensões efectivas;  $\nu'$ , coeficiente de Poisson definido em termos de tensões efectivas;  $\gamma$ , peso específico;  $k_x$  e

$k_y$ , coeficientes de permeabilidade nas direcções horizontal e vertical, respectivamente;  $OCR$ , grau de sobreconsolidação).

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 [6]. Nayak [7] 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 [8] 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 et al [9]. 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 [10] para solos normalmente consolidados:

$$K_0 = 1 - \text{sen}\phi' \quad (1)$$

que, para um valor de  $30^\circ$  adoptado para o ângulo de atrito em termos de tensões efectivas do solo mole, conduz ao valor de  $K_0$  igual a 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 DE 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 ampliados 5 vezes); na Figura 4 mostra-se a evolução no tempo do assentamento médio do conjunto coluna-solo na base do aterro.

Como primeiro comentário geral, observa-se que os assentamentos processam-se logo no início da construção do aterro, sendo maiores no solo do que na coluna, tal como seria de esperar. Aumentam à medida que a consolidação avança, para um 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 [11,12].

Quanto à evolução temporal dos assentamentos, distinguem-se mais ou menos duas fases com comportamento distinto. Existe uma primeira fase em que o conjunto coluna/solo exhibe 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.

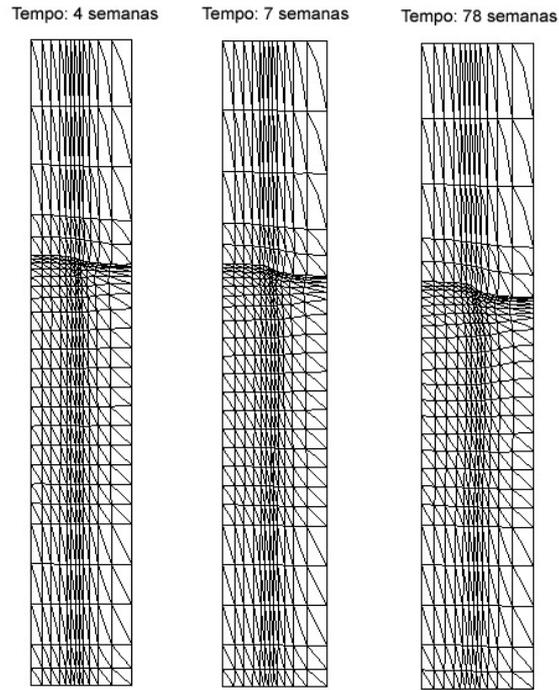


Figura 3 – Deformadas ao fim de 4, 7 e 78 semanas (factor de ampliação de deslocamentos igual a 5)

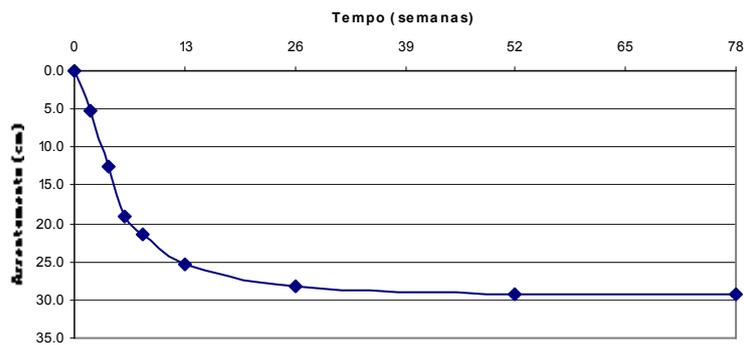


Figura 4 – Assentamento médio do conjunto coluna/solo, na base do aterro, em função do tempo decorrido.

Uma segunda observação prende-se com a não 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 de 26.4cm e 29.6cm para a coluna e para o solo circundante respectivamente - o que conduz a uma diferença (3.2cm) da ordem dos 11% do assentamento total médio no final da consolidação, o que está de acordo com o apontado por diversos autores [13]. Este pequeno diferencial de assentamento no final da consolidação é devido ao efeito de arco que se materializa no solo, que é responsável pela transferência de tensões do solo (mais deformável) para a brita (menos deformável), e também na camada de aterro. Estes dois efeitos conjugados, aumentando a carga na coluna de brita e aliviando-a na massa de solo circundante, tendem a homogeneizar os assentamentos globais.

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 atingiu já um valor não negligenciável, da ordem dos 12.5 cm, o que representa cerca de 43% do assentamento total.

Os perfis de assentamentos obtidos em diferentes instantes após a construção estão representados na Figura 5.

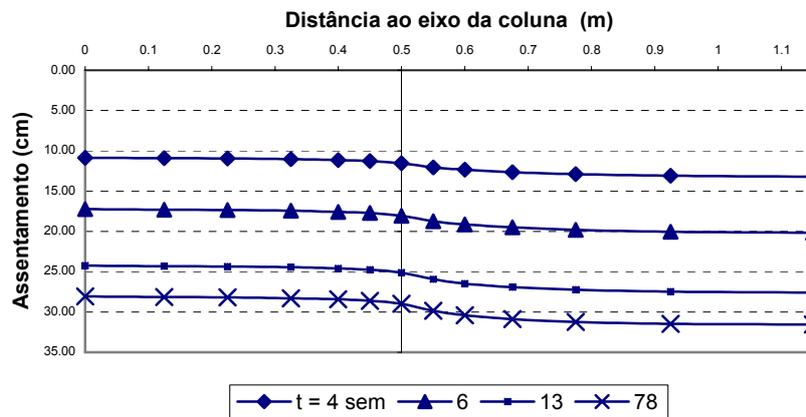


Figura 5 – Assentamentos na base do aterro no período pós-constructivo.

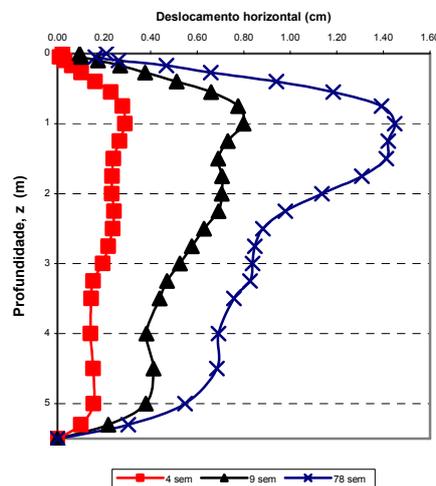


Figura 6 – Evolução ao longo do tempo dos deslocamentos horizontais ao longo da interface coluna/solo

Na Figura 6 representa-se o perfil de deslocamentos horizontais na interface coluna/solo para 4, 9 e 78 semanas. Observando esta figura, verifica-se que os deslocamentos horizontais existem ao longo do comprimento de toda a coluna (com a exceção óbvia da base) mas que é na zona até aos 2.5 metros de profundidade que se concentram os maiores deslocamentos. Outra observação prende-se com o facto de até o final do carregamento (4 semanas) a variação dos deslocamentos radiais ser aproximadamente constante em profundidade, notando-se apenas que o “disparar” dos mesmos - nos primeiros 2.5 metros - decorre do próprio processo de consolidação.

### 3.2. Tensões

Apresenta-se na Figura 7 as colorações dos excessos de pressão neutra durante o período pós-constructivo. 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 da pressão neutra máximo é de cerca de 33.5 kPa (inferior aos 40 kPa correspondente ao peso de terras dos 2 metros 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. 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 de dissipação dos excessos de pressão neutra é já pequena – o valor máximo, numa zona já de extensão muito reduzida, é de 21kPa – e que entre as 13 e 26 semanas a consolidação praticamente que termina, 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 conseqüente 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 da concentração das tensões efectivas verticais na coluna de brita pode ser avaliado pelo designado factor de concentração de tensões,  $FC$ , que se define pela relação entre o acréscimo médio da tensão vertical efectiva na coluna e o do solo, provocados pelo carregamento exterior. Este factor não é independente do tempo nem é constante ao longo da profundidade da coluna.

Apresenta-se na Figura 8 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).

Analisando a figura constata-se que  $FC$  decresce claramente à medida que se processa a consolidação. Este efeito pode ser explicado devido ao maior aumento relativo do acréscimo da tensão efectiva vertical no solo em relação à coluna. Verifica-se que, com o decorrer do tempo e à medida que as pressões do liquido intersticial diminuem com o processo de consolidação, em ambos os materiais há um aumento da tensão efectiva vertical, mas, em termos relativos, esse aumento é maior no solo do que na coluna, diminuindo deste modo o valor de  $FC$ .

No final da consolidação observa-se claramente uma variação de  $FC$  em profundidade, e que este, partindo de um valor de 3.6 aumenta rapidamente até que a uma profundidade de cerca de 0.5m atinge o seu valor mais elevado de cerca de 6.7. A partir dessa profundidade o valor de  $FC$  decresce mais moderadamente e estabiliza num valor da ordem de 5. Pela observação da figura pode-se tirar as seguintes conclusões:

- existe, tal como referido anteriormente, um mecanismo de efeito de arco no próprio aterro, pelo facto de à superfície o valor de  $FC$ , 3.6, ser já superior a metade do valor máximo atingido próximo dos 0.5m, que é de 6.7;
- existe um mecanismo de arco - transferência de tensões por corte na interface, do material menos rígido (solo) para o mais rígido (coluna) – numa zona até 0.5m da superfície. Este efeito é claramente detectado pelo facto de  $FC$  aumentar rapidamente nessa zona;
- a partir da profundidade de 0.5m, o efeito das tensões tangenciais na interface dilui-se, de tal modo que chega em algumas zonas a ser negativo, isto é, nessas zonas pelo facto de se concentrarem mais tensões verticais efectivas na coluna, esta deforma-se mais do que o próprio solo envolvente e passa a “apoiar-se” neste, diminuindo assim uma parte das tensões efectivas verticais e, conseqüentemente, o valor de  $FC$ .

Diversos autores estudaram a dependência de  $FC$  com a geometria do problema, nomeadamente com o coeficiente de substituição  $CS$ . Para comparação com o exemplo numérico estudado, segundo os autores abaixo referidos, no final da consolidação e na base do aterro, seriam de esperar os valores para o factor de concentração de tensões indicados no Quadro 2.

De acordo com o exposto anteriormente, a adopção do valor de  $FC$  final, na opinião dos autores, não deve ser o obtido à superfície mas sim uma média dos resultados obtidos ao longo da profundidade da coluna. Deste modo, para o caso em análise, o valor médio de  $FC$  é da ordem dos 5.0 e deverá ser este

o valor de comparação com o Quadro 2, uma vez que os autores aí referidos consideram um valor de  $FC$  médio e constante em profundidade.

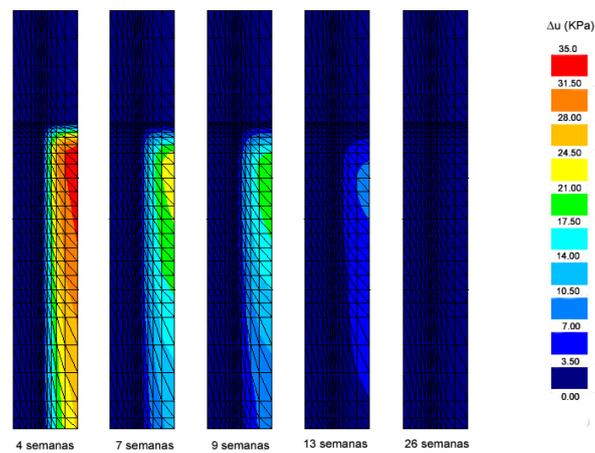


Figura 7 – Excesso de pressão neutra após a construção

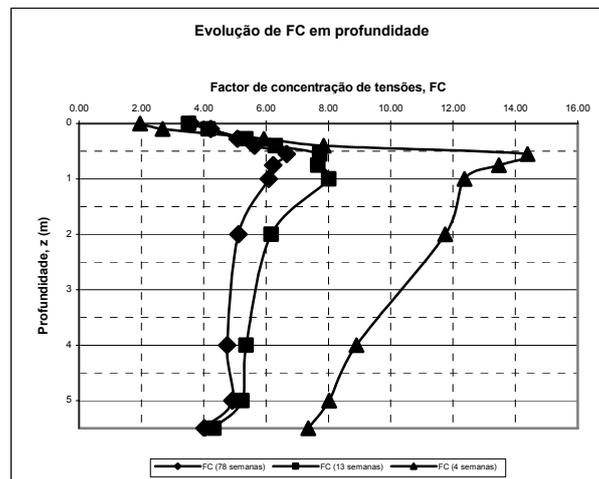


Figura 8 – Evolução do factor de concentração de tensões,  $FC$ , para os instantes de 4, 13 e 78 semanas.

Quadro 2 – Valores de Factores de Concentração de Tensões à superfície, segundo diversos autores, para a relação  $1/CS = 5.3$ , no final da consolidação.

Autor	Factor de Concentração de Tensões, $FC$
Balaam e Poulos (1983) [14]	6,2
Priebe (1976) [8]	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, traduz a relação entre o assentamento do solo reforçado com colunas de brita e o

assentamento do solo não reforçado para condições idênticas. Muitas vezes também é usado o inverso do  $FRA$ , o chamado factor de melhoramento.

De modo a avaliar o factor de redução de assentamentos, modelou-se o problema anteriormente descrito mas não considerando a presença das colunas de brita. Foi adoptado no solo compressível um valor de  $k_0$  igual a 0.5, correspondente ao estado de repouso inicial. Apresenta-se na Figura 9 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 cm 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 aproximadamente 1.53.

De modo a balizar os resultados obtidos, apresenta-se de seguida no Quadro 3 o assentamento previsto por diversos métodos simplificados de autores distintos. Chama-se atenção para o facto destas estimativas partirem todas de pressupostos diferentes, bem como alguns dos seus parâmetros terem que ser estimados indirectamente, pelo que a comparação destes métodos com o resultado numérico deve ser considerada como meramente indicativa [1]. 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 9, 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 12ª semana.

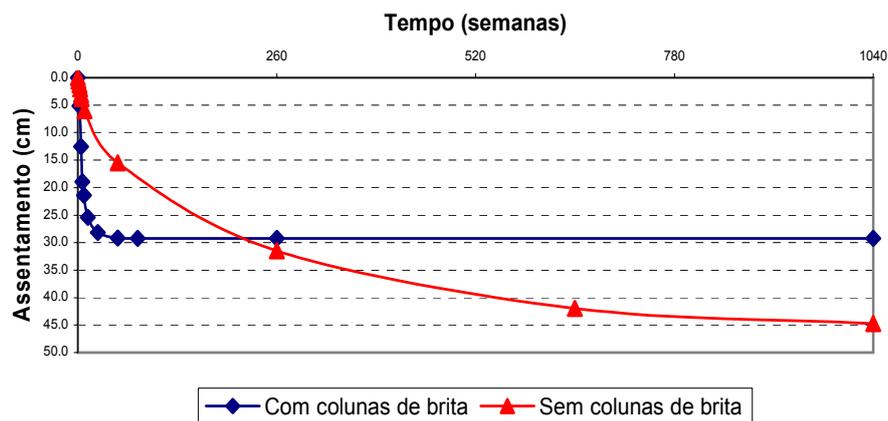


Figura 9 – Assentamentos médios na base do aterro ao longo do tempo

Quadro 3 – Comparação dos assentamentos na base do aterro obtidos numericamente com a previsão de cinco autores distintos, para o solo reforçado com colunas de brita.

	Modelo numérico	Mattes e Poulos [1]	Aboshi et al [1]	Balaam e Booker [14]	Priebe [8]
$FRA$ (%)	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

## 4. Conclusões

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

1. A inclusão de colunas de brita no solo argiloso mole provoca redução dos assentamentos, aumento da velocidade com que estes se processam e aumento de capacidade de carga. O conjunto coluna de brita/solo circundante é um sistema em que se processa efeito de arco quer no aterro quer no próprio solo circundante, provocando acréscimo de carga na coluna, o qual não só determina a redução dos assentamentos globais mas também minimiza os assentamentos diferenciais entre a coluna e o solo envolvente.
2. O efeito de fronteira drenante que a presença de colunas de brita provoca diminui enormemente o tempo necessário para que o assentamento final se realize.
3. Durante o período construtivo processam-se assentamentos significativos, o mesmo não se verificando no caso de o solo não ser reforçado.

## 5. Referências

- [1] -DOMINGUES TS. “Reforço de Fundações com Colunas de Brita em Aterros sobre Solos Moles. Análise e dimensionamento” –Dissertação de mestrado (a defender). FEUP. 2006
- [2] -BORGES JL. “Aterros sobre solos moles reforçados com geossintéticos. Análise e dimensionamento”. Dissertação de doutoramento. FEUP. 1995
- [3] -BRITTO AM, GUNN MJ. *Critical soil mechanics via finite element*. Ellis Horwood Ltd. 1987
- [4] -BORGES JL, CARDOSO AS. “Simulação numérica do modelo de estados críticos p-q- $\theta$  em aterros sobre solos moles”. R. Geotecnia 1998; 84:39-63
- [5] -BIOT MA. “Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid”. J Appl Phys 1955; 26:182-5
- [6] -BESANÇON et al. “Analyse des paramètres de calcul intervenant dans le dimensionnement des colonnes ballastées”. Renforcement en place des sols et des roches. Paris. 1984
- [7] -NAYAK NV “Recent innovations on ground improvement by stone columns”. Symposium on recent developments in ground improvement techniques. Bangkok. 1982
- [8] -PRIEBE HJ. “The design of vibro replacement”. Ground Engineering. Vol. 28, nº 10. 1995
- [9] -GOUGHNOUR RR, BAYUK AA. “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
- [10] -JAKY J. “The coefficient of earth pressure at rest”. J for Society of Hungarian Arq. Eng. Budapest, Hungary. 1944
- [11] -HUGHES JO et al. “Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns”. Ground Engineering. pp 42-49. 1974
- [12] -DAYTE KR “Settlement and bearing capacity of foundation system”. Symposium recent developments ground improvement tech. Bangkok. 1982
- [13] - ALAMGIR M et al “Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions”. Computers and Geotechnics-Vol.18 No 4 pp 267-290. 1996
- [14] - BALAAM NP, POULOS HG. “The behavior of foundations supported by clays stabilized by stone columns”. C.R. 8th european confrence on SMFE. Helsinki. Vol.1. pp. 199-204. 1983