



ANÁLISE NUMÉRICA DE ATERRO ESTAQUEADO COM PLATAFORMA DE GEOSINTÉTICO

Rayssa Espíndola Giffoni

Rômulo Murucci Oliveira

rayssa.giffoni@engenharia.ufjf.br

romulo.murucci@engenharia.ufjf.br

Flávia de Souza Bastos

flavia.bastos@gmail.com

Mario Vicente Riccio Filho

mvrf1000@gmail.com

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário, Bairro São Pedro, 36036-900, Juiz de Fora, MG, Brasil

Resumo. *Este artigo apresenta a análise numérica de um caso típico de aterro estaqueado com plataforma de geossintético. A técnica de aterro estaqueado é utilizada como fundação de aterros sobre solos moles de forma a evitar os recalques decorrentes do carregamento de solos moles. Estes tipos de solos resultam em problemas relacionados à recalques e capacidade de carga. Dessa forma a técnica permite que o carregamento seja transmitido pelas estacas a uma camada de solo resistente, evitando os problemas descritos. Neste trabalho são apresentados resultados de deslocamentos verticais do aterro na projeção das estacas e entre estacas. Como critério de projeto deve-se ter os recalques diferenciais no topo do aterro nulo. Também se apresenta a distribuição de tensões verticais gerada pelo carregamento do aterro sobre o conjunto estacas-geossintético.*

Palavras chave: *Aterro estaqueado, geossintético, análise numérica, recalques diferenciais, tensões verticais.*

1 INTRODUÇÃO

A técnica de aterro estruturado tem se mostrado uma alternativa viável e eficaz na estabilização de aterros sobre solos moles. Esta técnica mostra-se uma alternativa interessante dentre várias outras reportadas por Almeida e Marques (2013) como uso de aterros leves construídos com EPS (poliestireno expandido, “isopor”), aterro construído em etapas com bermas, reforço geossintético, drenos verticais e sobrecarga, aterro sobre colunas de brita, aterros sobre colunas encamisadas com geossintético, colunas tipo “Deep Soil Mixing” pré-carregamento por vácuo, dentre outras.

A técnica consiste em se transferir o carregamento do aterro para uma camada de solo mais resistente por meio de estacas de concreto. Na cabeça das estacas são utilizados capitéis para apoio do reforço geossintético que absorve as cargas verticais do aterro que atua entre os capitéis. Segundo Almeida e Marques (2010) o caso mais simples de aterro estruturado é aquele em que não se usa geogrelha e que o arqueamento do solo, conforme formulado por Terzaghi (1943) promove a transferência de carga do aterro diretamente para os capitéis e estacas. O arqueamento do solo está diretamente ligado à distância entre capitéis em malha quadrada ou triangular e é calculada em função da altura do aterro e suas propriedades e da sobrecarga (Ehrlich, 1993 e Kempfert et al., 2004). Adicionando o geossintético a técnica tem sua eficiência melhorada (van Eekelen, 2015), pois além do efeito de arqueamento do solo há o efeito membrana do geossintético que suporta cargas do aterro na porção abaixo do arco formado.

Uma das vantagens do aterro estruturado é que se pode construir o aterro logo em seguida à colocação da geogrelha sobre as estacas e capitéis. Desta forma não se necessita esperar tempo para que ocorra a estabilização de recalques que ocorrem no solo mole. Conforme relata Fagundes et al. (2015), outra vantagem da técnica é a redução do impacto ambiental se comparada à técnica tradicional com uso de drenos verticais, berma, reforço e sobrecarga. A sobrecarga utilizada para acelerar recalques e eliminar os efeitos do recalque secundário requer, na grande maioria dos casos, um volume muito grande de solo, necessitando assim de se explorar jazidas de material de forma a prover o volume necessário.

No Brasil são vários os exemplos de projetos e obras executadas com esta técnica conforme relatado por Fagundes et al. (2015). Como exemplo se pode citar a recente obra de ampliação do terminal de cargas do aeroporto Salgado Filho em Porto Alegre, em que as colunas onde são apoiadas as geogrelhas são do tipo “Deep Soil Mixing”. No exterior são enumerados vários casos de obras por van Eekelen (2015).

Existem várias propostas apresentadas para dimensionamento do reforço geossintético que forma uma membrana entre os capitéis e trabalha exclusivamente à tração. O dimensionamento do geossintético consiste em se determinar a força de tração atuante neste elemento. Algumas destas propostas são apresentadas por Jonh (1987), Hewlett e Randolph (1988), Jones et al., (1990), Low et al., (1994), norma Inglesa BS8006 (1995), Kempfert (1997), RogBeck (1998), Kempfert et al., (2004) e van Eekelen (2015).

2 ATERROS ESTAQUEADOS REFORÇADOS

Neste item são apresentados o conceito de aterro estruturado e os elementos que compõe a estrutura.

2.1 Conceito de aterro estruturado e elementos que o compõe

Aterros estaqueados formam uma estrutura composta por um aterro apoiado sobre estacas e capitéis, sendo que o vão entre capitéis é coberto com um reforço geossintético que absorve as cargas e as transfere aos capitéis e estacas. Os aterros estaqueados são utilizados para prevenir problemas de recalque e estabilidade de taludes gerados pela presença de solo mole ou muito mole como solo de fundação. Dessa forma as cargas são transferidas por meio das estacas a um solo resistente situado em camadas inferiores.

No solo do aterro ocorre um arqueamento devido à diferença de rigidez entre as estacas/capitéis e o solo circundante, as estacas são muito mais rígidas que o solo. Terzaghi (1943) equaciona o problema do aterro estaqueado da forma mais simples, que é a transferência de carga do aterro diretamente para os capitéis e estacas. Terzaghi (1943) equaciona o problema na condição de deformação plana (bidimensional) como forma de simplificar o comportamento real que é tridimensional. O uso de geossintético para a absorção de cargas entre as estacas e capitéis mostrou-se uma evolução da técnica, sendo este elemento inserido sobre os capitéis cobrindo assim o vão livre entre estes.

A Figura 1 ilustra o conceito de aterro estruturado com uso de geossintético, mostrando seus elementos. Na Figura 1 se observa uma camada de solo de 0,50m de espessura que é denominada de plataforma de trabalho que é normalmente empregada como parte do processo construtivo. Esta camada tem a função de possibilitar a entrada de equipamentos pesados necessários à execução da estrutura.

Como se pode observar na Figura 1 o reforço geossintético tem a função de sustentar o solo entre os capitéis além do efeito de arqueamento. A plataforma de trabalho proporciona uma reação no reforço geossintético que contribui para a redução do esforço de tração neste elemento. No entanto, em se tratando de solo mole ou muito mole como solo de fundação pode ocorrer recalque da plataforma de trabalho e então ocorrer um descolamento do reforço geossintético do solo que forma a plataforma de trabalho. Neste caso a plataforma de trabalho não mais contribui para absorção de carregamentos verticais não transmitidos para as estacas pelo efeito de arqueamento.

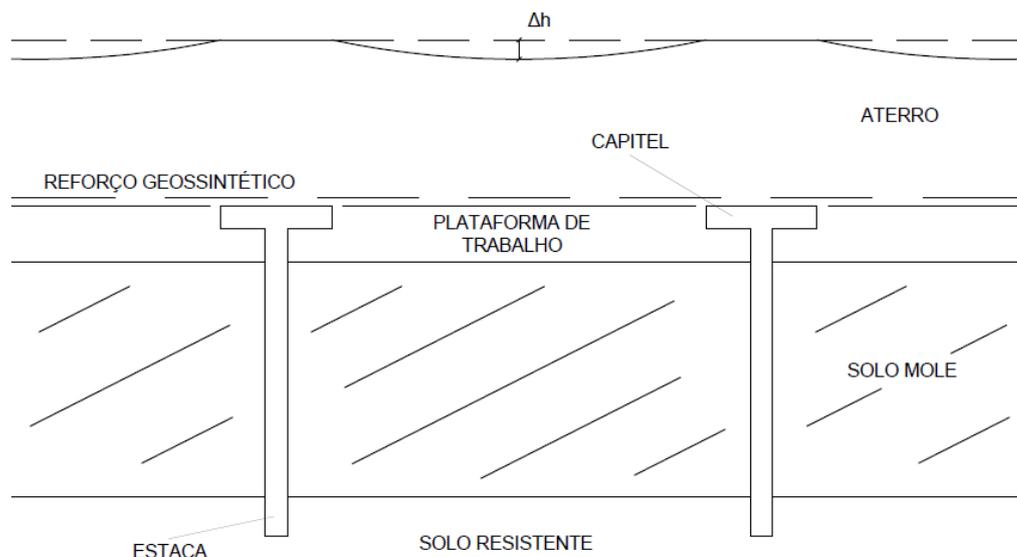


Figura 1 – Conceito de aterro estaqueado e seus elementos.

Por simplificação, a plataforma de trabalho não será considerada na modelagem apresentada neste estudo. Desta forma o reforço geossintético ficará apoiado diretamente sobre a argila mole.

2.2 Altura crítica de aterros estruturados

Na Figura 1 está representado o recalque diferencial Δh que pode ocorrer entre pontos situados entre os pontos A (diretamente acima do centro das estacas) e o ponto B (situado no centro entre estacas/capitéis). O correto dimensionamento do aterro estruturado visa produzir um valor de Δh igual a zero, ou seja, não se verificar recalques diferenciais no topo do aterro. A altura de aterro que conduz a um valor $\Delta h=0$ é denominada de altura crítica.

McGuire et al., (2012) define a altura crítica como sendo a altura de aterro acima da qual recalques diferenciais na base do aterro estruturado (nível superior das estacas) não produzem recalques diferenciais na superfície do aterro. São diversas as propostas para cálculo da altura crítica em função do espaçamento centro a centro das estacas (s) e a dimensão do lado do capitel (a), sendo algumas das quais apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de altura crítica propostas por alguns autores segundo McGuire et al., (2012).

British Standard, BS 8006 (1995)	$0.7 (s - a)$
Carlson (1987)	$1.0 (s - a)$
Nordic Handbook (2002)	$1.2 (s - a)$
Chen et al. (2008)	$1.6 (s - a)$
Demerdash (1996)	$1.7 (s - a)$
Hewlett e Randolph (1988)	$2.0 (s - a)$

onde: s é o espaçamento centro a centro entre estacas; a é a dimensão do lado do capitel.

McGuire et al. (2012) apresentam também uma proposta para cálculo da altura crítica para aterros estruturados com ou sem estacas. Na proposta de McGuire et al., (2012) é considerado o conceito de célula unitária, distância entre centros de estacas e dimensões dos capitéis. Segundo McGuire (2012) a altura crítica fica definida conforme a Eq. (1) a seguir.

$$H_{\text{crit}} = 1.15 s' + 1.44 d \quad (1)$$

onde:

$$s' = (s_1^2 + s_2^2)^{1/2} / 2 - d/2 \rightarrow \text{para uma malha quadrada de estacas}$$

$$s' = (2s_1^2 + s_2^2)^{1/2} / 3 - d/2 \rightarrow \text{para uma malha triangular de estacas}$$

sendo:

s_1 e s_2 os espaçamentos entre centros de estacas (Figura 2);

d = diâmetro de um capitel circular ou lado equivalente de um capitel quadrado com l (lado) = a ; $a = 0.886 d$.

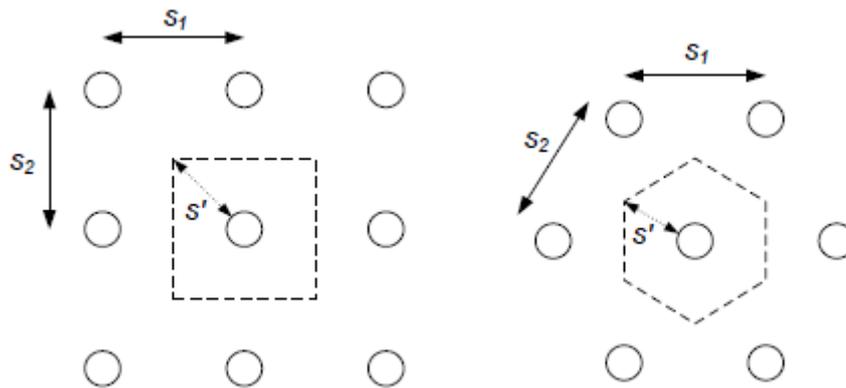


Figura 2. Valores de s_1 , s_2 e s' para malhas quadrada e triangular, segundo McGuire et al., (2012).

2.3 Distribuição de tensões verticais

O aterro gera tensões verticais sobre a plataforma de capitéis e reforço geossintético. A distribuição de tensões verticais é abordada de diferentes formas, conforme a metodologia empregada para cálculo de aterros estruturados. O formato da distribuição de tensões verticais influencia no cálculo da tração atuante no geossintético e carregamentos nos capitéis e estacas.

A Figura 3 ilustra diferentes abordagens quanto à distribuição de tensões verticais sobre a plataforma capitéis/reforço geossintético. Na distribuição proposta por Kempfert et al., (2004) a distribuição é triangular com valor máximo no centro, ou seja, no meio do vão entre os capitéis.

Já na distribuição proposta por van Eekelen (2015) a distribuição é representada por um triângulo invertido, com valor mínimo no centro do vão entre capitéis, de modo contrário ao proposto por Kempfert et al., (2004).

Segundo van Eekelen (2015) a distribuição de tensão vertical também pode ser constante (retângulo) e a distribuição real depende se a plataforma de trabalho está ou não em contato com o geossintético, ou seja, se há ou não reação da plataforma de trabalho.

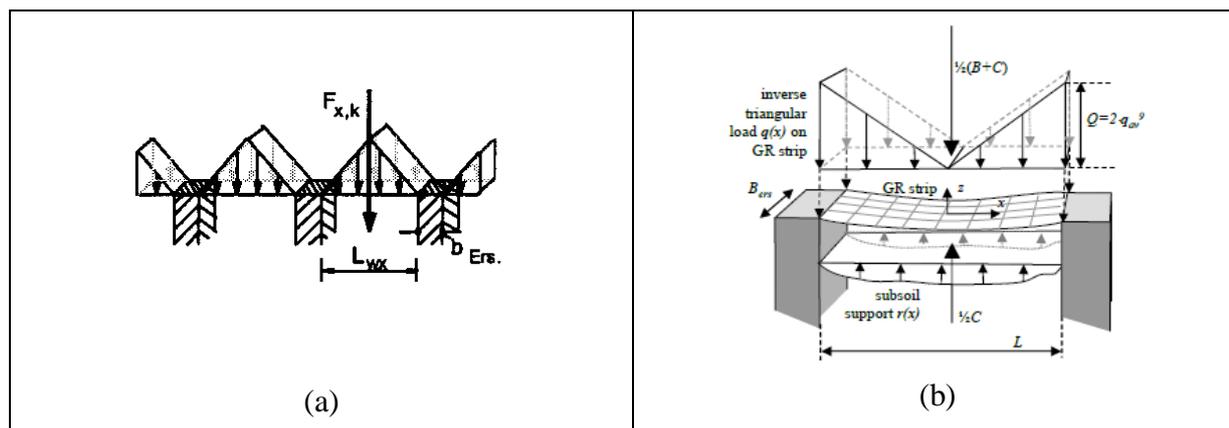


Figura 3. Distribuição de tensão vertical sobre a plataforma capitais/geossintético: a) Kempfert et al. (2004); b) van Eekelen (2015).

2.4 Modelo numérico

Para elaboração do modelo numérico foi utilizado o programa Abaqus v.6.13, sendo que o aterro estaqueado foi modelado na condição 3D. A Tabela 2 apresenta os modelos e os parâmetros dos materiais envolvidos na modelagem.

Tabela 2. Parâmetros e modelos adotados para os materiais.

Parâmetro/ Modelo	Aterro	Solo Mole (Argila)	Estacas (concreto)	Geossintético (reforço basal)
E (kPa)	$10 \cdot 10^3$	500	$21 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
ν	0.33	0.47	0.20	0.20
Peso Específico (kN/m ³)	18.5	14.0	25.0	2.0
Modelo	Elástico linear	Elástico linear	Elástico linear	Elástico linear

Já a Figura 4 ilustra a geometria adotada para o estudo efetuado. Por simplificação considerou-se a geometria da estaca como sendo igual à geometria do capitais, o que pode acontecer em casos reais, por exemplo, quando o reforço geossintético é apoiado diretamente sobre as estacas.

O uso de capitéis acoplados nas estacas, no entanto, mostra-se de uso mais corrente do que o uso apenas das estacas como elementos de suporte. Também considerou-se de forma simplificada o solo como possuindo um comportamento elástico linear.

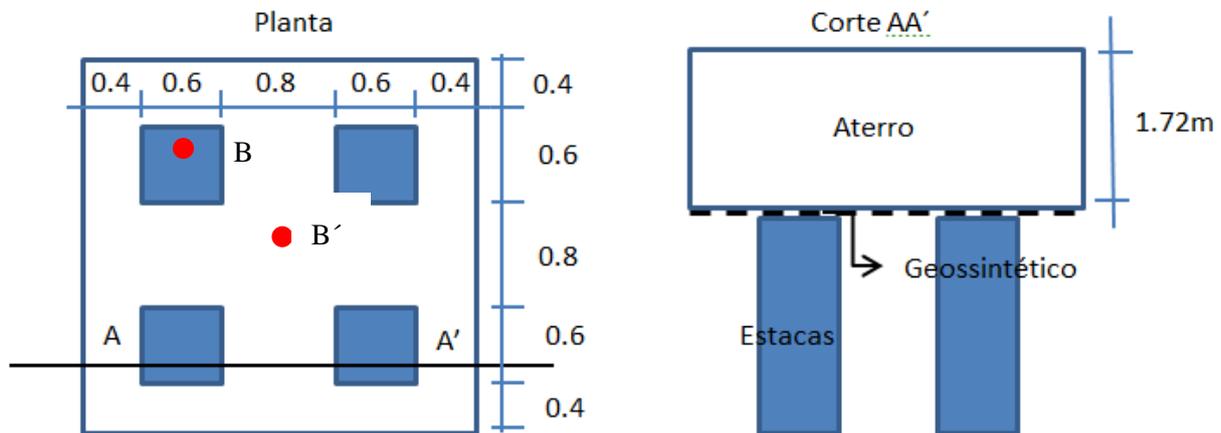


Figura 4. Geometria adotada para o modelo estudado.

A partir da Fig. 4 pode-se observar que a altura de aterro é igual a 1,72m. Essa altura corresponde à altura crítica calculada com base na Eq. (1) proposta por McGuire (2012) e geometria indicada na Fig. 4. As estacas possuem seção quadrada com lado igual a 0,60m e o vão entre lados das estacas 0,80m. Entre as estacas encontra a argila mole da base à face inferior do geossintético.

As condições de contorno impostas ao aterro e argila mole foram o impedimento dos deslocamentos horizontais. Já as estacas foram engastadas em sua base.

3 RESULTADOS

Neste item se apresentam os resultados em termos de tensões principais verticais atuantes no aterro e nas estacas e também recalques diferenciais entre pontos situados sobre a estaca e entre as estacas, pontos B e B' na Fig. 4, respectivamente.

3.1 Tensões verticais

A Fig. 5 a seguir ilustra a evolução do acréscimo de tensões verticais em planos paralelos ao topo da estaca, mostrando o modelo em planta. Estes planos situam-se a aproximadamente 0,0m do topo da estaca (logo acima do geossintético), 0,30m, 0,60m, 0,90m, 1,20m e 1,50m acima do topo da estaca.

A partir da Fig.5 é possível observar que ocorrem acréscimos de tensões verticais de forma mais proeminente nas proximidades do topo das estacas, conforme esperado. Estes acréscimos de tensões verticais mostram-se bem superiores aos valores das tensões verticais geostáticas geradas pelo aterro. Estes acréscimos de tensões verticais são provocados pela maior rigidez das estacas em relação ao solo de aterro. A medida que se afasta do topo das estacas o acréscimo vai diminuindo até ser nulo próximo ao topo do aterro. A 1,20m de altura o acréscimo possui baixa magnitude. Pode-se observar que os acréscimos se posicionam verticalmente sobre e nas imediações das estacas, e entre as estacas (ponto médio) este acréscimo não se verifica.

Este comportamento está de acordo com a abordagem proposta por van Eekelen (2015), conforme apresenta a Fig. 3b, sendo que a abordagem proposta por Kempfert et al. (2004), Fig.3a, não se verifica. Observa-se que neste estudo a argila mole sofreu recalque devido ao seu baixo módulo de elasticidade e descolou do geossintético.

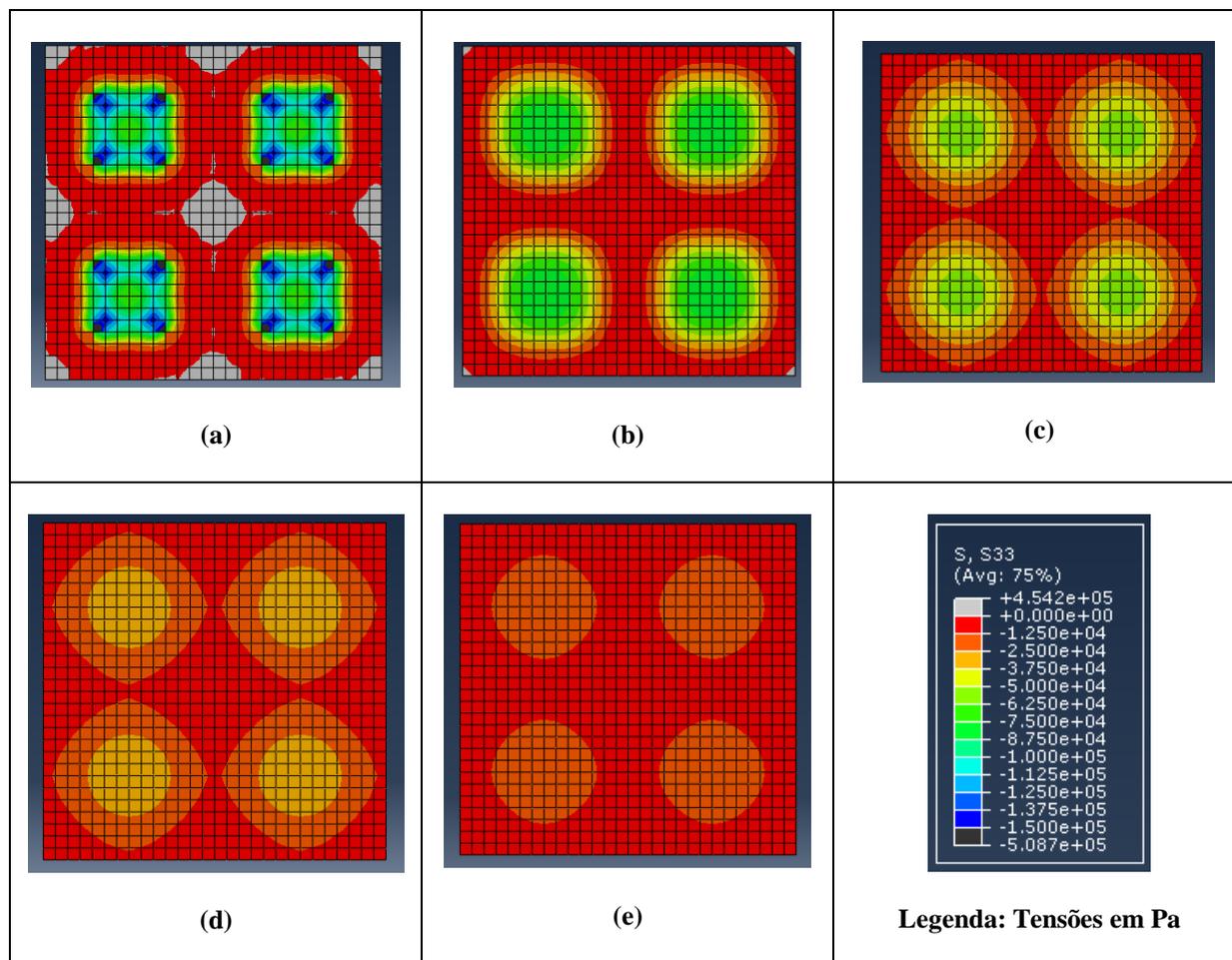


Figura 5. Evolução do acréscimo de tensões verticais com a altura do aterro: a) imediatamente acima do geossintético, b) 0.30m de altura, c) 0.60m de altura, d) 0.90m de altura, e) 1.20m de altura.

A Fig. 6 ilustra o acréscimo de tensões verticais em um corte que passa pela seção transversal AA' indicada na Fig. 4 e entre estacas com a seção transversal passando pelo ponto B (Fig. 4) e paralela à seção AA'.

Define-se o fator de concentração de tensões como $FCT = (\Delta\sigma_v, c / \Delta\sigma_v, s)$. Com base na Fig. 5 e Fig. 6 verifica-se que a relação entre a tensão no solo nas proximidades da estaca ($\Delta\sigma_v, c$) e a tensão no solo entre as estacas ($\Delta\sigma_v, s$) é da ordem de 9 e decorre da alta rigidez das estacas. Este valor é maior que o encontrado em aterros sobre colunas semi-rigidaz, como no caso de aterros sobre colunas de brita e aterros sobre colunas granulares encamisadas com geossintético, por exemplo.

Na Fig.6 se observa que os acréscimos de tensão vertical na região das estacas possuem um formato que se aproxima de um semi-círculo e se propaga em direção á superfície, sendo que próximo ao topo não há influência das estacas na tensão vertical.

Com base nas Figuras 6 e 7 se observa que os cantos das estacas estão submetidos a tensões verticais maiores que na parte central. Este comportamento pode estar associado ao fato do geossintético estar solicitando a borda das estacas de forma mais proeminente. Assim, espera-se que as maiores solicitações no geossintético ocorram nas diagonais das estacas.

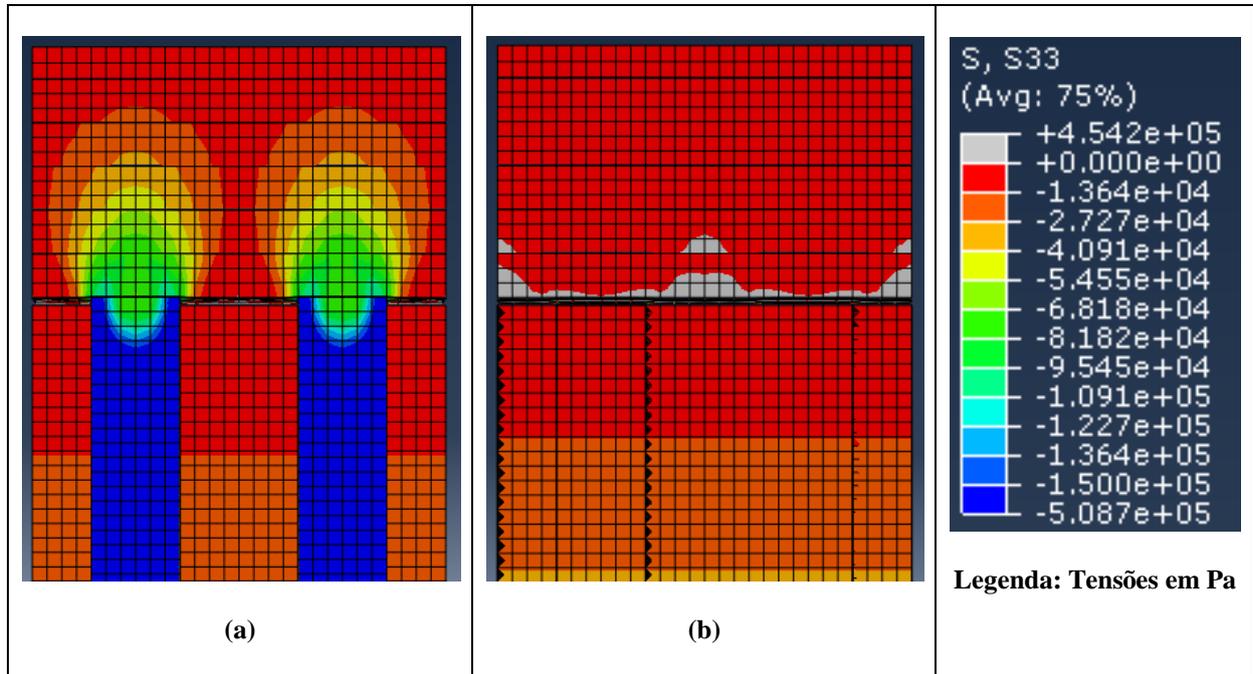


Figura 6. Tensões verticais: a) acréscimo de tensões no topo da estaca e aterro, b) tensões verticais entre estacas.

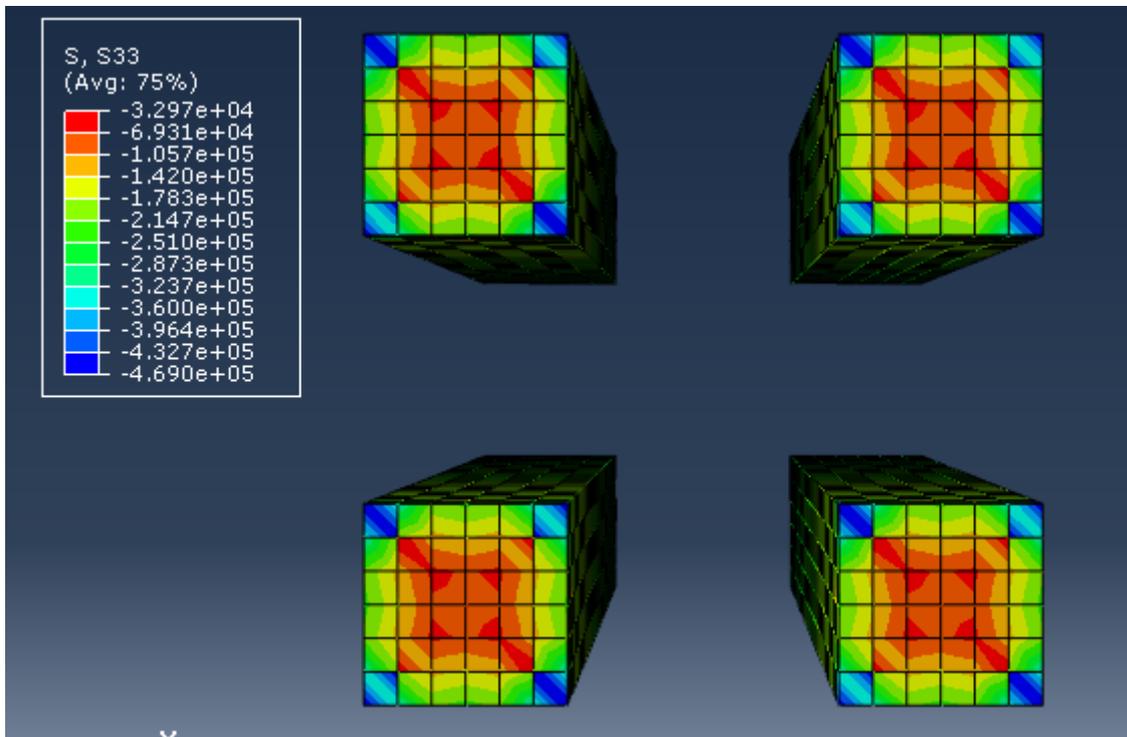


Figura 7. Tensões verticais atuantes nas estacas.

3.2 Deslocamentos verticais diferenciais

A Fig.8 ilustra os deslocamentos verticais diferenciais (ou recalques diferenciais) ocorridos entre os pontos B e B' indicados na Fig. 4. Como se pode observar, a medida que se aumenta a altura do aterro há uma tendência dos recalques diferenciais diminuírem.

A altura do aterro é de 1.72m e esta foi calculada com base na proposta de McGuire (2012), Eq. (1), em função da geometria adotada para o aterro estruturado. Para a altura de 1.72m (topo do aterro) os recalques diferenciais devem ser nulos segundo a referida proposta.

Como se pode observar os resultados obtidos pelo modelo numérico mostraram que para 1.72m de altura do aterro os deslocamentos verticais diferenciais são praticamente nulos.

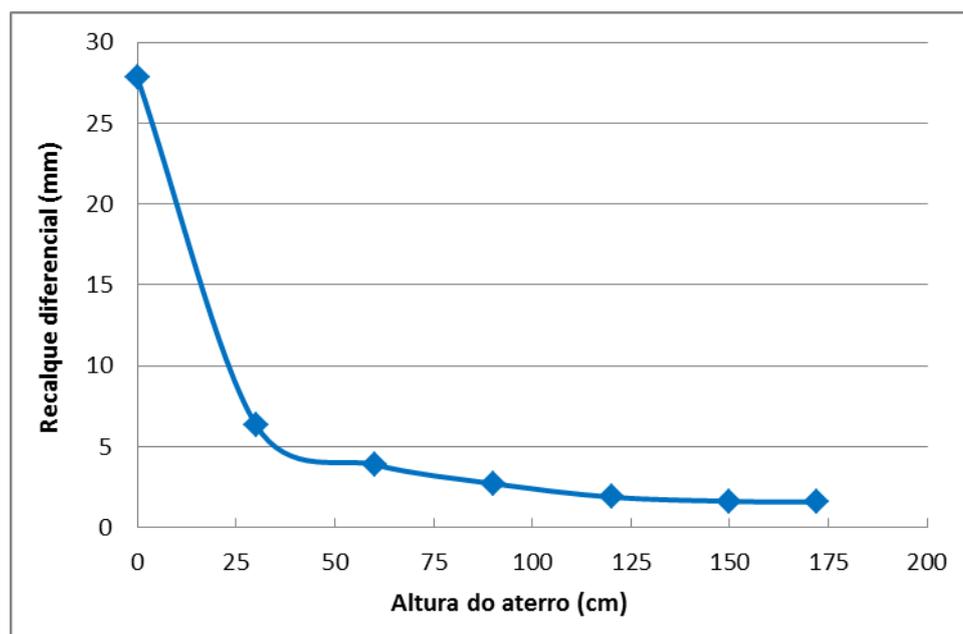


Figura 8. Recalques diferenciais entre pontos situados sobre a estaca e entre as quatro estacas, pontos B e B', respectivamente (Fig. 4), com relação à altura do aterro.

4 CONCLUSÕES

Foi efetuada análise numérica de um modelo de aterro estruturado com plataforma de geossintético. As tensões verticais e os deslocamentos verticais foram avaliados de forma a se verificar comportamentos previstos analiticamente.

Há uma concentração de tensões verticais na região da estaca, sendo que entre as estacas as tensões decrescem e seguem o padrão proposto por van Eekelen (2015).

Para o modelo analisado, com estacas rígidas, o fator de concentração de tensões estaca/solo foi de cerca de 9, acima de valores encontrados para estacas semi-rígidas como colunas de brita e colunas granulares encamisadas com geossintético.

Nas bordas das estacas se verifica uma concentração de tensões maior que no centro da estaca.

A proposta de McGuire (2012) para altura crítica de aterros estruturados foi verificada, sendo observado que os recalques diferenciais são praticamente nulos no topo do aterro, cuja altura foi calculada com base na proposta citada.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à instituição de fomento FAPEMIG pelo apoio a esta pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

Almeida, M.S.S, Marques, M. E.S., 2013, *Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils*, Taylor & Francis editors.

British Standard, BS 8006, 1995, *Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills*, B.Si

Ehrlich, M., 1993, *Método de Dimensionamento de Lastros de Brita sobre Estacas com Capitéis*, Solos e Rochas, ABMS/ABGE, 16, (4), Dezembro, 229 – 234.

Fagundes, D. F., Almeida, M.S.S., Thorel, L., 2015, Influência do reforço de geossintético e configuração geométrica no comportamento de aterros estruturados através de modelagem física em centrífuga, *VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos*, 19 a 21 de julho, Brasília, DF.

Hewlett, W.J. & Randolph, M. F., 1988, *Analysis of Piled Embankment*, Ground Engineering, Vol. 21, n. 3, 12 – 18.

Jones, C. J. P. F., Lawson, C. R. & Ayres, D.J., 1990, Geotextiles Reinforced Piled Embankment, *4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Den Haag, Vol. 1, 155 – 160.

Jonh, N. W.M., 1987, *Geotextiles*, Blackie, Glasgow.

Kempfert, H-G., Stadel, M. & Zaeske, D., 1997, *Design of Geosynthetic-Reinforced Bearing Layers Over Piles*, Bautechnik, 74, Vol.12, 818 – 825.

Kempfert, H-G., Göbel, C., Alexiew, D. & Heitz, C., 2004, German Recommendations for reinforced Embankments on Pile-Similar Elements, *Proceedings of Third European Geosynthetics Conference*, Munich, March, 279–284.

Low, B. K., Tang, S. K. & Choa, V., 1994, Arching in Piled Embankment, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, n.11, November, 1917 – 1938.

MCGuire, M., Sloan, J., Collin, J., Filz, G., 2012, Critical Height of Column-Supported embankments from Bench-Scale and Field-Scale Tests, *ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels*.

Rogbeck, Y., Gustavsson, S., Södergren, I. & Lindquist, D., 1998, Reinforced Piled Embankment in Sweden – Design Aspects, *6th International Conference on Geosynthetics*, IGS, Atlanta, Georgia USA, Vol. 2, 755 – 762.

Terzaghi, K., 1943, *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, NY, USA.

van Eekelen, S.J.M., Beijuijen, A., van Tol, A.F., 2015, *Validation of analytical models of basal reinforced piled embankments*, Geotextiles and Geomembranes, vol 43, 56-81.