

ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE ATERROS SUPOSTADOS POR INCLUSÕES RÍGIDAS EM SOLOS MOLES

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS OF EMBANKMENTS SUPPORTED BY RIGID INCLUSIONS IN SOFT SOILS

Bellini Machado, Lucas, *USP, São Paulo, Brasil, lucasbmachado@usp.br* *

Carreto, Joana, *LNEC, Lisboa, Portugal, jcarreto@lnec.pt*

**autor para correspondência*

RESUMO

A elevada compressibilidade dos solos moles e a necessidade, progressivamente crescente, de construção em áreas onde estas formações ocorrem, colocam grandes desafios à engenharia geotécnica, a qual tem vindo a procurar soluções cada vez mais eficientes, quer do ponto de vista técnico quer económico. Uma destas soluções associa uma plataforma de transferência de cargas (LTP) a inclusões rígidas, que atravessam a totalidade das camadas de solo compressíveis. O principal objetivo deste tipo de intervenção consiste na minimização da carga sobre os solos moles, transferindo-a para os elementos rígidos através da LTP, reduzindo, consequentemente, o assentamento e o atrito negativo. As vantagens desta aplicação, em comparação com as metodologias habituais, são uma construção mais célere e um possível controlo mais rigoroso dos resultados. Neste estudo procurou-se entender a dinâmica de transferência de cargas entre um aterro e as inclusões rígidas materializadas pela técnica de *jet grouting*, recorrendo à modelação numérica e tridimensional, através do programa PLAXIS 3D, calibrada pelos resultados de um aterro experimental. Para o efeito, analisou-se a influência de alguns dos parâmetros intervenientes no dimensionamento da solução, designadamente, a distância entre inclusões e as características da plataforma de transferência de carga (elementos constituintes e características geométricas), para além da influência de capitéis no topo das colunas. O estudo termina com uma avaliação da eficiência de cada um dos componentes da solução de fundação de aterros em solos moles, recorrendo a inclusões rígidas associadas a plataforma de transferência de carga, no cenário geológico-geotécnico analisado.

ABSTRACT

The high compressibility of soft soils and the progressively increasing necessity for construction in areas where these formations occur represents great challenges for geotechnical engineering, which has been looking for increasingly efficient solutions, both technically and economically. One of these solutions is the association between a load transfer platform (LTP) and rigid inclusions crossing the entire compressible soil layers. The main objective of this method is to minimize the load on soft soils, by transferring it to the rigid elements through the LTP, consequently reducing their settlement and negative friction. The advantages of this application, compared to the usual methodologies, are a less time consumption (in the construction phase) and possibly a more rigorous control of the results. This study was conducted to understand the dynamics of load transfer between the embankment and rigid inclusions materialized by the jet grouting technique, using three-dimensional numerical modeling

with the PLAXIS 3D software, calibrated through the results of an experimental embankment. For this purpose, the influence of different intervening parameters in the solution design was analyzed, namely, the distance between inclusions and the characteristics of the load transfer platform (constituent materials and geometric characteristics), but also, the existence of chapters at the top of the columns. The study concludes with an efficiency assessment of soft soil foundation solutions using rigid inclusions associated with a load transfer platform.

1. INTRODUÇÃO

Solos de elevada compressibilidade, ou solos moles, sofrem elevados assentamentos quando carregados e durante um período de tempo que poderá não ser compatível com as exigências do projeto, tornando o dimensionamento de fundações de grandes estruturas, neste tipo de terreno, complexo.

Contudo, os avanços da urbanização para regiões antes não ocupadas por falta de competência geotécnica do terreno de fundação, exigiram a conceção de diferentes soluções construtivas para minimizar os assentamentos e/ou acelerar a sua ocorrência. Uma destas soluções consiste na inserção de elementos rígidos no solo, com o objetivo de transmitir as cargas para as camadas mais competentes, ocorrentes a maior profundidade, aliviando as tensões transmitidas diretamente às camadas com características compressíveis.

Para a situação particular da fundação de aterros, objeto deste documento, às inclusões rígidas associa-se uma plataforma formada por geogrelhas e por preenchimento granular, que tem como função transmitir as cargas do aterro sobrejacente para os elementos, mais rígidos, inseridos na fundação.

Contudo, neste tipo de soluções em que o contraste de deformabilidade entre o elemento rígido e o solo adjacente é elevado, os assentamentos diferenciais resultam num aumento da sobrecarga sobre os primeiros, devido ao atrito negativo, podendo também causar o punçoamento do aterro sobrejacente.

Nas secções seguintes descreve-se a solução estudada, destacando, em particular, o mecanismo de transferência de cargas subjacente ao seu funcionamento, seguindo-se a descrição do modelo numérico de cálculo e dos cenários analisados. O estudo termina com a apresentação dos resultados e a sua análise crítica, identificando-se os parâmetros com maior influência sobre o comportamento da obra (excluindo o cenário geológico-geotécnico que se assumiu como uma das constantes do problema em análise).

2. DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO DE FUNDAÇÃO DE ATERROS EM SOLOS MOLES POR ELEMENTOS RÍGIDOS

A inserção de elementos rígidos, na fundação de aterros em solos moles, promove uma redução dos assentamentos que ocorreriam por consolidação do terreno subjacente, através da transferência de parte da carga do aterro para os elementos mais rígidos aí inseridos que, por sua vez, a transmite para as camadas de terreno mais competentes, ocorrentes a maior profundidade.

Ao contrário doutro tipo de soluções, designadamente das que recorrem a inclusões de maior deformabilidade, como as colunas de brita, esta solução, por não ser drenante, não reduz o tempo de consolidação dos solos compressíveis, isto é, não reduz o tempo necessário à dissipação das pressões intersticiais geradas pela sobrecarga. Neste contexto, o dimensionamento deste tipo de soluções é condicionado exclusivamente pelo assentamento máximo permitido, cujo valor deve ser definido com base nos requisitos de segurança e de aptidão para a utilização do aterro sobrejacente.

Portanto, a eficiência das soluções que recorrem a elementos rígidos depende do seu espaçamento. Quanto menor é, maior é a carga que lhe é transmitida diretamente, mas também maior é a transmissão da carga pelo efeito de arco, reduzindo os assentamentos. De acordo com as recomendações da FHWA (2017), este afastamento (ao eixo) não deverá ultrapassar cerca de 3 m.

As inserções rígidas podem ser efetuadas com diferentes métodos e materiais, sendo de destacar as estacas de betão armado, as colunas formadas por *jet grouting*, e as colunas formadas pela técnica de *deep soil mixing*. No caso em análise, os elementos rígidos foram formados pela técnica de *jet grouting*, que utiliza jatos de água em alta velocidade para a desagregação do terreno e sua mistura parcial com calda de cimento, à medida que a haste do equipamento é removida do interior do furo. Aplicando um movimento rotativo, durante a remoção da haste, criam-se elementos rígidos cilíndricos constituídos por uma mistura de solo e calda cimentícia e, por conseguinte, aumenta-se a resistência mecânica do terreno e diminui-se a sua permeabilidade.

A introdução de uma plataforma de transferência de cargas (LTP), na solução em análise, permite aumentar a distância entre elementos rígidos, sem aumentar os assentamentos sofridos pelo terreno entre colunas. Geralmente, estas plataformas são constituídas por uma ou mais camadas de solo granular, bem graduado, sem finos, e por geogrelhas biaxiais. A LTP interpõe-se entre as colunas e o aterro, assim também sendo conhecida como camada de ligação.

Portanto, a transferência de cargas do aterro para as colunas ocorre de forma direta, através do efeito de arco no material do aterro e, indiretamente, pelo efeito de membrana das geogrelhas (Villard, 2009). O efeito de membrana (Figura 1) consiste na deformação sofrida pelo elemento de reforço a fim de proporcionar um suporte das forças normais ao seu plano, transmitindo-as para as colunas nas quais se apoia.

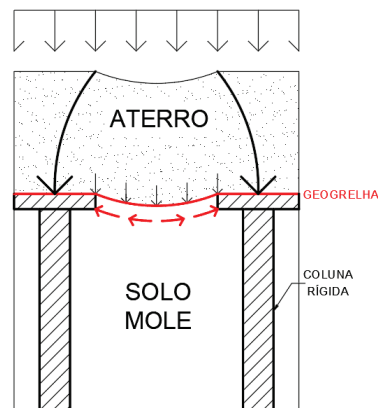


Figura 1 - Efeito de membrana

Para o dimensionamento da LTP são, usualmente, utilizados modelos simplificados de transferência de cargas, como os designados por “beam method” e por “catenary method” (FHWA, 2017).

Outros elementos frequentemente integrados nesta solução são os capitéis. A sua função consiste na minimização dos problemas de punçoamento e no aumento da percentagem de carga transmitida a cada coluna.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.1. Introdução

O recurso a métodos numéricos, designadamente ao método dos elementos finitos, possibilita a simulação da interação solo-estrutura, de forma mais aproximada da realidade. A utilização de modelos tridimensionais tem ainda a vantagem de incluir o efeito de grupo no dimensionamento da solução.

O programa de cálculo automático, PLAXIS 3D, integra estas funcionalidades, a que acresce a possibilidade de se recorrer a diferentes modelos constitutivos para simular o comportamento de cada um dos elementos da obra, alguns dos quais incluindo o fator tempo, como é o caso dos solos moles.

Nas secções seguintes descrevem-se os principais aspetos do modelo utilizado e identificam-se os diferentes cenários analisados.

3.2. Cenário geológico-geotécnico

O perfil geotécnico (Figura 2) adotado teve por base os resultados dos trabalhos de prospeção geológico-geotécnica realizados num local onde ocorrem solos de elevada compressibilidade.

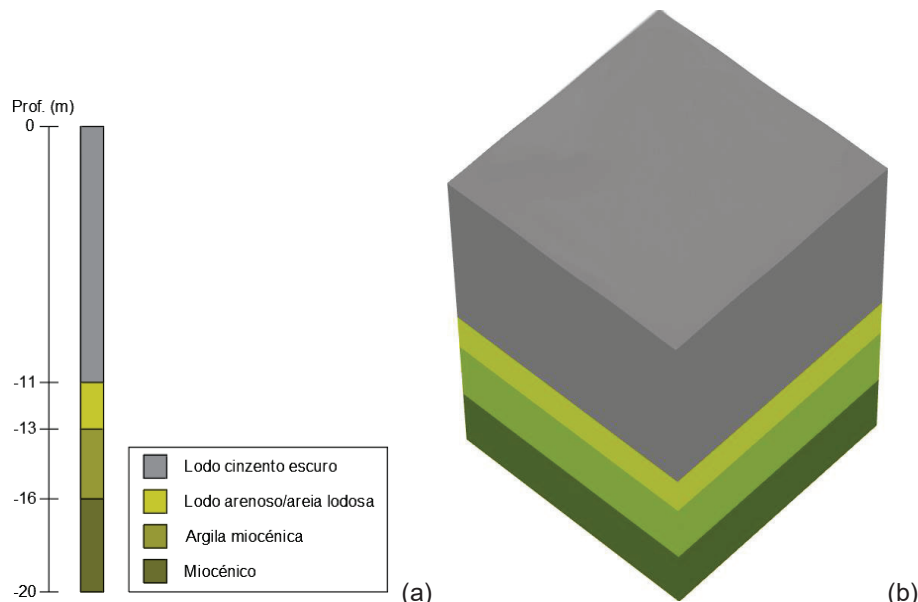


Figura 2 - Perfil Geotécnico da Modelação: (a) Perfil de Sondagem; (b) Modelo 3D

O cenário em causa integra uma camada espessa lodosa, que se torna mais arenosa na base, aumentando, conseqüentemente, a sua resistência e permeabilidade e reduzindo a deformabilidade. Esta camada de lodo arenoso sobrepõe-se às formações da idade miocénica, constituídas, neste local, por argila siltosa, até aos 16 m de profundidade, caracterizadas por resultados dos ensaios *SPT* iguais ou inferiores a 15 pancadas, e por areia e siltes arenosos, a partir daí, com maior resistência e deformabilidade inferior.

3.3. Geometria do modelo

A geometria genérica do modelo numérico analisado é representada na Figura 3. Para simular o efeito de grupo, o modelo incluiu 4 colunas de *jet grouting*, situando-se as respetivas fronteiras nos eixos de simetria expectáveis, isto é a metade da distância das colunas adjacentes, exteriores às modeladas, coincidindo, portanto, com o alinhamento de maior assentamento do terreno. Sendo a distribuição das colunas, em quincôncio, o modelo tem uma geometria quadrada, em planta, com área dependente da distância entre eixos dos elementos rígidos.

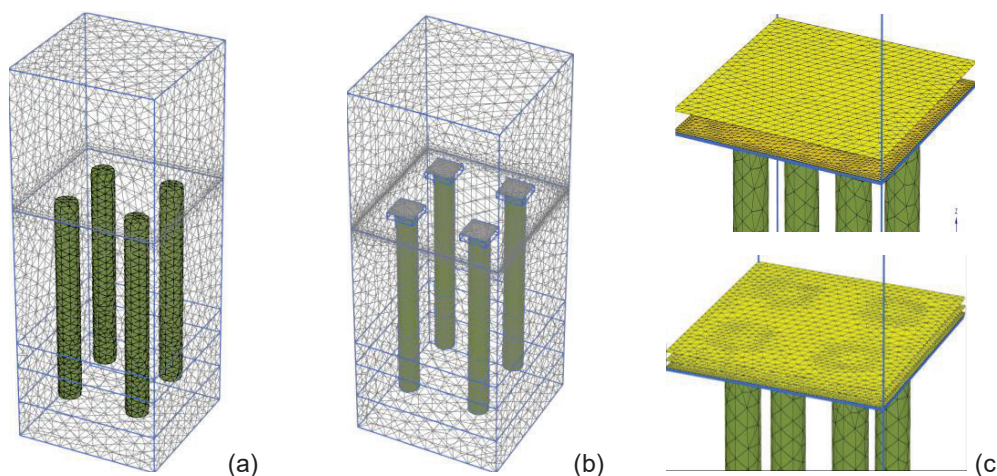


Figura 3 - Geometria dos Modelos: (a) Sem Capitéis; (b) Com Capitéis; (c) Pormenor da LTP1 e da LTP2

As colunas de *jet grouting* têm 1,5 m de diâmetro e atravessam a totalidade do solo lodoso e a camada mais descomprimida da formação miocénica, com um comprimento total de 16 m. Entre eixos, adotaram-se os seguintes afastamentos das colunas: 3 m, 4 m e 5,7 m. Sobre a camada de solos lodosos, construiu-se um aterro de material granular com 11 m de altura.

Relativamente à LTP, foram analisadas diferentes configurações, conforme consta do Quadro 1.

Quadro 1 - Identificação das Configurações da LTP

Configuração da LTP	Posição	Cota (m)	Resistência última à tração (kN/m)
LTP 1	Superior	+0,50	40
	Intermédia	+0,25	40
	Inferior	+0,05	40
LTP 2	Superior	+0,60	40
	Inferior	+0,05	20

Foi ainda analisado o uso de capitéis, de betão armado, no topo das colunas, com secção quadrada (2 x 2 m²), com 0,5 m de altura.

Por último, e para permitir analisar a influência de cada um dos parâmetros sobre o comportamento da obra, foi desenvolvido um modelo sem qualquer elemento de reforço, considerando apenas a construção do aterro, diretamente sobre os solos lodosos.

3.4. Características de Resistência, Deformabilidade e Permeabilidade dos Elementos do Modelo

Os modelos constitutivos adotados para o terreno e os respetivos parâmetros (ver Quadro 2 e Quadro 3) foram selecionados com base nos resultados da prospeção geológico-geotécnica, designadamente, com base nos resultados dos ensaios “*in situ*” (SPT’s, CPTU’s e molinetes) e dos ensaios de laboratório (de identificação e edométricos) e validados através da retroanálise de um aterro experimental construído no local para este efeito. Em particular, é de referir que a adoção do modelo “*Soft Soil*” para os solos lodosos permitiu integrar o efeito da história de tensões no seu comportamento. No Quadro 4 e no Quadro 5 identificam-se os modelos constitutivos e os parâmetros adotados para as colunas de *jet grouting*, capitéis e geogrelhas.

Quadro 2 - Características do Aterro e das Formações Miocénicas
(Modelo Constitutivo Adotado: *Elasto-plástico*)

Designação	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	c' (kPa)	ϕ' (°)
Aterro tout-venant	21	40	0,25	0	38
Miocénico - argila siltosa	21	25	0,2	40	25
Miocénico -argila silto-arenosa	22	50	0,2	50	40

γ – peso volúmico do solo; E – módulo de deformabilidade; ν – coeficiente de Poisson;
c' – coesão em tensões efetivas; ϕ' – ângulo de atrito em tensões efetivas

Quadro 3 - Características do Lodo Argiloso e do Lodo Arenoso
(Modelo Constitutivo Adotado: *Soft Soil*)

Designação	γ (kN/m ³)	e_0	λ^*	κ^*	ϕ' (°)	k (m/dia)
Lodo cinzento escuro (Nspt < 1)	15	1,93	0,075	0,037	22	4,75 x 10 ⁻³
Lodo arenoso/areia lodosa	16	1,70	0,064	0,032	24	0,248

e_0 – índice de vazios inicial; λ^* – índice de compressibilidade modificado; κ^* – índice de expansibilidade modificado; k – coeficiente de permeabilidade

Quadro 4 - Características das Colunas de *Jet grouting* e dos Capitéis
(Modelo Constitutivo Adotado: *Elastico-linear e Não-Poroso*)

Designação	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν
Colunas de <i>jet grouting</i>	22	500	0,2
Capitéis	24	30000	0,2

Quadro 5 - Características das Geogrelhas
(Modelo Constitutivo Adotado: *Geogrid – Elasto-Plástico, Isotrópico*)

Designação	EA (kN/m)	GA (kN/m)	T _u (kN/m)
Geogrelha 1	400	200	40
Geogrelha 2	200	100	20

EA – rigidez axial para uma extensão de 10 %; G – módulo de distorção; A – área de corte;
T_u – carga limite de tração

As características mecânicas das geogrelhas foram definidas com base em modelos comerciais. Simplificadamente, assumiu-se um modelo elasto-plástico, com cedência para uma extensão axial de 10 %.

Entre as colunas e o terreno, quer no topo, quer lateralmente, foi interposta uma interface, de 0,0125 m de espessura, e resistência dependente do terreno adjacente. Assinala-se que o modelo de maior afastamento entre colunas foi processado sem interfaces no topo e na base das colunas, pela não convergência dos resultados num tempo razoável.

3.5. Malha de Elementos Finitos

A distribuição de elementos na malha de elementos finitos adotada foi a que, por padrão do programa, é nomeada de “*fine*” e utilizada a função de melhoramento de refinamento de malha para todos os modelos.

A função “*updated mesh*” foi acionada de forma a considerar os efeitos de segunda ordem, com grande relevância nestas situações em que os assentamentos ocorridos são de elevada magnitude.

3.6. Faseamento Construtivo

Sendo um dos objetivos da modelação a análise comparativa dos assentamentos máximos de cada cenário, previu-se um período de consolidação de 130 dias, suficiente para a quase total dissipação das pressões intersticiais geradas pelo carregamento, em qualquer das situações analisadas.

4. RESULTADOS DA MODELAÇÃO NUMÉRICA

4.1. Assentamentos

Na Figura 4 apresenta-se, a título exemplificativo, a configuração dos assentamentos ocorridos quando se introduzem colunas rígidas, capitéis e uma LTP na fundação do aterro.

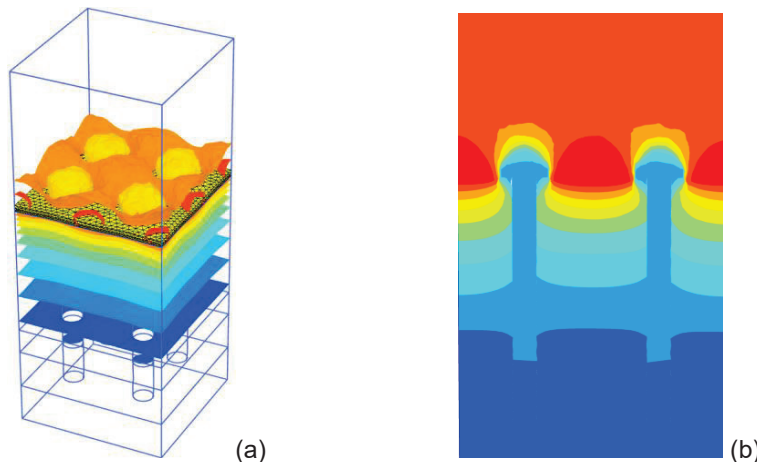


Figura 4 - Isolinhas de Assentamentos: (a) no Modelo 3D; (b) numa Secção Passando Pelo Eixo das Colunas

Conforme se constata pela observação da figura, os assentamentos máximos ocorrem na base do aterro, entre colunas de *jet grouting*, sendo bastante superiores aos assentamentos sofridos pelos elementos rígidos, tal como expectável.

O máximo assentamento que sofreria a fundação do aterro sem as inclusões rígidas nem a LTP, de acordo com a modelação efetuada, atinge 2,14 m.

No Quadro 6 faz-se o resumo dos assentamentos máximos da camada de solo lodoso para cada cenário analisado. Conforme se constata pela análise deste quadro, o menor assentamento, de 0,17 m, resulta da configuração mais onerosa, isto é, daquela em que o espaçamento entre colunas é menor, que recorre ao uso de capitéis e cuja LTP integra 3 geogrelhas. De acordo com o referido quadro, a redução dos assentamentos é causada, principalmente, pela aproximação das colunas. A LTP vai perdendo influência à medida que o afastamento entre colunas aumenta, sendo praticamente ineficaz para a situação em que aquele afastamento é de 5,7 m. Por outro lado, observa-se que a adoção de uma configuração com 3 níveis de geogrelhas em pouco contribui para a redução dos assentamentos. Já a adoção de capitéis, tem uma influência relevante, sobretudo quando associada a uma LTP.

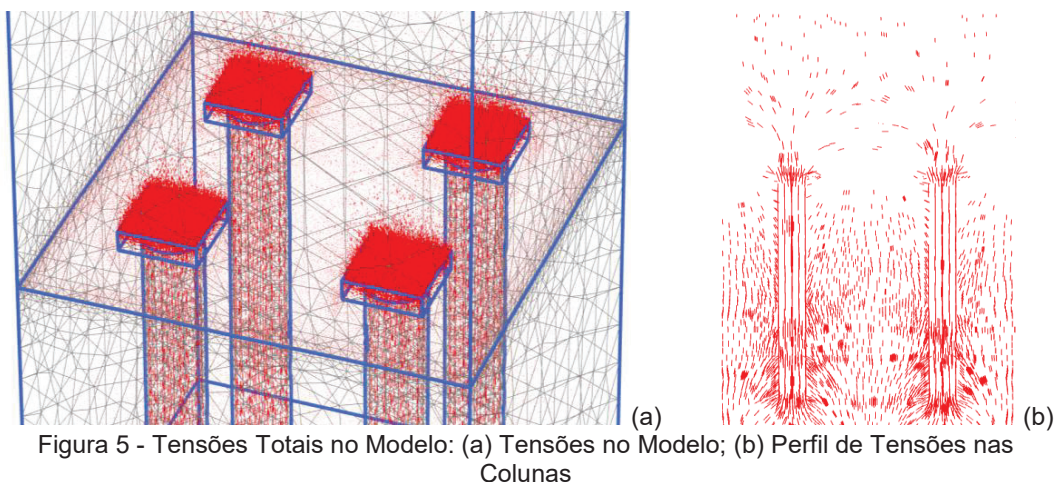
	Espaçamento de 3 m		Espaçamento de 4 m		Espaçamento de 5,7 m	
	Sem Capitéis	Com Capitéis	Sem Capitéis	Com Capitéis	Sem Capitéis	Com Capitéis
LTP 1	0,32	0,17	0,60	0,39	1,06	0,82
LTP 2	0,37	-	0,71	-	1,11	-
Sem LTP	0,73	0,24	0,83	0,58	1,17	1,03

Devido à significativa altura do aterro, 11 m, em nenhuma situação foi registado punçoamento e o assentamento no seu topo é menor do que o assentamento máximo da camada de solo lodoso, conforme se verifica pela análise do Quadro 7.

	Espaçamento de 3 m		Espaçamento de 4 m		Espaçamento de 5,7 m	
	Sem Capitéis	Com Capitéis	Sem Capitéis	Com Capitéis	Sem Capitéis	Com Capitéis
LTP 1	0,22	0,11	0,48	0,28	0,90	0,68
LTP 2	0,26	-	0,56	-	1,00	-
Sem LTP	0,64	0,14	0,70	0,40	1,10	0,88

4.2. Tensões no modelo

A partir dos diagramas de isolinhas de assentamentos total e tensões totais principais é possível constatar que houve uma simulação correta do efeito de arco nos modelos. As linhas de tensões aproximam-se dos pontos de maior rigidez: as colunas de *jet grouting* (ver exemplo na Figura 5). O efeito de arco em funcionamento é um dos principais pontos de suporte da solução de melhoramento de solos com a inserção de elementos rígidos pelo grande alívio da camada de solos moles.



4.3. Forças atuantes nas geogrelhas

No Quadro 8, apresenta-se o valor da tração máxima nas geogrelhas em cada uma das situações analisadas.

Quadro 8 - Trações nas Geogrelhas Obtidas Através do Modelo Numérico [kN/m]

		Espaçamento de 3 m		Espaçamento de 4 m		Espaçamento de 5,7 m	
		Sem Capitéis	Com Capitéis	Sem Capitéis	Com Capitéis	Sem Capitéis	Com Capitéis
LTP ₁	Superior	40	9,8	40	24	40	40
	Intermediária	40	11,0	40	27	40	40
	Inferior	40	14,8	40	40	40	40
LTP ₂	Superior	40	-	40	-	40	-
	Inferior	20	-	20	-	20	-

Da análise do Quadro 8 conclui-se que todas as geogrelhas atingiram a sua resistência à tração última, quando associadas a inclusões rígidas com os espaçamentos indicados. Nalgumas situações, as geogrelhas terão sofrido deformações irreversíveis. A introdução de capitéis tem vantagens do ponto de vista do funcionamento da geogrelhas, que só atingem a sua resistência última, no cenário de maior afastamento das colunas.

É também interessante constatar que as geogrelhas mais solicitadas são as que se encontram em contacto com os solos lodosos subjacentes e, as menos, as que se encontram no topo da LTP.

4.4. Análise comparativa dos resultados

No Quadro 9 apresenta-se a eficiência de cada solução estudada, em termos de redução dos assentamentos dos solos lodosos, por comparação com a situação em que a carga do aterro é transmitida diretamente à fundação.

Da análise deste quadro, conclui-se que a existência de colunas, por si só, reduz significativamente os assentamentos, sendo tanto maior essa redução, quanto menor o afastamento entre colunas. Contudo, quando se pretende aumentar a eficiência de 49 % para 67 %, é necessário aumentar para o dobro o número de colunas por unidade de área.

Quadro 9 - Eficiência dos Elementos de Reforço na Redução dos Assentamentos

Elementos de reforço da fundação	Espaçamento das colunas		
	3 m	4 m	5,7 m
Colunas de <i>jet grouting</i>	70 %	67 %	49 %
Colunas de <i>jet grouting</i> e LTP 2	88 %	74 %	53 %
Colunas de <i>jet grouting</i> e LTP 1	90 %	78 %	58 %
Colunas de <i>jet grouting</i> e capitéis	93 %	81 %	59 %
Colunas de <i>jet grouting</i> , LTP 1 e capitéis	95 %	87 %	68 %

A introdução de uma plataforma de transferência de carga melhora a eficiência das soluções, embora de forma mais relevante quando o afastamento das colunas é menor. Já, a introdução de um terceiro nível de geogrelhas praticamente não altera os resultados.

Devido ao aumento da área de absorção de carga em 2,25 vezes, o uso de capitéis tem uma eficiência na redução das cargas transmitidas aos solos lodosos que é significativa na situação de menor afastamento das colunas.

A associação de capitéis com uma plataforma de transferência de cargas só é relevante para a eficiência da solução, quando a distância entre inclusões rígidas ultrapassa os 4 m.

Também da análise do quadro conclui-se que adotando um afastamento entre inclusões de 5,7 m ou mais, não é possível, com as soluções estudadas (capitéis e LTP), e no cenário em causa, anular os assentamentos do aterro. Este objetivo, se definido em projeto, implica a adoção de inclusões rígidas com um afastamento, a eixo, igual ou inferior a 3 m, disposição que vai de encontro às recomendações da FHWA (2017).

5. CONCLUSÕES

Recorrendo aos resultados de um aterro experimental construído sobre aterros compressíveis, concluiu-se que a transferência de carga, por arco, é o mecanismo que mais contribui para a eficiência da solução e que o efeito de membrana tem, nalgumas situações, uma contribuição praticamente marginal.

No caso particular em estudo, a minimização dos assentamentos do aterro é conseguida com a adoção de uma distância entre inclusões rígidas de 3 m e com a sua associação a uma LTP ou a capitéis, sendo esta última ligeiramente mais eficiente, na situação analisada.

REFERÊNCIAS

- FHWA (2017). *Ground Modification Methods Reference Manual*. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-16-028 Volume II.
- Villard, P., Le Hello, B. (2009). *Embankments reinforced by piles and geosynthetics - Numerical and experimental studies dealing with the transfer of load on the soil embankment*. Engineering Geology, Volume 106, pp. 78–91.