

Comportamento de um solo residual utilizado como plataforma de transferência de carga em aterros estaqueados

Julian Asdrubal Buritica Garcia

Professor, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, julianburitica@gmail.com

Juan Félix Rodríguez Rebolledo

Professor, Universidade de Brasília, Brasil, jrodriguezr72@hotmail.com

Bernardo Caicedo

Professor, Universidad de los Andes, Colômbia, bcaicedo@uniandes.edu.co

RESUMO: A construção de obras de infraestrutura em solos moles, solos colapsáveis, areias fofas, entre outros solos complexos, tem se tornado um desafio para a engenharia geotécnica. Nas regiões litorâneas do Brasil se destacam os problemas relacionadas com fundações de diversas obras de infraestrutura assentes em solos moles de origem sedimentar marinho. Diversas técnicas têm sido utilizadas para controlar os recalques como é o caso da substituição parcial e total do solo mole, aterros de pré-carga, drenos verticais, aterros com materiais leves e inclusões rígidas e flexíveis. O mecanismo de transferência de carga das inclusões rígidas é muito complexo. O objetivo desta pesquisa é apresentar uma visão geral sobre mecanismos de transferência de carga e mecanismos de ruptura para Plataformas de transferência de carga conformadas por solos coesivos e friccionais e analisar de forma subjetiva o resultado experimental de um modelo físico em centrífuga geotécnica. O modelo avalia o comportamento da plataforma de transferência de carga conformada por um solo residual, assente em um grupo de 14 inclusões rígidas. O recalque da argila mole foi simplificado utilizando o conceito da placa móvel, uma placa que se desloca verticalmente a uma velocidade constante simulando o recalque do solo, enquanto a carga aplicada em superfície é mantida constante. Foi possível obter a distribuição de cargas no grupo de estacas enquanto a célula de carga instalada na placa móvel registra o alívio da carga. Algumas rupturas pontuais acontecem quando se forma o mecanismo de transferência de carga e se desenvolve o arqueamento do solo. A distribuição de cargas nas estacas não é uniforme, as inclusões centrais recebem a maior parte da carga. Os recalques são iguais na superfície devido à forma de aplicação da carga e resultam principalmente da deformação de um cone de transferência de carga em formato de cone truncado que se forma acima da cabeça da inclusão.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros estaqueados, Modelagem Física, Centrífuga Geotécnica, Inclusões Rígidas, Solos Moles.

ABSTRACT: Infrastructure projects on soft soils, collapsible soils, and loose sands, among other complex soils, has become a challenge for geotechnical engineering. In coastal regions of Brazil, problems related to the foundations of various infrastructure works on soft marine sedimentary soils stand out. Various techniques have been used to control settlements, such as partial and total soil removal and replacement, pre-loading fills, prefabricated vertical drains, fills with lightweight materials, and rigid and flexible inclusions. The load transfer mechanism of rigid inclusions is highly complex. This research aims to provide an overview of load transfer mechanisms and failure mechanisms for load transfer platforms formed by cohesive and frictional soils and to subjectively analyze the experimental results of a physical model in geotechnical centrifuge testing. The model evaluates the behavior of the load transfer platform formed by residual soil, supported by a group of 14 rigid inclusions. The settlement of the soft clay was simplified using the concept of a mobile plate, which vertically displaces at a constant rate, simulating soil settlement. At the same time, the applied surface load is kept constant. It was possible to obtain the load distribution on the pile group while the load cell installed on the moving plate records the load relief. Some localized failures occur when the load transfer mechanism forms and soil arching develops. The load distribution on the piles is not uniform; the central inclusions receive most of the load. Settlements are uniform at the surface due to the load application form and mainly result from the deformation of a truncated cone-shaped load transfer cone that forms above the head of the inclusion.

KEYWORDS: Piled embankments, physical modelling, Geotechnical Centrifuge, Rigid inclusions, Soft soils.

1 INTRODUÇÃO

Devido à evolução econômica e crescimento populacional, é imprescindível construir diferentes obras de infraestrutura para facilitar a comunicação entre cidades e facilitar a logística de armazenamento e transporte de mercadorias. Nesta expansão, torna-se necessário construir obras de grande porte como estradas, viadutos, pontes, galpões e ferrovias em locais com ocorrências de solos complexos como é o caso de solos moles argilosos, areias fofas, solos colapsáveis, entre outros.

No caso Brasileiro, os solos colapsáveis se encontram em diferentes regiões, especialmente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (Cintra e Aoki, 2009) e os solos moles são abundantes especialmente em regiões litorâneas e lacustres. Os solos moles apresentam baixa resistência ao cisalhamento, elevada compressibilidade e baixa permeabilidade. Os principais problemas associados com este tipo de ocorrências são a instabilidade de taludes, ruptura por capacidade de carga e recalques excessivos durante a construção e operação.

Diversas técnicas têm sido utilizadas para melhorar a estabilidade e controlar os recalques como é o caso do reforço com geossintéticos (Figura 1.a), construção de bermas de equilíbrio (Figura 1.b), construção por etapas (Figura 1.c), aterros com materiais leves (Figura 1.d), substituição parcial ou total do solo mole (Figura 1.e), aterros de pré-carga (Figura 1.f), e nos casos mais complexos ou com limitação de tempo de execução, as técnicas de inclusões flexíveis (Figura 1.g) e inclusões rígidas (Figura 1.h)

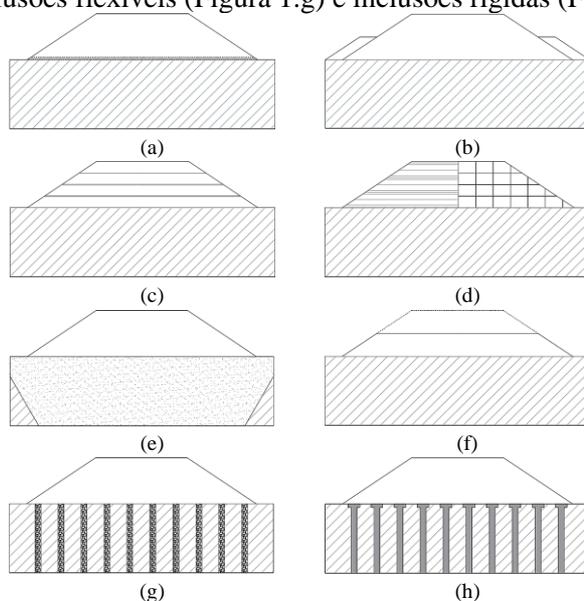


Figura 1. Técnicas construtivas em solos moles.

As inclusões rígidas têm mostrado um bom desempenho em problemas complexos com grandes cargas, grandes espessuras de solos moles e obras com limitações no cronograma. A execução das inclusões rígidas e flexíveis é consideravelmente muito mais rápida quando comparadas com técnicas convencionais.

A técnica de inclusões rígidas (Figura 2) também é conhecida como aterros estaqueados ou aterros estruturados, consiste em transferir uma parte importante das cargas superficiais para estratos mais profundos e resistentes. A técnica visa aumentar a capacidade de carga e controlar recalques. Nesta técnica é feita uma associação de elementos rígidos verticais que podem ser cilíndricos ou prismáticos (estacas) em contato com uma camada de material compactado conhecido como Plataforma de Transferência de Carga (PTC) com ou sem o uso de geossintéticos. Comumente a plataforma de transferência de carga é conformada por materiais granulares, mas em alguns lugares devido à escassez de materiais granulares, tem sido utilizado alguns solos residuais coesivos friccionais (Almeida et al., 2010).

Apesar de que existem vários métodos de análise e dimensionamento, o mecanismo de transferência de carga desenvolvido na plataforma de transferência de carga é complexo e ainda não é bem compreendido.

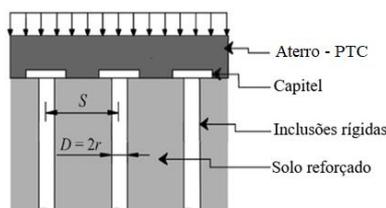


Figura 2. Esquema geral de uma fundação reforçada com inclusões rígidas (Modificado Rebolledo et al., 2019)

2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA

A plataforma de transferência de carga pode ser conformada por materiais granulares como brita, pedregulho, areia ou qualquer tipo de material cimentado (Okay et al., 2014). O objetivo da plataforma de distribuição de carga (PTC) é distribuir as cargas aplicadas até a cabeça das inclusões rígidas por meio do efeito de arqueamento do solo com o objetivo de transferir as cargas a estratos mais profundos e mais resistentes minimizando as tensões no solo mole, reduzindo os recalques (Briçon & Simon, 2012).

As principais referências normativas são a norma inglesa BS8006 “Code of practice for strengthened / reinforced soils and other fills” do ano 2010, que é um código geral para solos reforçados e construção de aterros (British Standard, 2010); as recomendações alemãs EBGE “German recommendations for geosynthetics” do ano 2011; o manual nórdico de solo reforçado: *Nordic handbook-reinforced soils and fills* (NGG, 2003) e o manual de projeto Holandês “Dutch Design guideline for piled embankments” do ano 2009. No Brasil existe a norma DNIT 381/2022-PRO “Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias – Procedimento”.

Para aterros estruturados convencionais, quando a carga é transmitida de forma flexível, Chevalier et al. (2012), Nunez et al. (2013) e Briçon et al. (2015) concordam com que os mecanismos de transferência de carga podem ser classificados em três grupos principais: métodos de arqueamento do solo, métodos prismáticos (Elementos volumétricos de concentração de tensões) e métodos de colunas fictícias (atrito negativo) como apresentado na Figura 3. Para sistemas com aplicação de carga por meio de uma placa rígida, o mecanismo de transferência de carga pode ser diferente e tem sido menos estudado na literatura técnica.

A Figura 3a representa os métodos de colunas fictícias: Low et al. (1994), Jenck et al. (2007), Chen et al. (2008), Combarieu (1990), A Figura 3b representa os métodos que abordam o fenômeno de arqueamento do solo com formato predefinido em domos semicilíndricos, Hewlett and Randolph (1988), Kemperft et al. (2004), e BS80006 (2010). Os métodos prismáticos (Figura 3c) baseados na analogia com uma prova de carga de placa também conhecidos como métodos de arcos rígidos ou escandinavos como Carlsson (1987), Guido et al. (1987), Svano et al. (2000).

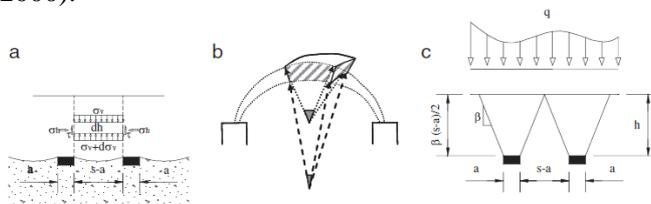


Figura 3. Grupos de métodos analíticos (Nunez et al., 2013)

Segundo Briçon et al. (2015) os métodos de projeto atual proporcionam resultados muito diferentes (elevada dispersão) para as mesmas situações e nenhum deles representa o real comportamento do sistema.

O efeito do arqueamento do solo é a principal vantagem da técnica de inclusões rígidas. As tensões verticais no solo mole diminuem porque as tensões horizontais dentro da PTC aumentam para transferir a maior parte das cargas às cabeças das inclusões, ou seja, acontece o fenômeno de rotação de tensões direcionando as cargas até os elementos rígidos verticais.

Para analisar o fenômeno de arqueamento muitos autores propuseram métodos para calcular a altura crítica. A altura crítica é a altura da PTC necessária para desenvolver corretamente o efeito de arqueamento do solo que aumenta a eficiência do sistema e mitiga ou elimina totalmente os recalques diferenciais. De acordo com Edries et al. (2023) existem três abordagens para avaliar o arqueamento do solo e altura crítica (Figura 4), cunhas, cúpulas hemisféricas e geometrias prismáticas.

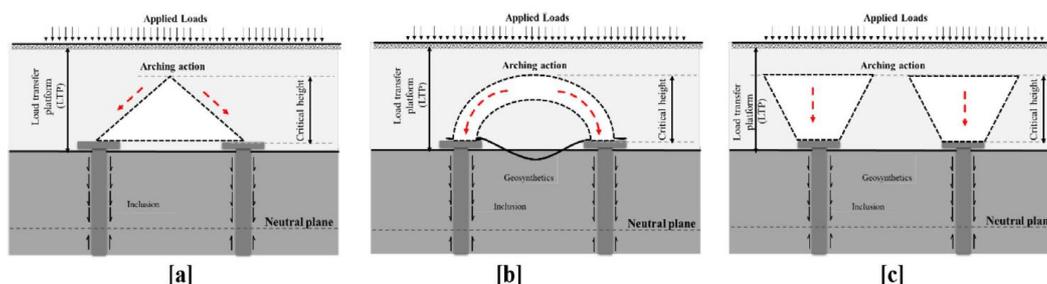


Figura 4. Diferentes abordagens dos arcos desenvolvidos na cabeça das inclusões rígidas (Edries et al., 2023).

Outros autores têm estudado com detalhes a “forma” ou geometria do arqueamento. Segundo Van Eekelen & Han (2020) os modelos de arqueamento mais utilizados na Europa São o modelo simples de arqueamento (Figura 5a) de Hewlett & Randolph (1988), e o modelo de Zaeske (Figura 5b) citado em Kempfert et al. (2004). Ainda existe uma versão modificada de arcos concêntricos (Figura 5c) apresentado por Van Eekelen et al. (2013).

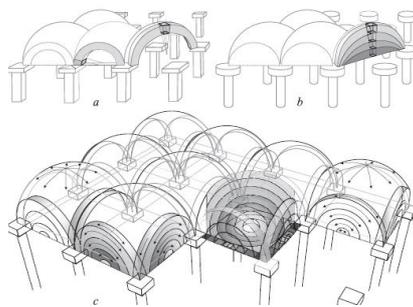


Figura 5. Diferentes abordagens de modelos de arqueamento (Van Eekelen et al., 2013).

A aplicabilidade dos modelos de arqueamento depende do espaçamento entre inclusões. Quando a distância entre os elementos se tornam muito grandes, o arqueamento é menos eficiente (Hong et al., 2014).

Na avaliação dos sistemas de inclusões rígidas existem alguns conceitos de eficiência e desempenho que devem ser mencionados.

A taxa de cobertura ou área de substituição (α) é a relação entre a área da cabeça da inclusão (ou capitel) e a área da célula tributária (área de influência).

$$\alpha = \frac{\text{Área inclusão}}{\text{Área célula tributária}} (\%) \quad (1)$$

A eficiência relaciona a carga transmitida na cabeça de cada inclusão com a carga aplicada e o peso próprio da camada de distribuição na área de contribuição, a eficiência se expressa em porcentagem, uma eficiência de 100% indica que toda a carga transmitida está sendo recebida pelas inclusões e não estão sendo transmitidas tensões ao solo reforçado.

A Eficiência do sistema pode ser obtida conforme apresentado na equação (2) e (3).

$$E = \frac{qi}{Q} \quad (2)$$

$$E = \frac{qi}{(h \cdot \gamma_n + q)A_t} \quad (3)$$

Onde

A_t = Área tributária da inclusão, Q = carga total aplicada, qi = carga medida na cabeça da inclusão.

2.1 Altura crítica da Plataforma de Transferência de carga

A altura crítica tem sido utilizada de forma extensiva em vários métodos analíticos para sistemas de inclusões rígidas. É aceito que existe uma altura mínima (altura crítica H_{crit}) a partir da qual os recalques diferenciais são consideravelmente reduzidos ou totalmente eliminados. Muitos dos métodos apresentam fórmulas para calcular a altura crítica e na maioria dos casos dependem do espaçamento livre (s-a) mas até

hoje não existe um consenso na prática profissional. Algumas das formulações foram apresentadas por Lai et. (2018) e Riyad et al. (2021) e são sumarizados na Tabela 1.

Zhang et al. (2022) realizaram uma análise de sensibilidade para identificar os parâmetros mais importantes que afetam a definição de altura crítica e o recalque. A pesquisa mostrou que os parâmetros mais importantes são: Propriedades do material da PTC como módulo de elasticidade, coesão, ângulo de atrito, seguidos por algumas variáveis como carregamento, espessura da PTC e excentricidade da carga.

Tabela 1. Cálculo de altura crítica de acordo com vários autores

Referência técnica	Recomendação	H _{crit} para o modelo (cm)
British Standard-BS8006 (2010)	$H_{crit} \geq 0.7(s-a)$	72,6
German Standard-EBGEO	$H_{crit} \geq 0.8(s_d-a)$	83,0
Nordic Handbook-NGG	$H_{crit} \geq 1.87(s-a)$	194,1
Dutch Design Guideline-CUR 226	$H_{crit} \geq 0.66(s_d-a)$, $a/s_d \geq 0.15$	68,5
Terzaghi (1943)	$H_{crit} \geq 2.0(s-a)$	207,6
Jenck et al. (2007)	$H_{crit} \geq 1.5(s-a)$	155,7
Chen et al (2008)	$H_{crit} \geq 1.4-1.6(s-a)$	166,0
Rui et al (2016)	$H_{crit} > 1.75(s-a)$, $(s-a)/a \geq 2.5$	24,1
Hewlett and Randolph (1988)	$H_{crit} \geq 1.4 (s-a)$	145,3
Van Eekelen et al. (2003)	$H_{crit} \geq 1.87 (s-a)$	194,1
Kempfert et al (2004)	$H_{crit} \geq s/2$	90,0

De acordo com Naughton (2007) quando a altura da PTC é maior que a altura crítica, as tensões de cisalhamento terminam num plano horizontal dentro da PTC. Quando a altura do PTC é menor que a altura crítica, as tensões de cisalhamento se estendem além da fronteira da superfície do aterro ou PTC. Várias pesquisas mostram que com o aumento da altura de aterro, são diminuídos os recalques diferenciais na superfície, no entanto, os estudos também mostram que ao superestimar a altura do aterro, aumenta o recalque total do sistema.

3 MECANISMOS DE RUPTURA DE SISTEMAS DE INCLUSÕES RÍGIDAS

O mecanismo de ruptura do sistema de inclusões rígidas pode ser estudado como um problema geométrico de cisalhamento de uma cunha de solo ou como um problema invertido da teoria da capacidade de carga de fundações superficiais, o equilíbrio limite antes da ruptura pode ser entendido com a teoria clássica de Terzaghi (1943), a partir de um volume de material em forma de pirâmide ou cone invertido acima da cabeça da inclusão (Figura 6).

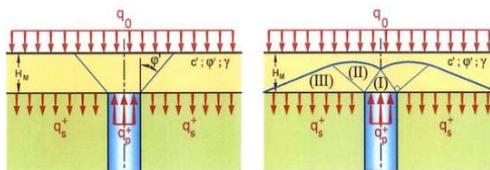


Figura 6. Diagrama de ruptura da camada de distribuição a) Cone de cisalhamento b) problema invertido capacidade de carga fundações superficiais, diagrama Prandtl (Irex, 2012)

Os métodos baseados no diagrama de Prandtl (Figura b) associam o domínio do empuxo ativo de Rankine (I), acima da cabeça da inclusão com um domínio delimitado por uma espiral logarítmica (II) e o empuxo passivo de Rankine na região (III).

O equilíbrio limite com formato de cone (Figura a) começando na cabeça da inclusão, forma um ângulo com respeito ao plano vertical que depende das características do material. Segundo Irex (2012) o modelo de ruptura de Prandtl é aplicável quando se consideram grandes deformações do material compactado e o método de cone de cisalhamento é mobilizado para pequenas deformações. Alguns métodos propostos especificamente para inclusões rígidas e alguns métodos clássicos adaptados são descritos a seguir.

Elis & Aslam (2009a,b) e Zhuang et al. (2014) discorrem sobre três mecanismos de ruptura presentes nos sistemas de inclusões rígidas baseado no método de Hewlett & Randolph (1988).

O primeiro mecanismo de ruptura consiste em uma condição onde não existe arqueamento do solo, ou seja, que a tensão no solo reforçado é igual ao peso próprio + sobrecarga. O segundo mecanismo de ruptura representa uma condição de ruptura no topo do arco baseado numa condição de equilíbrio limite no topo dos domos. A tensão no solo reforçado $\sigma_s = \gamma (s-d)/\sqrt{2}$ que corresponde ao peso nominal do solo abaixo do domo que não é suportado pelo arqueamento. O terceiro mecanismo é a ruptura por puncionamento no topo da inclusão, o puncionamento está representado por um deslocamento excessivo do topo da inclusão penetrando na camada de distribuição de carga.

4 MODELO FÍSICO CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA

Com o objetivo de avaliar o mecanismo de transferência de carga de uma PTC conformada por material residual coesivo friccional, foi realizado um modelo físico em escala reduzida em centrífuga geotécnica, com aceleração da gravidade de 30g. Foi avaliada a interação de um grupo de 14 inclusões rígidas (instrumentadas). O recalque da argila mole foi simplificado utilizando o conceito da placa móvel, uma placa que se desloca verticalmente a uma velocidade constante simulando o recalque do solo, enquanto a carga aplicada em superfície é mantida constante. O modelo foi desenvolvido na centrífuga geotécnica de braço do laboratório de modelos geotécnicos da *Universidad de los Andes* em Bogotá, Colômbia.

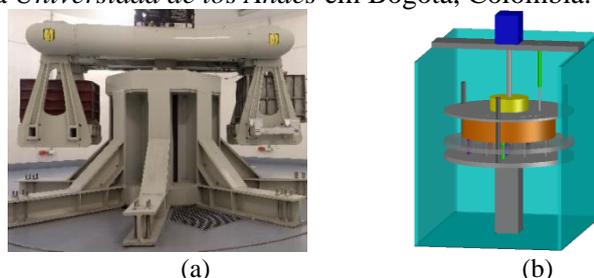


Figura 7. Modelo físico em centrífuga geotécnica 30 g a) Centrífuga de braço utilizada b) Modelo físico

4.1. Material Plataforma de Transferência de Carga

O material utilizado para a plataforma de transferência de carga foi um solo tropical residual abundante em depósitos superficiais da região centro oeste do Brasil. O material foi classificado pelo sistema unificado de classificação de solos como uma CL (argila arenosa de baixa plasticidade) quando realizado com defloculante e quando é ensaiado sem defloculante como uma SC (areia argilosa). O limite de plasticidade do solo é de 45% e o limite índice de plasticidade de 19%. A classificação MCT tradicional e expedita, classifica o solo como LA'-LG' (solo arenoso laterítico e argiloso laterítico). O material da PTC foi compactado de forma estática, a partir de um ensaio de compactação foi definida a $w = 24\%$ e o $\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,9 \text{ kN/m}^3$. Os parâmetros de resistência e deformabilidade (Tabela 2) foram obtidos por meio de ensaios triaxiais tipo CD e ensaios de adensamento. Detalhes do solo coesivo friccional podem ser encontrados em Garcia et al. (2021).

Tabela 2. Parâmetros de resistência e deformabilidade do material da PTC

Material	σ_3 kPa	Resistência pico		Resistência residual		ψ °	ϵ_f %	q_f kPa	E_{50} MPa
		c' kPa	ϕ' °	c' kPa	ϕ' °				
50						5	4.0	231	13
SN	100	51	26	34	28	0	4.0	340	17
	200					0	4.7	465	26

4.2 Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado considerando 14 inclusões de 2,54 cm de diâmetro no modelo que representam 76,2 cm no protótipo; separação entre inclusões de 6 cm no modelo e 180 cm no protótipo e altura da PTC no modelo de 3,4 cm que representa 102 cm no protótipo. A taxa de cobertura α do modelo foi 17,9%. A PTC com diâmetro de 25 cm no modelo representa 7,5 m de diâmetro no protótipo.

A instrumentação do ensaio consiste num grupo de células de carga para avaliar a eficiência na transferência e a porcentagem de carga que é direcionada às inclusões centrais e de borda, além da carga transferida à placa. Também foram monitorados os recalques do topo da placa rígida de aplicação de carga. No ensaio foram usadas 7 células de carga e um transdutor de deslocamento linear LVDT.

O procedimento do ensaio consistiu na rotação do cesto da centrífuga até atingir 30 g; aplicação de carga na placa superior de 172 kgf (1,7 kN) no modelo (1518 kN no protótipo, pressão de 34,4 kPa); e Deslocamento vertical da placa móvel (placa 2) a uma velocidade de 0.016 mm/s até atingir 10 mm de deslocamento; fim do ensaio, se desacelera a centrífuga e se verifica a geometria da ruptura.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Identificam-se duas fases, a primeira fase consiste na aplicação do carregamento máximo possível, limitado a 1500 kN pela capacidade do equipamento durante o voo, a segunda fase do ensaio consistiu em manter a carga constante e deslocar a placa móvel a uma velocidade constante para verificar como funciona a redistribuição de cargas nas inclusões após os recalques ocorrerem. Na Figura 8 se observa que no início do ensaio a carga aplicada F_1 e a carga na inclusão aumentam até atingir um patamar de 1500 kN, a carga aplicada se apoia totalmente na placa móvel. Após o final da etapa 1, mantendo a carga constante se inicia o deslocamento da placa móvel que representa o recalque e a carga é transferida às inclusões rígidas.

Os valores registrados pela célula de carga instalada na placa F_p durante a fase 2 indicam valores negativos próximos de 600 kN, que correspondem ao peso próprio da camada de distribuição, devido a que os instrumentos foram zerados após o início do ensaio. Durante o ensaio foi possível observar que as inclusões centrais receberam a maior parte da carga. A eficiência do sistema atingiu valores próximos a 100%.

Durante a fase 1 de aplicação de cargas, acontece uma parcela do recalque total $\Delta\rho$ por compressão da camada de distribuição de carga sob cargas atuantes (30 mm, 2.9% da altura total do aterro), depois, durante a fase 2 quando a placa tem um deslocamento de 300 mm (Δu) mantendo a carga de 1500 kN constante, o restante dos recalques acontece totalizando recalques próximos a 96 mm (9.4% da altura da camada de distribuição). Os recalques do solo reforçado (Δu) e os recalques do radier ($\Delta\rho$) são mostrados na Figura 8b.

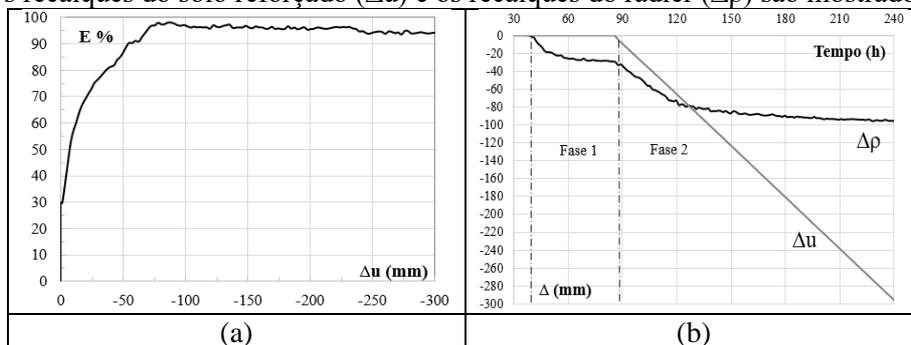


Figura 8. Amostra compactada utilizada

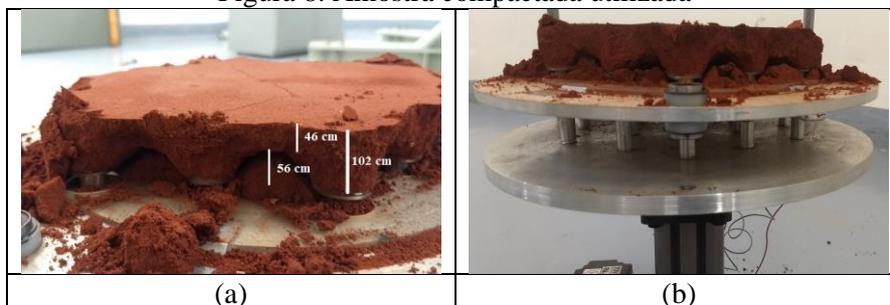


Figura 9. Amostra compactada utilizada

Na Figura 9 é possível observar que a altura do arqueamento completo ($H_{crítica}$) foi de 56 cm no protótipo, observa-se a formação integral de arcos concêntricos 3D. O material abaixo dos domos fica sem confinamento e se apoia na placa móvel que neste ensaio, representa o solo mole.

6 CONCLUSÕES

Foi observado o fenômeno de arqueamento nos solos na maioria dos ensaios. Na parte inferior dos domos uma porção da camada de distribuição se apoia na placa. A eficiência durante o ensaio foi entre 80% e 100%, o que quer dizer que com recalques elevados (condição crítica) a eficiência aumenta. A partir da análise do mecanismo de ruptura e mecanismo de transferência de carga da camada de distribuição nos modelos físicos, foi observado um volume com formato de cone truncado começando na cabeça da

inclusão e terminando na superfície da camada de distribuição. O cone truncado de concentração de tensões transmite a carga do peso próprio e das sobrecargas diretamente às cabeças das inclusões. A zona que fica fora do cone truncado pode gerar pressões no solo reforçado.

A altura crítica observada no ensaio é coerente com o método British Standard-BS8006 (72,6 cm) e Dutch Design Guideline-CUR 226 (68,5 cm).

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Brasília, Universidade Federal de Santa Catarina e *Universidad de los Andes*.
À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal FAPDF e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M.S.S. & Marques, M.E.S. (2010). Aterros sobre solos moles - projeto e desempenho. São Paulo, Oficina de Textos, 254 p.
- Briançon, L. & Simon, B. (2012). Performance of pile-supported embankment over soft soil: full-scale experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138, No. 4, 551–561.
- Briançon, L., Dias, D., & Simon, C. (2015). Monitoring and numerical investigation of a rigid inclusions–reinforced industrial building. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), 1592-1604.
- Briançon, L. and Simon, B. (2017). Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line. *Geosynthetics International*.
- British Standard, (2010). BS 8006. Code of practice for strengthened/reinforced soils and others fills, section 8.
- Carlsson, B. 1987. "Armerad jord beräkningsprinciper för vertical väggar, branta slänter, bankar på lös undergrund, bankra på pälår," Linköping, Sweden: Terrateam AB.
- Chen, Y.M., Cao, W., Chen, R.P., (2008b). An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments. *Geotextiles and Geomembranes* 26, 164–174.
- Cintra, J. C. A. & Aoki, N. (2009) Projeto de fundações em solos colapsáveis. São Carlos: EESC-USP.99 p
- Chevalier, B., Villard, P., and Combe, G. (2011). Investigation of load transfer mechanisms in geotechnical earth structures with thin fill platforms reinforced by rigid inclusions. *International Journal of Geomechanics*. 11 (3): 12
- Combarieu O. (1990) Foundations superficielles sur sol amélioré par inclusions rigides verticales. *Revue française de géotechnique*, n° 53, 33-44.
- EBGEO. (2011). Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements, Wiley, Berlin.
- Edries, N.M., Al-Atroush, M.E., Rashed, A., Ahmed, S.M. (2023) Estimation of the piled embankment critical height: a systematic review. *Innovative infrastructure solution*, 8 (84), p.2-29.
- Garcia, J. A. B., Rodríguez Rebolledo, J. F., dos Santos Mützenber, D. V., Caicedo, B., & de Farias, Neves Gitirana, G. (2021). Experimental investigation of a load-transfer material for foundations reinforced by rigid inclusions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(10), 1–14, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002649](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002649).
- Guido, V.A., Kneuppel, J.D., Sweeney, M.A., 1987. Plate loading test on geogrid reinforced earth slabs. *Proc. of Geosynthetics'87*, New Orleans, USA, février 1987. Industrial Fabrics Association International, St Paul, MN, USA, pp. 216–225.
- Hewlett, W.J. & Randolph, M.F. (1988). Analysis of piled embankment. *Ground Eng.* 21 (3), pp 12-18.
- Jenck, O., Dias, D., and Kastner, R. (2007a). Two-Dimensional Physical and Numerical Modeling of a Pile-Supported Earth Platform Over Soft Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 133:3 (295), ASCE.
- Kempfert H. G, Göbel C, Alexiew D and Heitz C. (2004) German recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements. *Proceedings of EuroGeo 3*, Munich, Germany, pp. 279–284.
- Lai, H.J., Zheng, J.J., Zhang, R.J., & Cui, M.J. (2018). Classification and characteristics of soil arching structures in pile supported embankments. *Computers and Geotechnics* 98, 153-171 pp
- Low, B.K., Tang, S.K Choa, V. (1994). Arching in piled embankments. *ASCE Journal of Geot Engineering* 120 (11), 1917-1938.
- NGG. (2003). Nordic handbook–Reinforced soils and fills, Nordic Geotechnical Society, Stockholm.
- Nunez, M., Briançon, L., and Dias, D. 2013. Analyses of a pile-supported embankment over soft clay: full-scale experiment, analytical and numerical approaches. *Engineering Geology*, 153: 53–67.
- Okyay, U.S., Dias, D., Thorel, L. & Rault, G. (2014). Centrifuge modelling of a pile-supported granular earth-platform. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140, No. 2, 1–12
- Rebolledo, J.F.R.; León, R.F.; Camapum De Carvalho, J. (2019b). Performance Evaluation of Rigid Inclusion Foundations in the Reduction of Settlements. *Soils and Rocks*, 42(3):265-279
- Riyad, A.S.M, Ferreira, F.B., Indraratna, B. & Ngo, T. (2021). A Critical Review on the Performance of Pile-Supported Rail Embankments under Cyclic Loading: Numerical Modeling Approach. *Sustainability* 13, 2509.
- Rui, R., A. F. van Tol, X. L. Xia, S. J. M. van Eekelen, G. Hu, and Y. Y. Xia. (2016). "Evolution of soil arching; 2D DEM simulations." *Comput. Geotech.* 73: 199–209.
- Svano, G., Ilstad, T., Eiksund, G., and Want, A. (2000). Alternative calculation principle for design of piles embankments with base reinforcement. In *Proc of the 4th International Conference of Ground Improvement Geosystem*, Helsinki, Finland.
- Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A & Van Tol, A.F. (2013) Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments, *Geotextiles and Geomembranes* 43 56-81 pp
- Zhang J, Dias D, An L, Li C (2022) Applying a novel slime mould algorithm- based artificial neural network to predict the settlement of a single footing on a soft soil reinforced by rigid inclusions. *Mech Adv Mater Struct*.