Rodovia do Parque BR-448: Uso de Colunas Encamisadas com Geotêxtil (GEC) para Redução de Empuxos em Aterro de Aproximação de Pontes e Viadutos. *Geosyntetic Encased Sand Columns Used to Reduce the Horizontal Earth Pressures Acting on Structures Adjacent to Compaction Fills.*

Fernando Schnaid
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, fernando@ufrgs.br, (51) 3308-3552

Daniel Winter
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, danielwinterpoa@gmail.com, (51) 8407-6467

Fernando Alves
Drenamac, Porto Alegre, Brasil, drenamac@uol.com.br, *(51) 3029-7593*

RESUMO: Colunas de areia encamisadas com geossintético (GEC) tem sido frequentemente adotadas na prática de engenharia para melhorar a capacidade de carga, reduzir recalques e acelerar o adensamento em solos moles. O presente trabalho sobrepõe estes objetivos mais tradicionais, introduzindo um método pioneiro em nível internacional de uso de colunas para reduzir a magnitude dos empuxos que atuam sobre estruturas adjacentes a aterros sobre solos moles. Dado ao caráter inovador da solução, foi necessário validar o conceito através de um programa de monitoramento de um pilar de um viaduto de grande porte em solo mole protegido por um sistema composto por GECs e geogrelhas de reforço. O desempenho em campo foi monitorado com células de pressão, piezômetros elétricos, inclinômetros e placas de recalque. Os resultados são conclusivos, indicando a eficiência do método para reduzir esforços sobre estruturas, abrindo um novo campo de aplicação para Colunas Encamisadas com Geotêxtil (GEC).

SUMMARY: Geosynthetic Encased Sand Columns (GEC) have been frequently adopted in geo-engineering practice to improve bearing capacity, reduce settlements and accelerate consolidation in saturated soft cohesive ground. The present paper extends these early views by introducing the use of columns to reduce the magnitude of horizontal earth pressures acting on structures adjacent to compaction fills. Given this pioneering application of GEC internationally, the method has been validated through a detailed monitoring program. The program of a full-scale bridge abutment on soft soil supported by GECs and geogrid reinforced system is described and field performance was monitored with pressure cells, electrical piezometers, inclinometers and settlement plates. The collected database is interpreted in order to estimate the horizontal earth pressure over bridge border foundation piles. Results are conclusive by demonstrating the efficiency of the method in reducing earth pressures transmitted to nearby structures which open a number of new possibilities in the use of GEC in geotechnical engineering.

1. OBRA

A Rodovia do Parque (BR-448) foi concebida como alternativa para desafogar até 40% do trânsito da BR-116, segundo estimativas da Polícia Rodoviária Federal. A Rodovia foi implantada em área com lavouras de arroz, adjacente ao Parque do Delta do Jacuí. Os extensos trechos de aterros sobre solos moles, junto às áreas de proteção ambiental, exigiram a construção de passagens de fauna em

túneis sob a rodovia e 4.500 metros em pontes e viadutos (Figura 1).

A obra foi dividida em 3 lotes. O Lote 1 vai desde o km 0 (Sapucaia do Sul) até a BR-386, em Canoas (km 9,14). O Lote 2 do km 9,14 ao 14,44 (5,30 km de extensão), inclui um viaduto sobre a faixa de domínio da Transpetro, viaduto da BR-386, ponte sobre a vala externa do Dique Mathias Velho e da vala da Rua Curitiba e viaduto sobre a ferrovia concedida à ALL. O Lote 3 inicia próximo da Bianchini (km 14,44) e segue até a Free Way (km 22,34), em Porto Alegre. O projeto descrito neste trabalho foi realizado no Lote sob responsabilidade do Consórcio Construcap Ferreira Guedes, tendo sido iniciado em 2011 e finalizado em Dezembro de 2013, quando foi inaugurado pela Presidente Dilma Roussef. O empreendimento foi realizado sob investimento do governo federal, sob responsabilidade do DNIT (Departamento Nacional de Infra-estrutura Rodoviária) e supervisão do Consórcio Magna Engenharia – Ecoplan.

Figura 1. Rodovia do Parque: Aterros sobre solos moles (fonte internet http://www.br448rodoviadoparque.com.br/rodovia/index.html)

2. COLUNAS ENCAMISADAS COM GEOTÊXTIL (GEC)

Colunas de areia têm sido usadas sistematicamente na prática da engenharia como uma técnica de melhoramento do terreno projetado para transferir as cargas superficiais a substratos com maior capacidade de carga (Alexiew et al, 2005; Alexiew et al, 2012; Raithel et al, 2005). Em solos muito moles, o confinamento lateral oferecido pelo solo circundante às colunas pode não ser suficiente para garantir o apoio necessário e, consequentemente, as colunas são revestidas por geossintéticos tubulares de reforço (neste caso, são referidas como Colunas Encamisadas com Geossintéticos, ou, em inglês, *Geosynthetic Encased Columns*, GEC). O invólucro aumenta a resistência e a rigidez da coluna de areia, proporcionando maior capacidade de carga e recalques menores, como amplamente demonstrado por diversos estudos experimentais ou numéricos (Raithel & Henne, 2000;. Madav et al, 1994; Malarvizhi e Ilamparuthi, 2004; Murugesan & Rajagopal, 2006; Gniel & Bouazza, 2010; Najjar et al, 2010). Além de melhorar o comportamento da carga / recalque da fundação, GECs trabalham como drenos verticais, reduzindo o tempo de adensamento de depósitos de argila sob carga. Para cumprir tal papel, o geotêxtil utilizado é fabricado em formato tubular (sem costuras que poderiam gerar pontos de fragilidade), com abertura de poros adequada à boa condiçãode retenção e permeabildiade à água e, acima de tudo, com elevada rigidez à tração na direção perimetral para garantir a condição de confinamento requerida para manutenção da integridade e da capacidade de carga da coluna granular.

Embora a técnica já esteja bem estabelecida, não tem sido realizada investigação sobre a utilização de colunas com a função de aliviar empuxos induzidos pela construção de aterros agindo sobre fundações de estruturas adjacentes. Esta é uma ocorrência comum durante o trabalho de elevação de aterros de aproximação de pontes ou viadutos, tanques de armazenamento, muros de contenção, entre outras situações. Este trabalho tem como objetivo fornecer algumas referências sobre este tema, discutindo a interação de um pilar do viaduto e um aterro rodoviário com 8m de altura construído sobre solo mole, onde uma das preocupações foi que o potencial aumento da pressão horizontal pudesse sobrecarregar as estacas da estrutura anteriormente construída.

3. ESTUDO DE CASO

Para um novo projeto de rodovia de alto tráfego no estado brasileiro do Rio Grande do Sul, a solução foi concebida com a finalidade de proteger as fundações de pontes e viadutos existentes construídas antes dos aterros de aproximação. O tratamento do terreno de implantação de um aterro com 8m de altura foi monitorado, sendo os resultados analisados para validação da técnica proposta.

Um programa abrangente de investigação foi realizado para avaliar as condições do local, compreendendo SPTs, CPTs, palhetas e Shelby de 4” para amostragem de solo e realização de ensaios triaxiais e edométricos. O perfil CPTU representativo das áreas é composto de um depósito sedimentar com 6m a 8m de camada de argila mole sobre uma camada de areia densa. Perto da superfície há uma crosta sobreadensada dentro da profundidade afetada por variações sazonais do lençol freático. A poro-pressão hidrostática está de acordo com o nível de água regionais (perto da superfície), sem indicação de artesianismo.

Dada a presença de um depósito de argila mole e a proximidade de um aterro de elevada espessura adjacente a um viaduto, a solução de projeto foi concebida com base na instalação de um reforço da geogrelha combinado com 4 linhas de colunas GEC ao lado da estrutura, além de 2 linhas na borda lateral do viaduto. Colunas de areia com 800mm de diâmetro e 2,4m de espaçamento, em um padrão triangular, foram colocados na argila sob o aterro, o que corresponde a uma razão de substituição de área de 10%. As colunas foram instaladas até completar a profundidade de camada de argila mole com um tubo metálico de ponta fechada e um diâmetro exterior igual ao diâmetro da coluna (0,80 m). O tubo cravado por um martelo vibratório impede a parede exterior do colapso durante a perfuração no solo mole e permite a instalação do geossintético, da areia de enchimento e a remoção do tubo na etapa final de instalação. Um detalhamento das etapas construtivas é apresentado na Figura 2. A Figura 3 apresenta uma persperctiva da instalação da obra junto ao viaduto sobre a BR-116 (locação onde foi realizado o monitoramento) e a obra finalizada. Na Figura 4 o projeto é mostrado conforme foi executado.

A areia do Rio Guaíba que é classificada como uma areia mal graduada de acordo com a Classificação de Solos pelo Sistema Unificado foi usada como material de preenchimento das colunas. O tecido geossintético fornecido garantia o apoio lateral para a coluna de areia e drenagem relativamente rápida do excesso de poro-pressão gerado pelo carregamento. As propriedades do geossintético, cuja marca registrada é Ringtrac, produzido pela HUESKER Synthetic, determinadas a partir de procedimentos de ensaios normalizados estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do geossintético.

Parâmetro	Norma ISO	Valor
Resistência à tração na direção perimetral (kN/m)	10319	≥ 200
Deformação máxima na direção perimetral (%)	10319	$\leq 12\%$
Módulo de rigidez a 5% na direção perimetral (kN/m)	10319	≥ 1.900
Permeabilidade (m/s)	11058	$\geq 2 \times 10^{-3}$
Diâmetro nominal (m)		0,8

Figura 2 : Processo executivo dos geossintéticos:
a) Vibrador para colocação do revestimento; b) Coluna encamisada e remoção do revestimento;
c) Coluna encamisada finalizada; d) colocação da geogrelha sobre colunas.

Figura 3. Viaduto sobre a BR-116: a) execução de uma coluna encamisada; b) obra finalizada.

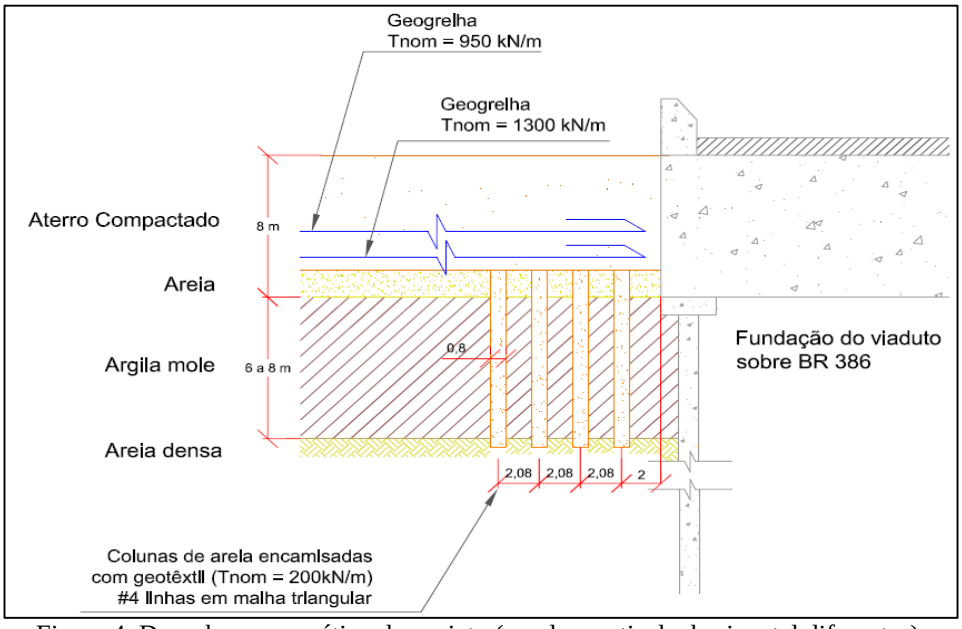

Figura 4. Desenho esquemático do projeto (escalas vertical e horizontal diferentes).

4. DADOS EXPERIMENTAIS

Um programa de monitoramento foi implementado para estudar o desempenho da solução adotada e para validar as previsões obtidas pelas análises previamente efetuadas na avaliação da magnitude do empuxo e dimensionamento da solução. Um conjunto de instrumentos foi instalado, compreendendo células de pressão total, piezômetros elétricos, inclinômetros e placas de recalque. Células de pressão e piezômetros (capacidade 700kPa cada, fornecidos pela GEOKON) foram instalados entre a primeira linha de colunas e linha mais externa de estacas do viaduto, 50cm a partir desta, na vertical, em 6 posições diferentes (3 profundidades para as células de pressão e 6 para os piezômetros). Dois inclinômetros foram instalados entre as colunas para monitorar os campos de deslocamento horizontal dentro da camada de solo mole, enquanto placas de recalque foram instaladas em locais diferentes em ambas as áreas tratadas e não tratadas para o acompanhamento da

evolução dos recalques no período de construção e adensamento. Os piezômetros de corda vibrante foram instalados em poços perfurados. As células de pressão foram fixadas em um perfil de aço com seção H, conforme ilustrado na Figura 5. A discussão a respeito da eficácia da solução é apresentada com base neste programa de monitoramento que contemplou medições mantidas durante um período de cerca de 154 dias (de 08/08/2013 a 09/01/2014) até as poro pressões em excesso serem dissipadas.

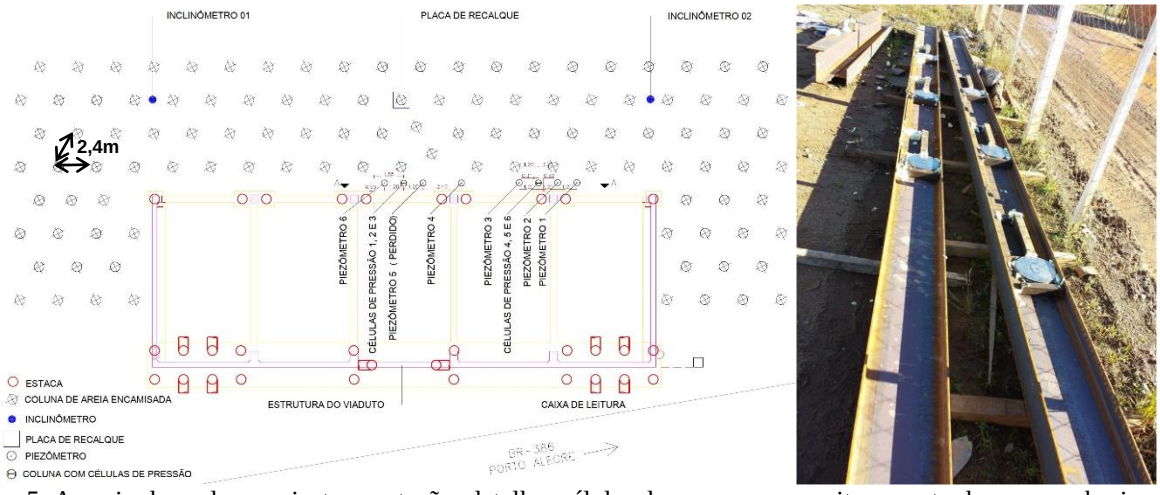

Figura 5. Arranjo das colunas e instrumentação; detalhe: células de carga para monitoramento do empuxo horizontal.

Recalques totais foram registrados em vários locais durante o alteamento do aterro, sendo um na área de colunas encamisadas e os outros sobre o depósito não tratado de argila mole. Os máximos recalques do solo mole medidos foram da ordem de 110mm e 340mm nas áreas com e sem tratamento, respectivamente. O fator de melhoria correspondente, definido como a relação entre a liquidação final, sem e com a melhoria, é de cerca de 3,1 que está dentro dos valores numéricos e analíticos previstos (Castro e Sagaseta, 2011). A relação é conhecida como sendo uma função da rigidez e da resistência à tração da coluna, da rigidez do solo circundante, da razão de substituição e da carga aplicada.

Os deslocamentos horizontais máximos medidos ao longo da profundidade, no eixo perpendicular ao aterro, são de cerca de 65mm, em uma profundidade em torno de 3,5m (aproximadamente a metade da profundidade da camada de argila). As taxas de deslocamento diminuíram substancialmente na fase final de construção e estavam perto de estabilização em leituras finais.

Os resultados das variações de poro-pressões com o tempo são ilustrados na Figura 6 a partir de piezômetros colocados a diferentes profundidades. Os resultados mostram um aumento constante da poro-pressão com o tempo, durante a construção, seguido por diminuição da pressão devido ao adensamento. As variações de pressão neutra com profundidade indicam um aumento constante do valor da poro-pressão a partir da pressão hidrostática, em geral aumentando linearmente com a profundidade. Devido à maior rigidez das colunas revestidas em relação ao solo circundante, as colunas tendem a concentrar as tensões verticais do aterro e apenas uma menor parte é transferida para a camada de argila, neste sistema compósito. Neste estudo de caso, o excesso de poro-pressão Δu em relação ao aumento da sobrecarga $\Delta\sigma_v$ apresentou-se na proporção de 0,1 a 0,3. Estes dados correlacionam bem com a análise FEM realizada na fase original de análises.

A Figura 7 mostra as variações no empuxo horizontal medidos com o aumento da carga de aterro. Durante a instalação das células de pressão, os perfis H não foram submetidos a qualquer movimento significativo e o empuxo horizontal permaneceu próximo ao valor da condição de repouso, o que para solos coesivos normalmente adensados é de aproximadamente (1-sinϕ'). Como os perfis H eram impedidos de se transladar ou rotacionar, cada fase de construção produziu um aumento na pressão horizontal na camada de argila induzida pelos movimentos horizontais indicados pelos inclinômetros.

Os diagramas de tensão horizontal medidos mostram duas características distintas: no carregamento inicial o empuxo horizontal gerado aumenta linearmente com a profundidade enquanto que em estágios de cargas maiores, aumenta linearmente até uma certa profundidade (aproximadamente metade da profundidade da camada de argila) e reduz a partir deste ponto.

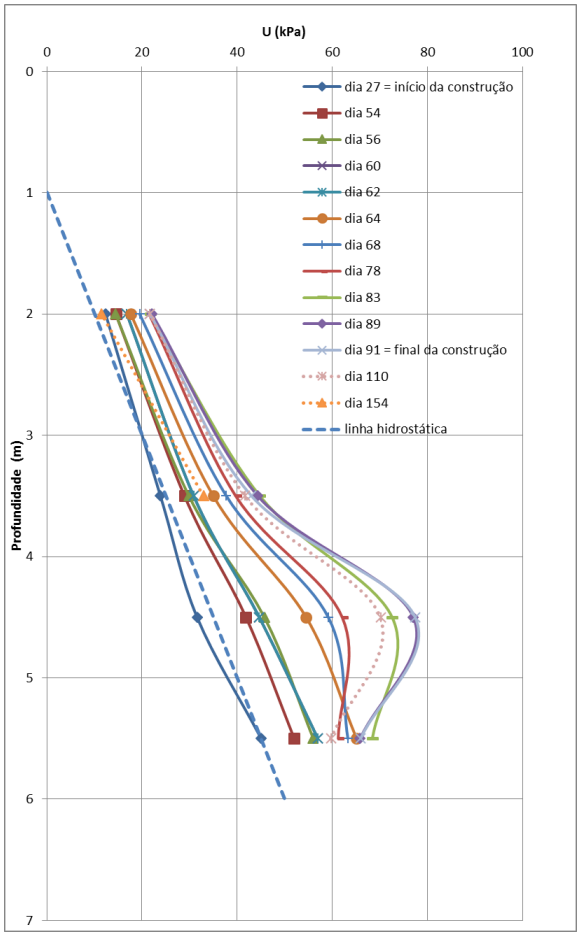

Figura 6. Variação da poro-pressão em função da profundidade.

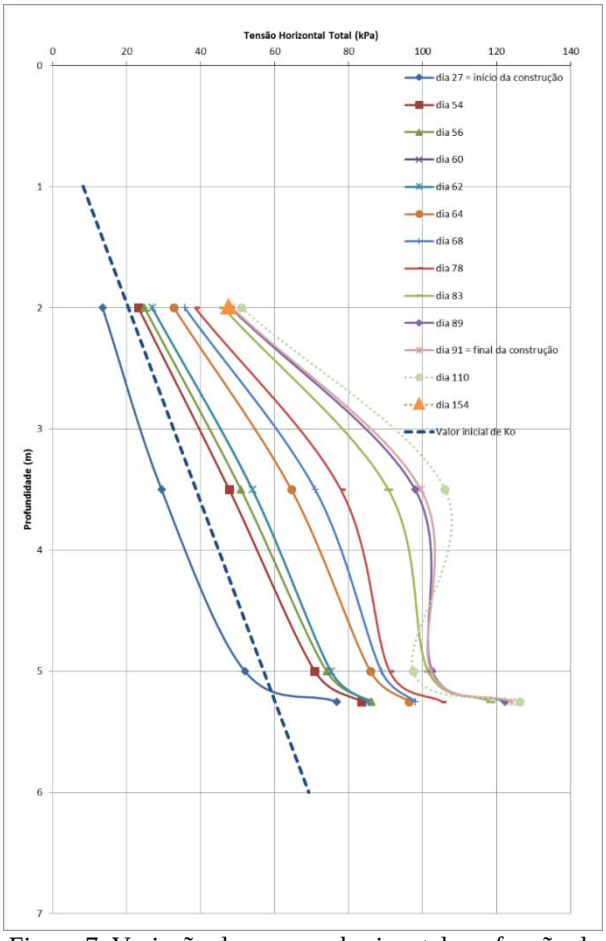

Figura 7. Variação do empuxo horizontal em função da profundidade.

Pressões horizontais medidas aumentam progressivamente durante a elevação do aterro em condições predominantemente não drenadas, identificados a partir de leituras de piezômetros. Após a conclusão da construção do trabalho de terraplenagem, a drenagem ocorre progressivamente, sendo ainda observado um último aumento da pressão. Na metade da profundidade da camada de argila, a pressão máxima medida horizontal é de 110 kPa, um valor que representa quatro vezes a medição inicial nessa mesma profundidade. No entanto, esta pressão medida é de cerca de metade do que a prevista para uma camada de argila não tratada, como calculado numericamente (não mostrado neste trabalho) ou calculado a partir da metodologia proposta pela teoria de Tschebotarioff (Tschebotarioff de 1973) para condições de carregamentos assimétricos.

5. CONCLUSÕES

O presente artigo discute o uso de Colunas de Areia Encamisadas instaladas em solos moles para reduzir a magnitude dos empuxos que atuam sobre uma estrutura de viaduto, adjacente a um aterro de 8m construído posteriormente à estrutura. A solução adotada foi amplamente monitorada com células de pressão, piezômetros elétricos, inclinômetros e placas de recalque, com o objetivo de avaliar o mecanismo de transferência de carga que ocorrem na camada de argila mole. O monitoramento comprova que colunas de areia são úteis como elementos de drenagem, redução do excesso de pressões neutras geradas na camada compressível e redução de recalques. Adicionalmente demonstra-se que as colunas são eficientes na redução dos esforços horizontais que agem sobre estruturas adjacentes aos aterros, possibilitando novos usos de GEC em obras de engenharia geotécnica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes pessoas e empresas que deram um grande apoio para o desenvolvimento do trabalho: André Bertoncini Zanette, Fábio José de Souza Hora e Joel Machado Moreira da Construcape Geraldo Moretti e Dênis Suzuki da Moretti Engenharia.

REFERÊNCIAS

Alexiew, D., Brokemper, D., Lothspeich, S. (2005). Geotextile encased columns (GEC): load capacity, geotextile selection and pre-design graphs. *Proceedings of GeoFrontiers 2005*, Austin, Texas, United States, pp. 497–510.

Alexiew, D., Raithel, M., Küster, V., Detert O.(2012). 15 years of experience with geotextile encased granular columns as foundation system. *International Symposium on Ground Improvement 2012* Brussels, Belgium.

Castro, J., Sagaseta, C. (2011). Defomation and consolidation around encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes 29*, 268-276.

Gniel, J., Bouazza, A.(2010). Construction of geogrid encased stone columns: A new proposal on laboratory testing. *Geotex-tiles and Geomembranes 28*, 108-118.

Madhav, M.R., Alamgir, M., Miura, N. (1994). Improving granular column capacity by geogrid reinforcement. *Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Singapore, vol.1, pp. 351–356.

Malarvizhi, S. N. and Ilamparuthi, K.(2004). Load versus Settlement of Clay bed stabilized with Stone and Reinforced Stone Columns. *3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Seoul, 322 – 329.

Murugesan, S., Rajagopal, K. (2006). Geosynthetic-encased stone columns: numerical evaluation. *Geotextiles and Geomem-branes 24*, 349–358.

Najjar, S., Sadek, S., and Maakaroun, T.(2010). Effect of Sand Columns on the Undrained Load Response of Soft Clays. J*ournal of Geotechnichal and Geoenvironmental Engineering 136(9)*, 1263–1277.

Raithel, M., Henne, J. (2000). Design and numerical calculation of a dam foundation with geotexile coated sand columns. *Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Geosystems*,Helsinki, pp.1-8.

Raithel, M., Kirchner, A., Schade, C., Leusink, E. (2005). Foundation of construction on very soft soils with geotextile encased columns. *Innovations in Grouting and Soil Improvement*. pp. 1-11.

Tschebotarioff, G.P. (1973). *Fundations, Retaining Walls and Earth Structures*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 642p.