

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Capacidade de Carga de um Modelo de Fundação Superficial em Solo Arenoso Fofo com Reforço de Geotêxtil

Eng. Lucas Amarante Constancio

Diretor Técnico, Helix Engenharia e Geotecnia, Americana-SP, Brasil, lucas@helix.eng.br

Prof. Dr. Pérsio Leister de Almeida Barros

Professor Colaborador, FEC/Unicamp, Campinas-SP, Brasil, persio@fec.unicamp.br

RESUMO: Este trabalho visa avaliar o ganho de capacidade de carga de uma fundação superficial em areia fofa, com a inclusão de reforço de material geossintético. Para tanto, propõe-se observar o aumento da capacidade de carga do solo, com uma única camada de reforço em geotêxtil tecido, para uma fundação superficial do tipo sapata corrida. Através de um modelo reduzido que atende os critérios para atingir o estado plano de deformação, avalia-se a capacidade de carga do solo sem reforço, com reforço planar horizontal e faz-se uma nova proposta de disposição geométrica de tal elemento, buscando maior ganho de capacidade de carga e atenuação de deformações. O modelo reduzido é ensaiado no interior de um tanque que permite o acompanhamento das deformações através de sua face translúcida, além da aquisição dos dados de carga aplicada e recalque da fundação. Com a aquisição dos dados, é possível estabelecer comparações entre as diferentes situações analisadas, através da análise dos gráficos de carga-recalque. O trabalho mostra que é possível obter-se um ganho na capacidade de carga com inclusão do reforço e também que é possível chegar a capacidades de carga ainda maiores, apenas readequando a geometria do posicionamento do reforço com uma angulação do geotêxtil.

PALAVRAS-CHAVE: Geotêxtil, Capacidade de Carga de Fundações, Solo Reforçado, Modelo Reduzido, Solo arenoso fofo.

ABSTRACT: This study aims to evaluate the gain in bearing capacity of a shallow foundation on a soft sand, through the inclusion of geosynthetic reinforcement. For this, the bearing capacity of a soft sandy soil carrying a shallow strip footing, without any reinforcement, and with a single layer of reinforcement of a woven geotextile is observed. Through the use of a reduced model, which satisfy the criteria for reaching a plane strain state, the bearing capacity of the unreinforced soil, the soil reinforced with planar horizontal and the soil reinforced with a new proposed geometric arrangement seeking greater gain of bearing capacity and the attenuation on deformation are evaluated. The reduced model is placed in a tank which allows the monitoring of deformations through its translucent face, and acquisition of applied load and foundation settlement data. After the acquisition of data it is possible to make comparisons between the different situations analyzed by examining the plots of load versus settlement. The results show that it is possible to obtain a gain in capacity with the inclusion of reinforcement and that it is possible to reach even higher bearing capacity just adjusting the geometry of the reinforcement placement, providing an inclination to the geotextile sheet.

KEYWORDS: Geotextiles, Foundation Bearing Capacity, Reinforced Soils, Reduced Scale Model, Soft Sand.

1 Introdução

A crescente urbanização implica numa invariável escassez das áreas mais nobres do ponto de vista geotécnico.

Tendo o fator escolha prejudicado, faz-se necessário o uso de ferramentas geotécnicas para que seja possível deixar os terrenos disponíveis aptos para implantação dos novos empreendimentos.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



No caso das areias fofas, solos de baixa capacidade de suporte, a inclusão de materiais geossintéticos é uma interessante alternativa.

A fim de aumentar a capacidade de carga em fundações diretas, os geossintéticos são introduzidos no solo em uma ou mais camadas do solo da fundação.

Vertematti (2004) comenta que o uso de geossintéticos como reforço de fundações ainda não é prática usual. Diversos estudos vêm mostrando um significativo ganho de desempenho em relação às fundações diretas convencionais.

Segundo Vertematti (2004) e Fabrin (1999), são evidentes os benefícios dos efeitos com a inclusão de um reforço geossintético.

Essa temática vem sendo estudada desde a década de 1980, porém, as fundações apoiadas em solos com geossintéticos necessita de mais pesquisas teóricas e experimentais.

O trabalho visa apresentar o comportamento de um solo arenoso fofo, com carregamento vertical num estado plano de deformação e inclusão de reforço em geotêxtil tecido, além de pesquisar uma disposição geométrica de posicionamento do reforço que apresente uma melhor reposta.

2 Métodos e Materiais

2.1 Materiais

2.1.1 Tanque

A premissa foi modelar uma sapata corrida no estado plano de deformações (modelo físico). Sadoglu et al. (2009), explicam que são necessárias duas condições para atingir o estado plano de deformações:

Imposição de deformação longitudinal do sistema nula implicando rigidez suficiente dos planos frontais e traseiros do modelo e atrito zero entre as faces e o solo.

Características do tanque:

Dimensões internas: 964 mm de comprimento, 202 mm de largura e 682 mm de altura.

Dimensões externas: 1000 mm de comprimento, 227 mm de largura e 700 mm de altura.

A traseira, as laterais e o fundo do tanque foram executados em madeira de compensado naval (18 mm de espessura) e a parte frontal da caixa foi executada em acrílico translúcido polido (7 mm de espessura) para a observação das deformações do material de fundação e a possível superfície de ruptura.

A configuração do tanque pode ser vista nas fotos da Figura 1.



Figura 1. Tanque de ensaio.

Todos os elementos: chapas de madeira e chapa acrílica foram parafusados. Visando obter-se a rigidez e dimensões precisas, fez-se o intertravamento das arestas da caixa com cantoneiras em metálicas.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Maiores detalhes construtivos podem ser verificados em Constancio (2010): todos os procedimentos visando garantir a rigidez, evitar flambagens, flexões e minimização de atrito garantindo assim uma situação muito próxima ao estado plano de deformações.

2.1.2 Fundação

As dimensões da placa de alumínio que simula a sapata de fundação são: 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 12,7 mm de espessura, conforme Figura 2.



Figura 2. Configuração da placa.

Maiores detalhes construtivos podem ser observados em Constancio (2010). Houve preocupação em garantir a rigidez através da espessura e atrito na base da placa através de uma mistura de areia da fundação e cola, gerando rugosidade.

Com o sistema de rebaixo na parte central e a esfera metálica de raio compatível, garantiu-se a transmissão de esforços pontuais e rotação livre da fundação.

Simons e Menzies (1981) confirmam que a profundidade de quatro vezes a largura B ($z = 4B$) numa sapata corrida, corresponde à propagação de 10% do bulbo de tensões da sapata. Fabrin (1999), alerta que há um consenso entre autores, de que o comprimento do geossintético deve ser de aproximadamente de $5B$ para uma melhor eficácia do reforço. Dessa forma ficam justificadas as geometrias dos elementos empregados.

2.1.3 Areia

Demais considerações sobre o material empregado podem ser verificadas em Constancio (2010). A distribuição granulométrica foi determinada em concordância com a NBR 7181:1984. A preparação da amostra executada segundo a NBR 6457:1986. Na Tabela 1 encontra-se o resumo das propriedades e características do material.

Tabela 1. Características da areia.

Características	Valor
<i>Unified Soil Classification System</i>	SP
D_{10}	0,11 mm
D_{30}	0,20 mm
D_{60}	0,30 mm
Coefficiente de uniformidade (C_u)	2,73
Coefficiente de curvatura (C_c)	1,21
Índice mínimo de vazios (e_{min})	0,50
Índice máximo de vazios (e_{max})	0,89
Índice de vazios no ensaio (e)	0,82
Peso específico relativo dos sólidos do solo (G)	2,65
Peso específico seco mínimo	14,04 kN/m ³
Peso específico seco máximo	17,69 kN/m ³
Peso específico da areia no ensaio	14,54 kN/m ³
Densidade relativa durante o ensaio (D_r)	16,67 %
Ângulo de atrito interno (ϕ)	30°
Classificação da areia baseada na densidade relativa	Fofa

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



De acordo com a NBR 6502:1995, trata-se de uma areia fina a média (diâmetro dos grãos variando de 0,06 a 0,60 mm).

Pesos específicos máximo, segundo a NBR 12004:1990, e mínimo, segundo a NBR 12051:1990, da areia: 17,69 e 14,04 kN/m³.

2.1.4 Sistema de carregamento

Devido à complexidade de montagem do sistema de carregamento, optou-se por ilustrar na Figura 3 todos os detalhes construtivos.



Figura 3. Sistema de carregamento.

O sistema é composto por: macaco hidráulico, pórtico de aço, piso estrutural reforçado, vigas de concreto armado de alto desempenho, anel de carga (com capacidade de 50 kN), pistão do macaco hidráulico através de uma peça usinada em aço, haste metálica, relógios comparadores analógicos de precisão de centésimo de milímetro, bases magnéticas estão afixadas em cantoneiras.

2.1.5 Geotêxtil

Na Tabela 2 encontra-se o resumo das características do geotêxtil tecido utilizado no reforço da fundação.

Tabela 2. Características do geotêxtil

Características	Valor / especificação
Tipo de geotêxtil	Tecido
Tipo de fibra	Polipropileno
Sigla	MacTex®T 200
Peso (Gramatura)	140 g/m ²
Extensão máxima	15%
Resistência à tração	24 kN/m
Resistência ao estouro	2,48 MPa
Fluxo de água	10 l/s/m ²

2.2 Métodos

Houve uma significativa preocupação em garantir a reprodutividade da porosidade do solo durante a montagem de todos os ensaios.

Para tanto, concebeu-se um detalhado procedimento de montagem, que consiste no uso de um aparato aplicador (Figura 4) que reproduzia uma chuva de areia com vazão e altura de queda controlada.

Calibrou-se a densidade do material em função da altura de queda da areia. O procedimento executivo garantia um índice de vazios de 0,82 e um peso específico de $14,54 \text{ kN/m}^3$, densidade relativa (D_r) de 16,67%, ou seja, uma areia fofa.



Figura 4. Aparato aplicador tampado e conferência da altura de queda (Constancio, 2010).

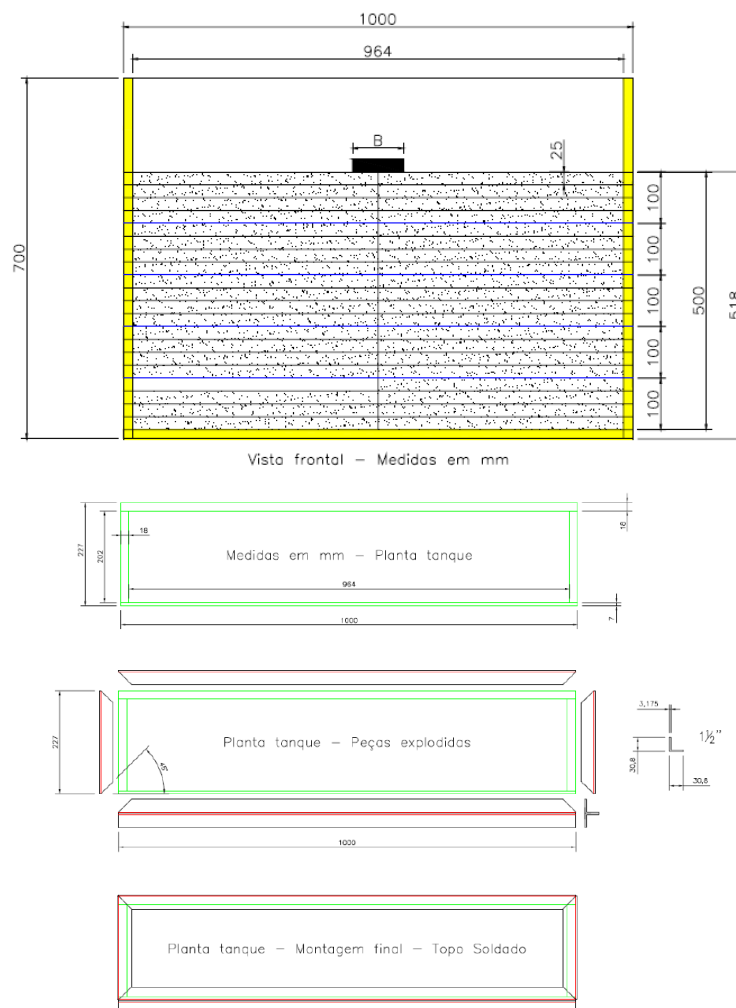


Figura 5. Geometria e disposições construtivas (Constancio, 2010).

A geometria do problema permitiu o controle executivo do processo através da verificação do volume e peso do material empregado na confecção de cada camada (Figura 5).

Na concepção do posicionamento do reforço, buscou-se uma configuração que otimiza o BCR (Bearing Capacity Ratio): razão entre as capacidades de carga do solo reforçado e do solo sem o reforço.

A configuração escolhida foi: $u = B/3$ e $l = 5B$ (onde u é a distância entre a base da fundação à primeira camada de reforço, l é o comprimento do reforço e B a largura da placa).

3 Apresentação e Análise de Resultados

Resumo do programa de ensaios:

- (a) Avaliação de um modelo sem reforço (três ensaios considerados).
- (b) Introdução de uma camada de reforço planar em geotêxtil no modelo (três ensaios considerados), com as dimensões e profundidade de posicionamento já citadas. O posicionamento do reforço foi escolhido visando gerar a maior resposta de capacidade de carga do sistema
- (c) Pesquisou-se um posicionamento geométrico diferente do reforço planar horizontal tradicional.

Avaliou-se quatro novas propostas (Figuras 6 e 7).

(c.1) A *primeira proposta* (Figura 6) avalia o reforço com uma pequena inclinação no eixo de simetria de 16,67 cm, metade do espaçamento da distância da base da fundação a profundidade de aplicação da parte horizontal do reforço. Lembrando que a altura da parte horizontal do reforço é de 3,33 cm ($B/3$) e o fim da transição da inclinação do reforço se dá a 10 cm do eixo de simetria (igual à largura da sapata).

(c.2) A *segunda proposta* (Figura 6) avalia a mesma composição anterior aplicada a uma profundidade mais próxima à superfície (2 cm).

(c.3) A *terceira proposta* (Figura 7) guarda todas as características da segunda proposta, porém com uma inclinação mais acentuada, igual a 3,33 cm ($B/3$).

(c.4) A *quarta proposta* (Figura 7) avalia uma situação bastante próxima a primeira proposta, porém, com a inclinação do reforço a um mesmo valor da profundidade da parte horizontal de 3,33 cm.

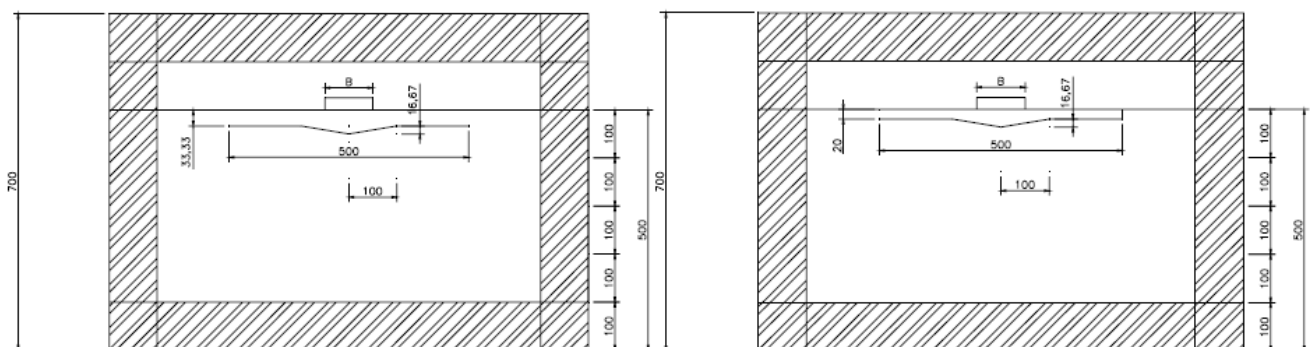


Figura 6. Propostas 1 e 2 (medidas em mm).

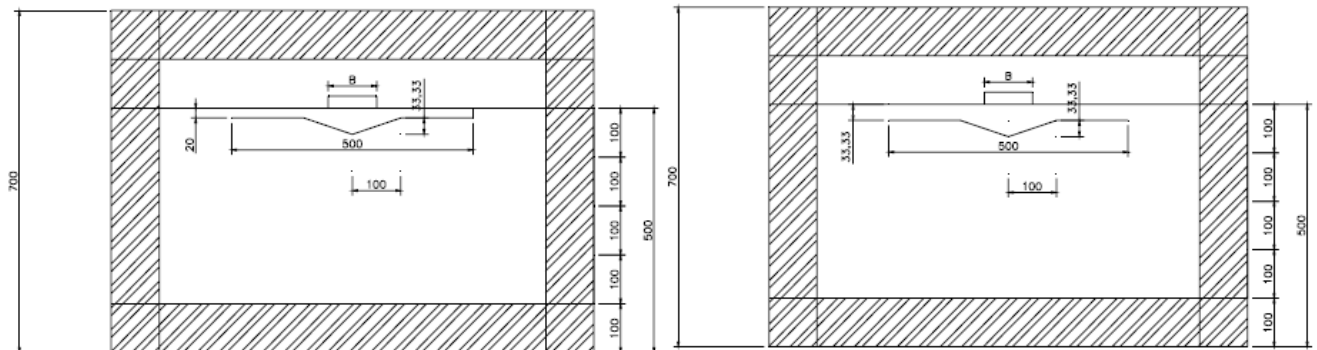


Figura 7. Propostas 3 e 4 (medidas em mm).

4 Resumo dos resultados

Aplicando o conceito do BCR (Bearing Capacity Ratio), é possível estabelecer as seguintes comparações:

Tabela 3. BCR's de todas as configurações estudadas.

s/B				
5%	10%	15%	20%	
BCR				
1,22	1,29	1,35	1,44	Reforço planar
1,23	1,33	1,40	1,53	1ª Proposta
1,12	1,23	1,34	1,47	2ª Proposta
1,52	1,48	1,57	1,74	3ª Proposta
1,79	1,71	1,82	1,98	4ª Proposta

A Tabela 03, aponta uma considerável melhoria em comparação ao reforço planar horizontal.

Em um trabalho experimental, Linhares (2013) confirmou o aumento da capacidade de carga com o uso de reforços inclinados no interior do solo (Figura 8).

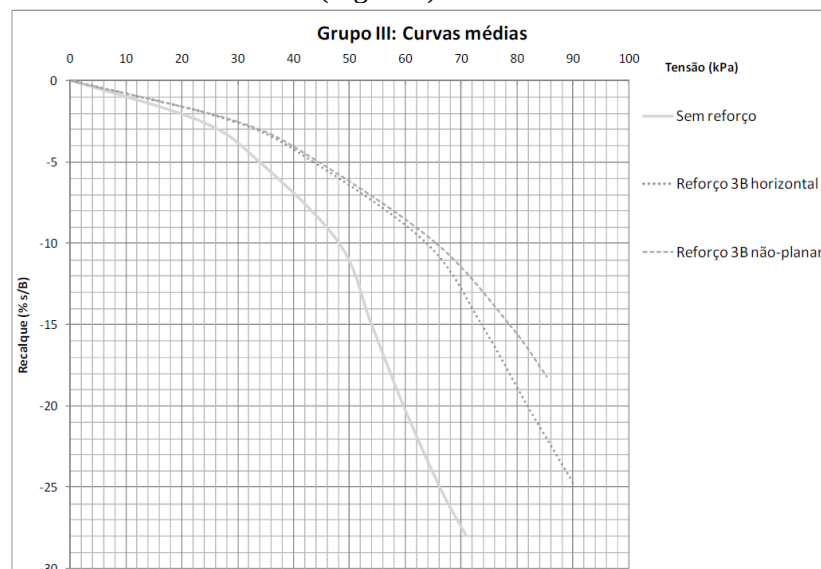


Figura 8. Curvas médias de todos os casos (Grupo III). Fonte: Linhares (2013).

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



5 Conclusões

Esse trabalho comprova que a inclusão de reforço numa areia fofa gera um aumento na capacidade de carga e atenuação de deformações. Além disso fica evidenciado que novas disposições geométricas podem melhorar ainda mais o ganho de capacidade de carga.

Os resultados experimentais apontam as seguintes conclusões:

A areia fofa sofre ruptura pelo mecanismo de puncionamento (com e sem reforços);

Uma angulação no posicionamento do geotêxtil gera uma melhora na resposta da capacidade de carga do sistema solo-reforço;

É possível, com volumes de escavação praticamente semelhantes e a mesma quantidade de material de reforço empregado, chegar a capacidades de carga superiores a configurações convencionais ótimas de reforço (planar horizontal) apenas com a readequação da geometria do posicionamento do reforço;

O caso de reforço planar horizontal na profundidade ótima B/3, apresentou um BCR (Bearing Capacity Ratio) da ordem de 1,29, para a areia em estudo (s/B = 10%);

Para grandes deslocamentos, a partir de $s/B \geq 15\%$, a melhora na capacidade de carga e atenuação de deformações fica ainda mais evidente, ou seja, o BCR (Bearing Capacity Ratio) fica maior com o aumento da deformação do sistema;

O BCR, para o caso com reforço não planar (*quarta proposta*), chegou a um valor de 1,98 para deformações (s/B) da ordem de 20%, 1,82 para deformações da ordem de 15% e a 1,71 para deformações da ordem de 10%. Tal posicionamento geométrico foi o que gerou os maiores índices de BCR do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6502 - *Rochas e solos*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). NBR 6457. *Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7181. *Solo: Análise granulométrica*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). NBR 12004. *Solo: Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). NBR 12051. *Solo: Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos*, Rio de Janeiro.
- Constancio, L. A. (2010) *Capacidade de Carga de um Modelo de Fundação Superficial em Solo Arenoso Fofo com Reforço de Geotêxtil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas – Campinas, 180 p.
- Fabrin, T. W. (1999) *O uso de geossintéticos no reforço de fundações – aplicação ao caso de tubulações enterradas*. Tese de mestrado, ITA - São José dos Campos, 219 p.
- Linhares, R. M. (2013) *Uso de Reforço em Geotêxtil com Posicionamento Não-Planar para Fundação Superficial em Solo Arenoso Fofo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas – Campinas, 132 p.
- Sadoglu, E.; Cure, E.; Moroglu, B.; Uzuner, B. A. (2009) Ultimate loads for eccentrically loaded model shallow strip footings on geotextile-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 27, Issue 3, June 2009, p. 176-182.
- Simons, N. E.; Menzies, K. E. (1981) *Introdução à Engenharia de Fundações*. Tradução do inglês (edição de 1977). Rio de Janeiro: Interciência. 199 p.
- Vertematti, J. C. (2004) *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. São Paulo: Edgard Blücher.