



Franciele Braga Machado Tullio
(Organizadora)

Enfoques e Possibilidades para a Engenharia Geotécnica



Franciele Braga Machado Tullio
(Organizadora)

Enfoques e Possibilidades para a Engenharia Geotécnica

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Natália Sandrini
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Faria – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie di Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E56	<p>Enfoques e possibilidades para a engenharia geotécnica [recurso eletrônico] / Organizadora Franciele Braga Machado Tullio. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-85-7247-746-8 DOI 10.22533/at.ed.468190611</p> <p>1. Geologia de engenharia. 2. Mecânica do solo. I. Tullio, Franciele Braga Machado.</p> <p style="text-align: right;">CDD 624.15136</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.arenaeditora.com.br
contato@arenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Enfoques e Possibilidades para a Engenharia Geotécnica” contempla onze capítulos em que os autores abordam as mais recentes pesquisas relacionadas as possibilidades de materiais e metodologias aplicadas na área de geotecnia.

A Engenharia Geotécnica desempenha um papel muito importante em nossa sociedade, pois é através do estudo da ação do homem sobre o solo e rochas que torna possível a prevenção de deslizamentos, desabamentos e desmoronamentos, contenção da ocupação de encostas e gerenciamento de resíduos.

Os estudos da área de geotecnia visam a proteção da população, fazendo uso de soluções sustentáveis sem prejudicar o meio ambiente.

A adição de resíduos no solo pode viabilizar a sua utilização em subleito ou sub-base na pavimentação. Assim como a utilização de resíduos industriais em substituição ao uso de brita pode se tornar como alternativa para a confecção de misturas asfálticas onde há escassez desse material.

A engenharia geotécnica apresenta várias possibilidades de proteção de encostas, tais como: drenagem, proteção superficial, construção de muros de arrimo, retaludamento, entre outras técnicas, proporcionando segurança para diversas comunidades.

Diante do exposto, esperamos que o leitor faça bom uso dos estudos aqui apresentados, de modo que sejam subsídio para uma reflexão sobre as possibilidades que a engenharia geotécnica proporciona à sociedade, trazendo qualidade de vida e segurança, utilizando meios sustentáveis e reduzindo danos ao meio ambiente.

Franciele Braga Machado Tullio

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ATERROS LEVES SOBRE SOLOS MOLES COM UTILIZAÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) NA BR-101/PE, LOTE 6: AVALIAÇÃO DA TÉCNICA E CARACTERIZAÇÃO DO EPS QUANTO À COMPRESSÃO SIMPLES	
Fabiano Queiroz de Souza Roberto Quental Coutinho Danisete Pereira de Souza Neto	
DOI 10.22533/at.ed.4681906111	
CAPÍTULO 2	14
DOSAGENS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO SMA COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS	
André Sales Mendes Jander Joia de Figueiredo Costa Júnior Patrícia de Magalhães Aragão Valença Consuelo Alves da Frota	
DOI 10.22533/at.ed.4681906112	
CAPÍTULO 3	26
ESTUDO DA VIABILIDADE TECNOLÓGICA DO EMPREGO DA CAL EM UM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO	
Vitor Reinaldo Bordignon Rogério Francisco Kuster Puppi Ronaldo Luiz dos Santos Izzo Amanda Dalla Rosa Johann	
DOI 10.22533/at.ed.4681906113	
CAPÍTULO 4	38
MELHORAMENTO DE SOLO COM ADIÇÃO DE RESÍDUO PROCEDENTE DO CEPILHAMENTO RE PAVIMENTOS CCP	
Daniel da Silva Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.4681906114	
CAPÍTULO 5	50
USO DE DRENOS FIBROQUÍMICOS E COLUNAS DE BRITA PARA TRATAMENTO DE SOLOS MOLES NA BAIXADA DE JACAREPAGUÁ - RJ	
Fernanda Valinho Ignacio Bruno Vieira de Jesus Juliano de Lima	
DOI 10.22533/at.ed.4681906115	
CAPÍTULO 6	62
ESTUDO PARA UTILIZAÇÃO DE TUBOS GEOTÊXTIL PARA ACOMODAÇÃO DE REJEITOS E ESTÉRIL EM SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO POR BACKFILL	
Rafaela Baldí Fernandes Sander Elias Rodrigues	
DOI 10.22533/at.ed.4681906116	
CAPÍTULO 7	78
OCUPAÇÃO ANTRÓPICA DE ENCOSTAS E SUA ESTABILIZAÇÃO	
Paulo Afonso de Cerqueira Luz Alberto Alonso Lázaro	

Henrique Dinis
Kamila Rodrigues Cassares Seko
DOI 10.22533/at.ed.4681906117

CAPÍTULO 8	91
ZONEAMENTO SIMPLIFICADO DE RISCO DE DESLIZAMENTO EM ENCOSTAS NO NORDESTE DO BRASIL	
Belaniza Gaspar Santos Neta Osvaldo de Freitas Neto Erinaldo Hilario Cavalcante	
DOI 10.22533/at.ed.4681906118	
CAPÍTULO 9	105
ESTUDOS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS PARA IMPLANTAÇÃO DA BARRAGEM VENTUROSA NO ESTADO DE PERNAMBUCO	
Hosana Emilia Sarmiento Costa Leite Rafaella Teixeira Miranda Maiara de Araújo Porto Túlio Martins de Lima Natália Milhomem Balieiro	
DOI 10.22533/at.ed.4681906119	
CAPÍTULO 10	118
COMPARAÇÃO E PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (UCS) DE ROCHAS ARENÍTIAS TURBIDITICAS DAS FORMAÇÕES SANTOS, BACIA DE SANTOS, BRASIL E DA FORMAÇÃO CHICONTEPEC, BACIA DE CHICONTEPEC, MÉXICO	
Claudia Martins Bhering Dominoni Anna Laura Lopes da Silva Nunes Claudio Rabe Gilmara Alexandre Felipe da Silva Cleverson Guizan Silva	
DOI 10.22533/at.ed.46819061110	
CAPÍTULO 11	130
MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS 3D DE RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO POR ESTACAS EMBUTIDAS PARCIALMENTE EM ROCHA	
Jean Rodrigo Garcia Paulo José Rocha de Albuquerque Osvaldo de Freitas Neto Rodrigo Álvares de Araújo Melo	
DOI 10.22533/at.ed.46819061111	
CAPÍTULO 12	144
MELHORAMENTO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS E FÍSICOS DE DEPÓSITOS ALUVIONARES ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DE GEODRENOS VERTICAIS	
Rodrigo Rogério Cerqueira da Silva Bruno Pereira Casanova	
DOI 10.22533/at.ed.46819061112	
SOBRE A ORGANIZADORA	156
ÍNDICE REMISSIVO	157

MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS 3D DE RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO POR ESTACAS EMBUTIDAS PARCIALMENTE EM ROCHA

Jean Rodrigo Garcia

UFU, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

Paulo José Rocha de Albuquerque

Unicamp, Campinas, Brasil, pjra@fec.unicamp.br

Oswaldo de Freitas Neto

UFRN, Natal, Brasil, osvaldocivil@yahoo.com.br

Rodrigo Álvares de Araújo Melo

Unicamp, Campinas, Brasil, rodrigo.melomj@gmail.com

RESUMO: A estimativa do recalque em fundações estaqueadas pode ser obtida por vários métodos existentes na literatura geotécnica. Uma técnica comumente para previsão de recalques é o método do pilar equivalente, entretanto, como não considera a influência do contato do bloco com o solo, sua aplicação em radier estaqueados seria inadequada, de modo que dentre as técnicas mais comuns para previsão de recalques em raders estaqueados, pode-se citar o método do radier equivalente. Nas análises simulações do radier estaqueado deste trabalho, realizaram-se análises a partir de modelagem numérica por elementos finitos tridimensionais por meio do software LCPC-Cesar® versão 5.0. Esta ferramenta numérica permite levar em consideração, não só o comportamento elasto-plástico do solo, como também permite simular a magnitude e a quantidade de estágios dos

carregamentos realizados, além de permitir a simulação do processo de descarregamento. Desta forma, é possível realizar comparações e análises entre os resultados obtidos pelas simulações numéricas nos casos analisados. Os resultados demonstram que as fundações em radier estaqueado tendem a uniformizar os recalques, podendo assim minimizar problemas com recalque diferencial em estruturas. A espessura da laje do radier estaqueado exerce influência na distribuição de carga nas estacas sob o radier, quando este é apoiado somente em solo. O embutimento das estacas do radier em rocha permitiu que a distribuição de carga no topo das estacas apresentasse o mesmo comportamento entre outras estacas do radier, independente da espessura da laje do radier.

PALAVRAS-CHAVE: Radier Estaqueado; Análise Numérica; Estacas; Embutimento Em Rocha.

3D FINITE ELEMENTS MODELING OF PILED RAFT WITH PILES PARTIALLY EMBEDDED IN ROCK

ABSTRACT: Estimation of settlement in piled foundations can be obtained by various methods in the geotechnical literature. A commonly used technique for prediction of settlement is the equivalent pillar method, however, as it does

not consider the influence of block contact with the ground, its application in piled raft would be inadequate, so that among the most common techniques for prediction of settlement in piled raft, one could be cited is the equivalent raft method. The analyzes were performed by numerical modeling by numerical modeling by three-dimensional finite elements using the LCPC-Cesar® version 5.0 software. This numerical tool allows not only the elasto-plastic soil behavior, but also simulates the magnitude and loading stages performed, as well as the simulation of the unloading process. Thus, it is possible to make comparisons and analyzes between the results obtained by numerical simulations and the real cases. The results have shown that piled raft foundations tend to standardize the settlement, minimizing problems with differential displacement in structures. The thickness of the piled raft slab influences the load distribution in the piles under the raft when it is supported only on soil. The piles embedded in rock showed the same load-distribution behavior comparing with other piles of the raft, regardless of the slab thickness.

KEYWORDS: Piled Raft; Numerical Analysis; Piles; Embedded in Rock.

1 | INTRODUÇÃO

O efeito do embutimento de estacas em rocha implica nos critérios de projeto e no respectivo dimensionamento geotécnico e estrutural do elemento de fundação. Várias são as condicionantes que devem ser levadas em consideração no cálculo, conforme prescreve a norma brasileira ABNT NBR 6122:2010. Quando há presença de rocha, deve-se ter os parâmetros de resistência dessa rocha (RQD) e do modelo de distribuição de carga dos trechos em solo e rocha. Conseqüentemente a resistência estrutural da estaca passa a exercer maior influência no comportamento desta fundação.

Segundo Tomlinson e Woodward (2008), a profundidade que o radier estaqueado equivalente situa-se depende da natureza do perfil do solo, e varia de $2/3 L$ para grupos de estacas flutuantes e de L para grupos de estacas de ponta, em que L é o comprimento da estaca. Supõe-se que a pressão vertical é distribuída na proporção 2V: 1H. Se as estacas que suportam a carga apoiarem em rocha ou em camada muito dura, espessa o suficiente, a análise de recalque não é necessária. A transferência de carga por atrito lateral, a partir da estaca para o solo circundante, é realizada considerando-se que a carga é distribuída a partir do fuste das estacas por atrito lateral com proporção de 1H:4V.

As Figuras 1 e 2 apresentam a forma de distribuição das tensões para um grupo de estacas para duas condições diferentes características de subsolo.

Tomlinson e Woodward (2008) apresenta as premissas de funcionamento em três propostas: a) estacas suportadas predominantemente por atrito lateral. b) estacas cravadas através de argila mole, combinando atrito lateral e resistência de ponta pelo apoio no estrato de solo granular denso c) estacas suportadas na base

da extremidade em estrato rochoso. Os elementos de fundação quando embutidos em rocha, conduzem os carregamentos diretamente à região ancorada na rocha, conforme constatado por Garcia; Albuquerque; Melo (2013) e Mussara (2014).

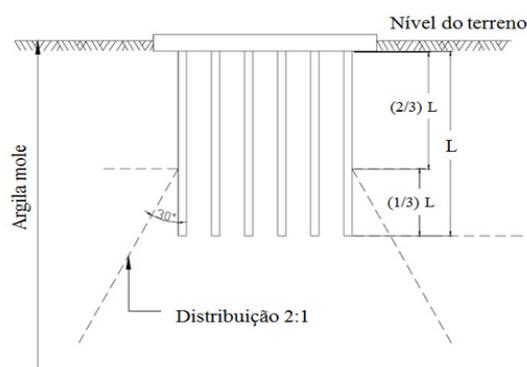


Figura 1. Solução de um grupo de estacas (SAĞLAM, 2003).

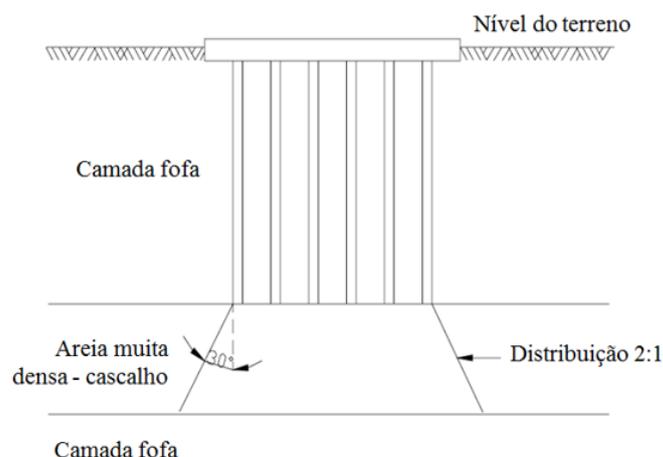


Figura 2. Solução de um grupo de estacas (SAĞLAM, 2003).

2 | FUNDAÇÕES EMBUTIDAS EM ROCHA

2.1 Estacas Embutidas Em Rocha

De acordo com Rocha (1977), a resistência uniaxial e a coesão são as características mais apropriadas para estabelecer a fronteira entre solos e rochas. Segundo este mesmo autor, o ângulo de atrito mostra-se um parâmetro pouco eficiente da distinção destes materiais, uma vez que existe uma faixa sobreposta entre valores mais elevados para os solos com os valores mais baixos para as rochas.

O limite inferior de resistência, estabelecido por uma determinada classificação não elimina a dificuldade em determinar uma fronteira nítida entre as rochas muito brandas e os solos coesivos, muito duros ou rijos, pois os materiais que se situam neste domínio de transição podem comportar-se como solos ou rochas, dependendo fundamentalmente das condições em que são aplicadas as tensões (HENCHER, 1993).

Para prever a resistência lateral de uma estaca embutida em rocha, é necessário que o modelo constitutivo de ruptura incorpore em suas análises a acoplagem entre o atrito lateral e os modelos normais de deslocamentos (PEASE; KULHAWY, 1984 e SEIDEL; HABERFIELD, 1995) e permita descrever o comportamento da resistência lateral para carregamentos iniciais até a completa mobilização, atingindo a ruptura. Os modelos requerem acurácia numérica dos parâmetros que não são avaliados na prática cotidiana da engenharia. É comum utilizar-se de parâmetros como: coesão (c), ângulo de atrito (φ) e de resistência à compressão uniaxial (q_u) de rochas, obtidos

a partir equação 1 e da tabela 1 (HORVATH; KENNEY; TROW, 1980; WILLIAMS; PELLIS, 1981; AMIR, 1986; ROWE; ARMITAGE, 1987).

$$q_{ult} = q_u = 2 \cdot c \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

Os parâmetros de tensão-deformação (E_i), para rochas foram obtidos a partir das correlações apresentadas por Hoek; Carranza; Corkum (2002) e da resistência à compressão uniaxial (q_u).

Propriedade da rocha			
RQD (%)	Tensão resistente uniaxial	Coesão (c)	Ângulo de atrito (φ)
0 – 70	$0,33 \cdot q_u$	$0,10 \cdot q_u$	30°
70 – 100	$(0,33-0,80) \cdot q_u$	$0,10 \cdot q_u$	$30^\circ - 60^\circ$

Tabela 1. Redução de parâmetros de força para a massa de rocha (KULHAWY; GOODMAN, 1987).

Segundo Mussara (2014), há pouca informação ou muita indefinição acerca da temática do embutimento de estacas em rocha, inclusive, Terzaghi (1942) já havia pesquisado sobre o tema. Este mesmo autor ressalta que alguns trabalhos transformaram a engenharia de fundações embutidas em rochas, como o de Hobbs (1974), Rosenberg; Journeaux (1977), Horvath; Kenney (1979), Williams (1980), Pells; Rowe; Turner (1980), Rowe; Armitage (1987) e Carter; Kulhawy (1988). Relata ainda que apesar dos avanços tecnológicos em equipamentos de escavação e investigação do subsolo, alguns itens continuam um tanto quanto problemáticos para os projetistas e construtores que optem por estacas embutidas em rocha. Segundo Gannon et al., (1999), alguns pontos fundamentais ainda têm deficiência, por exemplo:

- O controle e o estudo das formações geológicas ainda não têm a atenção necessária;
- A investigação é mais onerosa quando se utiliza ensaios mais sofisticados de campo e laboratório;
- O comportamento ainda não é, de fato, totalmente entendido;
- As propriedades podem ser substancialmente modificadas pelo método de execução das estacas.

2.1.1 Radier Estaqueado

Segundo Sales (2000), os termos “sapata estaqueada” e “radier estaqueado”, surgiram para especificar o sistema de fundação que envolve a associação de um elemento de fundação superficial (radier ou sapata), com uma estaca ou grupo de estacas, sendo ambos responsáveis pelo desempenho da fundação, tanto em termos de capacidade de carga quanto dos recalques.

Os parâmetros que influenciam no comportamento do radier estaqueado, relacionados à capacidade de carga e susceptibilidade a recalques estão relacionados não a sua geometria (radier e estacas), como também estão relacionadas ao maciço no qual as estacas do radier estão inseridas.

Tomlinson e Woodward (2008) apresenta as premissas de funcionamento em três propostas: a) estacas suportadas predominantemente por atrito lateral. b) estacas cravadas através de argila mole, combinando atrito lateral e resistência de ponta pelo apoio no estrato de solo granular denso c) estacas suportadas na base da extremidade em estrato rochoso. Este mesmo autor, apresenta um método de cálculo para radier equivalente, conforme apresentado na equação 2:

$$w = \frac{\mu_i \cdot \mu_0 \cdot q \cdot B}{E_s} \quad (2)$$

Em que: μ_i e μ_0 são coeficientes tabelados ou obtidos por ábacos; B é a largura do radier; q é a carga aplicada sobre a camada de solo e E_s é o módulo de deformabilidade do solo.

O coeficiente de Poisson é assumido como sendo igual a 0,5. Os fatores μ_i e μ_0 , que estão relacionados com a geometria do radier equivalente, a espessura da camada de solo compressível e a relação comprimento / largura da fundação radier equivalente são apresentados por Christian; Carrier (1978). No entanto, na maioria das formações naturais do solo e da rocha o módulo aumenta com a profundidade de tal forma que os cálculos para as condições baseadas em um módulo constante resultam em superestimativa do recalque. Sendo assim, é possível verificar que há a necessidade de melhor analisar as situações em que as fundações profundas em estacas se encontram embutidas parcialmente em rocha ou solo muito resistente.

3 | MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica realizada neste trabalho foi feita a partir de ¼ do problema em questão devido à simetria ao longo do eixo das estacas e do radier, resultando em um bloco retangular de seção 20 m x 20 m e com profundidade em função do comprimento embutido em rocha (Figura 3). Essas dimensões foram

atribuídas em função de testes realizados para garantir que as condições de contorno conferidas nas extremidades dos problemas, pudessem ser consideradas como indeslocáveis ou que possuísem deslocamentos muito baixos e, conseqüentemente, não poderiam exercer influência no resultado das análises. Utilizou-se um modelo elásto-plástico que varia em função das tensões aplicadas, obedecendo a um comportamento tensão vs deformação não linear. A malha de elementos finitos foi composta por elementos de formato triangular de interpolação quadrática, os quais foram extrudados a cada metro em profundidade.

As propriedades atribuídas às diferentes camadas de solo e rocha seguiram o critério de Mohr-Coulomb, ou seja, são inseridos os valores de peso específico (γ), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ), módulo de deformação (E) e coeficiente de Poisson (ν). Para os materiais de comportamento frágil (Modelo Parabólico), no caso o concreto, foram atribuídos valores de resistência à compressão (R_c), tração (R_t), peso específico, módulo de deformação e coeficiente de Poisson. Utilizou-se o software CESAR v.5 da Itech-soft nas análises numéricas aqui apresentadas.

Os parâmetros empregados nas análises numéricas para o solo e rocha são apresentados na Tabela 2. Trata-se de parâmetros médios adotados para fins de uma avaliação qualitativa, e não com o objetivo de analisar um solo específico. Na Tabela 3, apresentam-se os parâmetros utilizados para representar o concreto armado do radier e estacas.

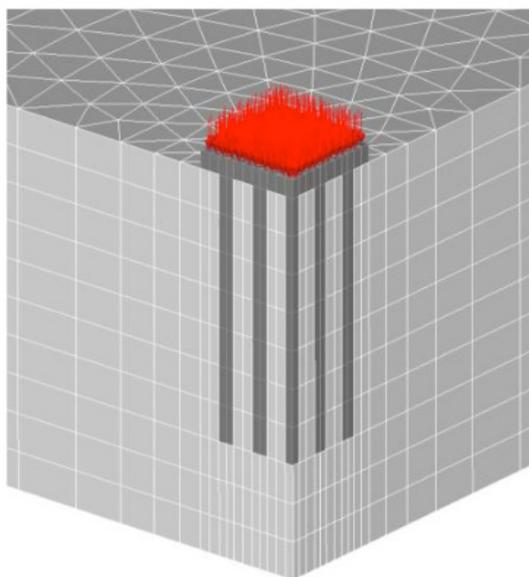


Figura 3. Modelo de análise com carregamento aplicado

Material	E	γ	c'	ϕ'	ν
Solo	16	16	20	25	0,3
Rocha	100	20	50	50	0,2

Tabela 2. Parâmetros de resistência e deformabilidade do solo e rocha.

γ : kN/m³; E: MPa; c' : kPa; ϕ' : °.

Material	E	γ	Rc	Rt	ν
Concreto	25.000	25	25	2,5	0,2

Tabela 3. Parâmetros de resistência e deformabilidade do concreto.

γ : kN/m³; E: MPa; Rc: MPa; Rt: MPa.

4 | METODOLOGIA

Foram analisados radiers estaqueados compostos por 25 estacas ($\phi=30\text{cm}$ e $L=7\text{m}$) apoiados em solo com espessuras do radier variando de 0,5 m, 1 m e 2 m. O subsolo foi simulado em duas situações, com estacas somente em solo e embutidas parcialmente de 3 m em rocha, ou seja, a partir de 4 m de profundidade até a última camada do maciço em rocha. O radier estaqueado foi submetido a carregamento uniformemente distribuído de 100 kPa, simulando um reservatório d'água sobre uma superfície, conforme ilustrado na Figura 3.

A variação da espessura do radier permitiu avaliar a influência da sua rigidez e das estacas quando apoiados diretamente no solo e em situação em que as estacas sob o radier estejam parcialmente embutidas em rocha. Na Figura 4, verificam-se as dimensões do radier estaqueado, disposição das estacas, espaçamento, espessuras radier e diâmetro das estacas.

As linhas A e B, representadas no radier em planta da Figura 4, identificam a sequência das estacas analisadas em termos de deslocamento vertical (recalque) e compressão nas direções paralela e diagonal, respectivamente.

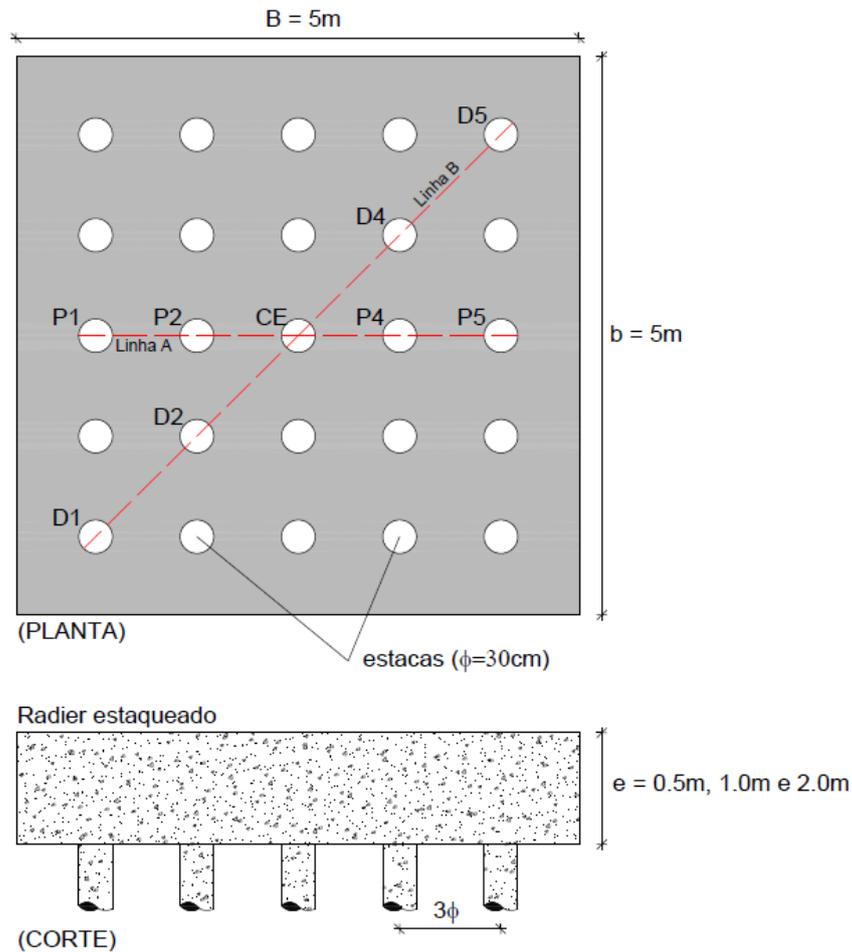


Figura 4. Características geométricas do radier estaqueado.

5 | RESULTADOS

Nas Figuras 5a e 5b é possível observar o modelo de resultado apresentado pelo software após o processamento, em termos de deslocamento e tensão, respectivamente.

Ao final das análises numéricas foram delimitados os pontos de interesse, no caso o eixo das estacas do topo até a ponta para determinação dos recalques e transferência de carga.

A partir da compilação dos resultados, verificou-se que para a situação do radier estaqueado apoiado somente em solo, as forças atuantes na linha A (paralela) varia de acordo com a rigidez do radier. Para espessura da laje do radier (e) igual a 0,5m, a estaca central (CE) foi a mais carregada, seguida das estacas P1 e P5 na borda do radier. As estacas P2 e P4 receberam cargas intermediárias entre àquelas observadas nas estacas central e de borda, evidenciando um comportamento variável ao longo da linha A, conforme observado na Figura 6. Nesta figura, verifica-se que, para as análises de radiers estaqueados com espessura maior ($e=1\text{m}$ e 2m), ou seja, mais rígidos, as estacas P1 e P5 situadas na borda do radier absorveram cargas mais elevadas em relação as estacas P2 e P4 (intermediárias) e estaca central (CE) que foi a menos carregada.

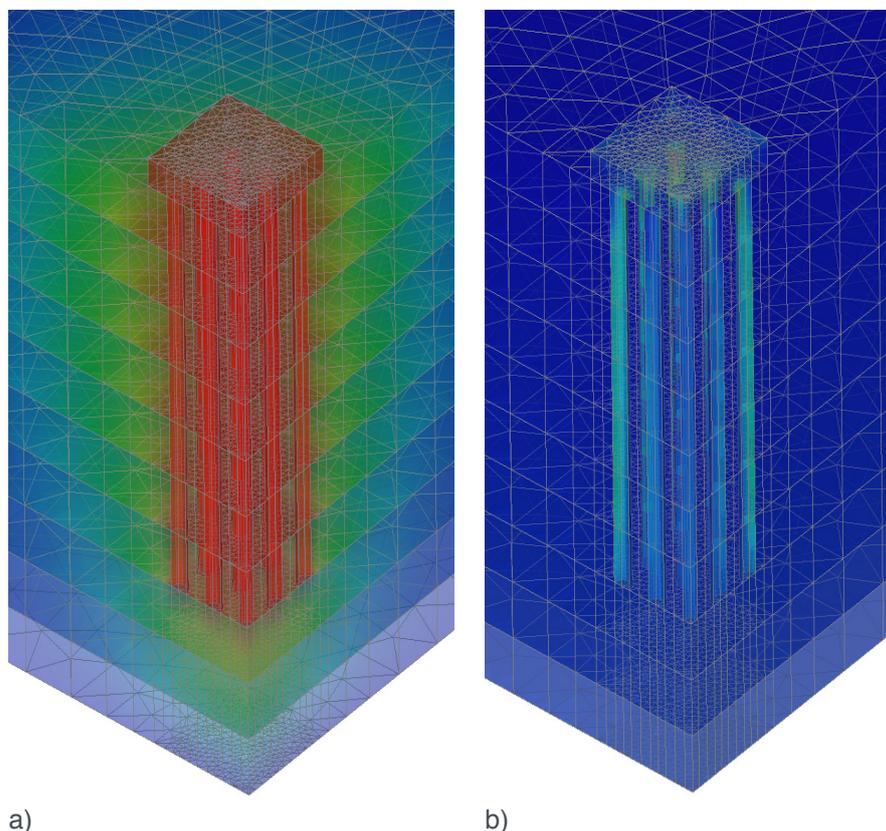


Figura 5. a) deslocamento vertical e b) compressão uniaxial.

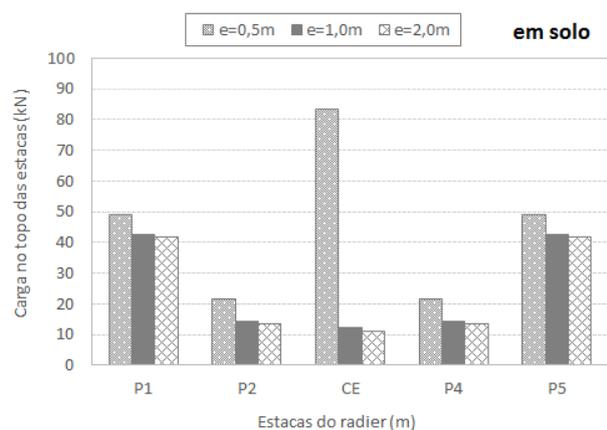


Figura 6. Distribuição de carga no topo das estacas inseridas em subsolo sem rocha (linha A).

Assim como observado na linha A (paralela), as forças atuantes na linha B (diagonal) variam de acordo com a rigidez do radier. Para espessura da laje do radier (e) igual a 0,5m, a estaca central (CE) foi a mais carregada, seguida das estacas intermediárias D2 e D4. As estacas na borda do radier, D1 e D5, receberam cargas mais baixas entre àquelas observadas na estaca central e intermediárias, evidenciando um comportamento diferente daquele observado na Linha A, conforme mostram as Figuras 6 e 7. Na Figura 7, verifica-se que o comportamento das cargas no topo das estacas para o radier de menor espessura ($e=0,5m$) é oposto aos resultados das análises de radiers estaqueados com espessura maior ($e=1m$ e $2m$), ou seja, mais rígidos. As estacas D1 e D5 situadas na borda do radier absorveram cargas mais elevadas em relação as estacas D2 e D4 (intermediárias) e estaca

central (CE) que foi a menos carregada. Constatou-se que as estacas de canto (D5) são 100% mais carregadas em relação as estacas da borda (P5).

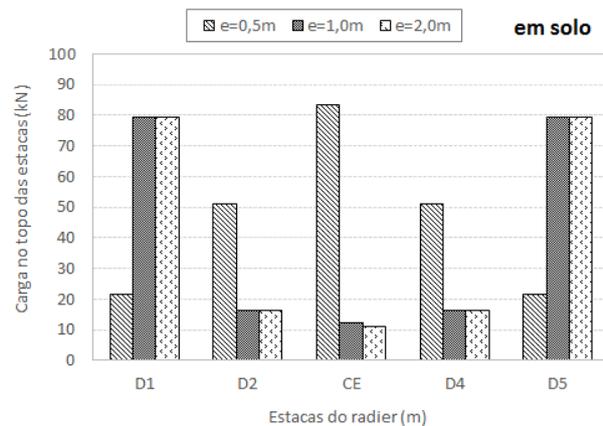


Figura 7. Distribuição de carga no topo das estacas inseridas em subsolo sem rocha (linha B).

Os recalques observados para todos os radiers estaqueados apoiados em solo, com diferentes espessuras da laje ($e=0,5\text{m}$, 1m e 2m) e carregamento de 100 kPa resultaram em média a 7 mm , conforme mostra a Figura 8. Não foram observadas mudanças de comportamento entre as estacas de centro e borda do radier nas linhas A (paralela) e B (Diagonal), conforme Figuras 8 e 9.

Nas situações analisadas com 3 m da ponta da estaca embutida em rocha, verifica-se a partir das Figuras 10 e 11, que a distribuição de carga tem mesmo comportamento entre diferentes espessuras da laje do radier estaqueado. Nota-se que o efeito do embutimento em rocha propiciou maior concentração de carga e aumento do valor máximo observado de 80 kN (somente solo) para aproximadamente 90 kN (embutido 3m em rocha), inclusive nas estacas centrais e intermediárias.

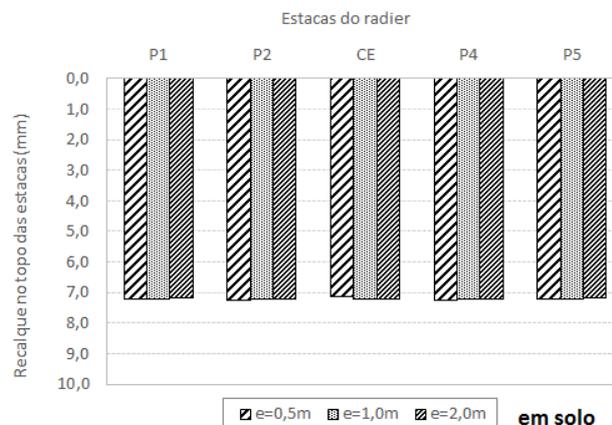


Figura 8. Distribuição do recalque no topo das estacas inseridas em subsolo sem rocha (linha A).

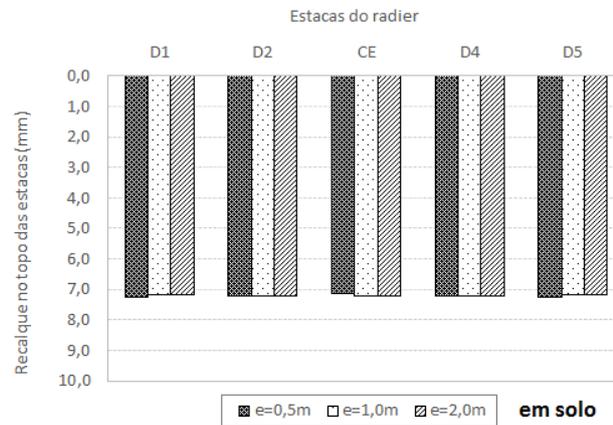


Figura 9. Distribuição do recalque no topo das estacas inseridas em subsolo sem rocha (linha B).

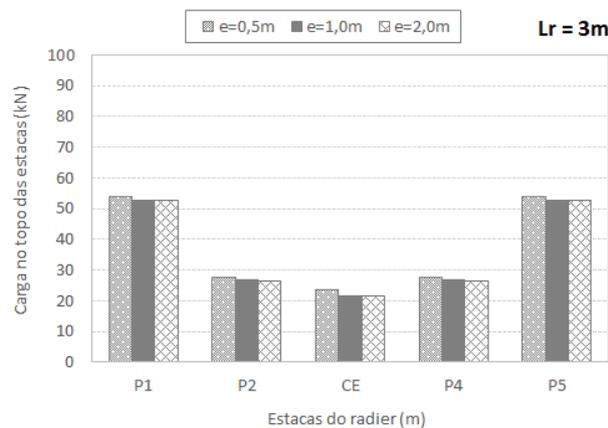


Figura 10. Distribuição de carga no topo das estacas com pontas embutidas 3m em rocha (linha A).

Assim como observado na linha A (paralela), as forças atuantes na linha B (diagonal) evidenciaram o mesmo comportamento na distribuição de cargas nas estacas, entretanto, com intensidades diferentes. Para qualquer espessura da laje do radier (e) as estacas na borda do radier, P1-D1 e P5-D5, receberam cargas mais elevadas entre àquelas observadas na estaca central e intermediárias, conforme mostram as Figuras 10 e 11. Nestas, verificam-se que mesmo o comportamento da distribuição de cargas no topo das estacas possuir a mesma tendência, as magnitudes variam, registrando que as estacas de canto são 80% mais carregadas em relação as estacas da borda. Entretanto, as estacas centrais e intermediária apresentam pequena variação.

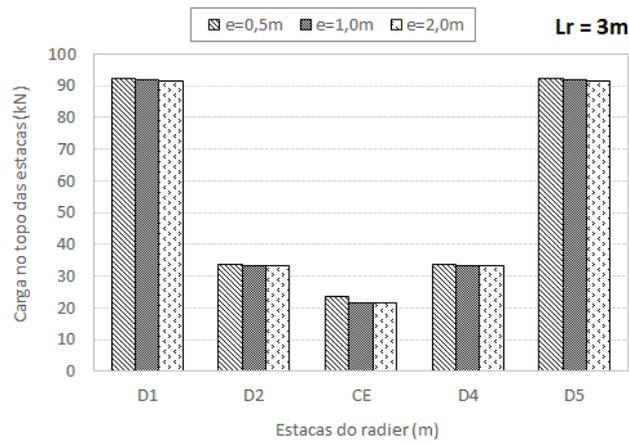


Figura 11. Distribuição de carga no topo das estacas com pontas embutidas 3m em rocha (linha B).

Os recalques observados para todos os radiers estaqueados com estacas embutidas em rocha, com diferentes espessuras da laje ($e=0,5\text{m}$, 1m e 2m) e carregamento de 100 kPa resultaram em média a $1,6\text{ mm}$, conforme mostram as Figuras 12 e 13. Avaliando estas figuras, constata-se que não foram observadas mudanças de comportamento do recalque entre as estacas de centro e borda do radier nas linhas A (paralela) e B (Diagonal). Entretanto, o embutimento em rocha reduziu os recalques absolutos.

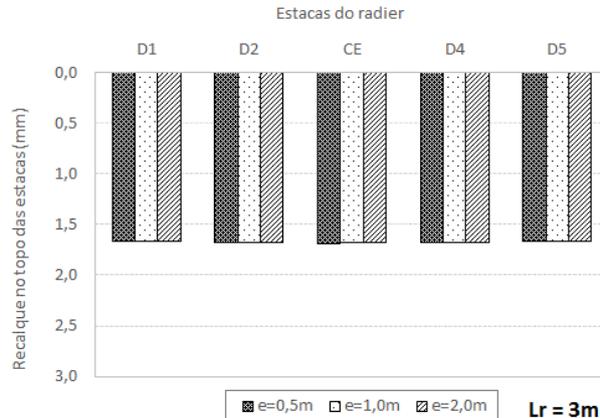


Figura 12. Distribuição de recalque no topo das estacas com pontas embutidas 3m em rocha (linha A).

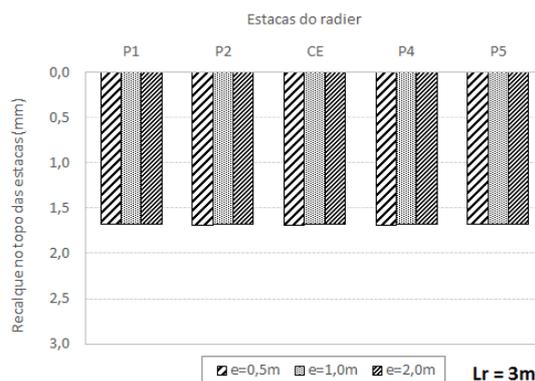


Figura 13. Distribuição de recalque no topo das estacas com pontas embutidas 3m em rocha (linha B).

6 | CONCLUSÃO

A partir das análises efetuadas é possível elencar algumas conclusões:

- As fundações em radier estaqueado tendem a uniformizar os recalques, podendo assim minimizar problemas com recalque diferencial em estruturas;
- A espessura da laje do radier estaqueado exerce influência na distribuição de carga nas estacas sob o radier, quando este é apoiado somente em solo. Para pequenas espessuras da laje do radier a distribuição de cargas no topo das estacas tende a ser variável sobrecarregando preferencialmente as estacas situadas na região central do radier. Para espessuras maiores (1m e 2m) a carga no topo das estacas tendem a ser maior naquelas situadas na região periférica do radier (borda e canto);
- O embutimento das estacas do radier em rocha permitiu que a distribuição de carga no topo das estacas apresentasse o mesmo comportamento independente da espessura da laje do radier;
- O embutimento da ponta das estacas em rocha (3m) resultou em aumento da carga no topo das estacas, notadamente naquelas do canto (D1 e D5) e borda (P1 e P5).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio concedido para aquisição do software LCPC-Cesar da Itech Software, utilizado nas análises deste artigo.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

AMIR, J. M. **Piling in Rock**. Rotterdam: Balkema, 1986.

CARTER, J. P.; KULHAWY, F. H. **Analysis and design of drilled shaft foundation socketed into rock**. New York: [s.n.].

CHRISTIAN, J. T.; CARRIER, W. D. Janbu, Bjerrum and Kjaernsli's chart reinterpreted: Reply. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 15, n. 4, p. 619–620, 1978.

GANNON, J. et al. **Piled foundations in weak rock**. London: Ciria, 1999.

GARCIA, J. R.; DE ALBUQUERQUE, P. J. R.; MELO, R. Á. A. Experimental and numerical analysis of foundation pilings partially embedded in rock. **Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 4, 2013.

HENCHER, S. R. **The Engineering Geology of Weak Rock**. 26th Annual Conference of the Engineering Group of the Geological Society. **Anais...**Leeds: 1993

HOBBS, N. **Factors affecting the prediction of settlement of structures on rock with particular reference to the Chalk and Trias**. Settlement of Structures - Conference British Geotechnical Society at Cambridge. **Anais...**London: 1974

- HOEK, E.; CARRANZA, C.; CORKUM, B. **Hoek-brown failure criterion – 2002 edition**. (5th, Ed.) Narms-Tac. **Anais...**Toronto: North American Rock Mechanics Symposium, 2002
- HORVATH, R. G.; KENNEY, T. C. **Shaft Resistance of rock-socketed drilled piers**. Symposium on Deep Foundations. **Anais...**New York: ASCE, 1979
- HORVATH, R. G.; KENNEY, T. C.; TROW, W. P. **Results of tests to determine shaft resistance of rock socketed drilled piers**. International Conference on Structural Foundations on Rock. **Anais...** Sidney: 1980
- KULHAWY, F. H.; GOODMAN, R. E. Foundation in Rock. In: **Ground Engineering Reference Book**. London: Butterworth, 1987. p. 1–55.
- MUSSARA, M. D. **Análise de comportamento de estaca barrete embutida em rocha**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.
- PEASE, K. A.; KULHAWY, F. H. **Load transfer mechanics in rock sockets and anchors**Palo AltoEletric Power Research Institute, , 1984.
- PELLS, P. J.; ROWE, R. K.; TURNER, R. M. **An experimental investigation into sideshearfor socketed piles in sandstone**. Proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock. **Anais...**Sidney: ARRB Group Limited, 1980
- ROCHA, M. **Alguns problemas relativos à Mecânica das Rochas dos Materiais de Baixa Resistência**. Lisboa: LNEC, 1977.
- ROSENBERG, P.; JOURNEAUX, N. L. Friction and end bearing tests on bedrock for high capacity socket design: Reply. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 14, n. 2, p. 272–272, 1977.
- ROWE, R. K.; ARMITAGE, H. H. Design Method for Drilled Piers in Soft Rock. **Canadian geotechnical journal**, v. 24, n. 1, p. 126–142, 1987.
- SAĞLAM, N. **SETTLEMENT OF PILED RAFTS: A CRITICAL REVIEW OF THE CASE HISTORIES AND CALCULATION METHODS**. [s.l.] THE MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2003.
- SALES, M. M. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE SAPATAS ESTAQUEADAS**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2000.
- SEIDEL, J. P.; HABERFIELD, C. M. The axial capacity of pile sockets in rocks and hard soils. **Ground Engineering**, v. 28, n. 2, p. 33–38, 1995.
- TERZAGHI, K. **Discussion on the Progress Report of the Committee on Bearing Capacity of Pile Foundation**ASCE Proceedings, 1942.
- TOMLINSON, M.; WOODWARD, J. **Pile design and construction practice**. 5. ed. London and New York: Taylor & Francis Group, 2008.
- WILLIAMS, A. F. **The Design and performance of piles socketed into weak rock**. [s.l.] Monash University, 1980.
- WILLIAMS, A. F.; PELL, S. J. N. Side resistance rock sockets in sandstone, mudstone, and shale. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 18, n. 4, p. 502–513, nov. 1981.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Análise numérica 130

Arenito 35, 37, 119, 120, 121, 122, 125, 128

Aterro 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 39, 47, 49, 50, 52, 57, 58, 59, 60, 61, 65, 66, 67, 84, 88, 145, 146, 151, 153, 154, 155

B

Backfill 62, 63, 65, 66

Barragem 66, 105, 106, 107, 108, 112, 114, 116

C

CCP 38, 39, 40, 41, 42, 48

Cepilhamento 38, 39, 41, 42, 46, 48

Colunas de brita 50, 51, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 60, 61

Compressão simples 1, 4, 7, 26, 27, 29, 30, 32, 33, 35, 36, 37, 116

D

Deslizamento 64, 79, 80, 91, 92, 93, 98, 104

Disposição de rejeitos 62, 63, 65

Drenos fibroquímicos 50, 51, 52, 53, 55, 57, 58, 59

E

Embutimento em rocha 139, 141

Encostas urbanas 91

Ensaio 1, 7, 9, 13, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 56, 60, 64, 73, 105, 106, 107, 108, 109, 113, 114, 115, 116, 118, 120, 121, 122, 124, 125, 128, 133, 145, 148, 149, 150, 151, 152, 154

Estabilização 4, 26, 27, 36, 37, 38, 39, 46, 48, 52, 58, 59, 68, 76, 78, 83, 84, 85, 144, 150

Estabilização de encostas 78, 83, 85

Estacas 86, 87, 88, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142

F

Formação Chicontepec 119, 120, 121

Formação Santos 119, 121, 122, 123, 124, 126, 127, 128

I

Implantação 3, 39, 52, 57, 59, 60, 74, 75, 76, 85, 91, 93, 105, 112, 155

Investigações geológicas-geotécnicas 105

M

Material pétreo 14, 116

Mistura asfáltica 14, 20

O

Ocupação antrópica de encostas 78

P

Pavimentação 5, 26, 27, 30, 32, 35, 36, 37, 58, 59, 155

Poliestireno expandido (EPS) 1, 2

R

Radier estaqueado 130, 131, 134, 136, 137, 139, 142

Recalque 12, 47, 50, 51, 57, 58, 59, 130, 131, 134, 136, 139, 140, 141, 142, 148

Rejeitos de mineração 62

Reservatório arenítico turbidítico 119

Resíduo 17, 21, 22, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48

Resíduos cerâmicos 14, 16, 20, 21

Resíduos de construção e demolição 14, 16, 25

Resistência à compressão simples 26, 27, 29, 30, 33, 35, 36, 116

Resistência à compressão uniaxial 109, 118, 119, 120, 125, 128, 132, 133

Risco geológico 78, 81, 82, 83, 92, 96, 98

S

Solo 3, 5, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 64, 66, 70, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 93, 94, 105, 108, 109, 112, 113, 114, 116, 130, 131, 134, 135, 136, 137, 139, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155

Solo-cal 26, 27, 28, 29, 33, 35, 36

Solos moles 1, 2, 3, 13, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 59, 60, 61, 144, 145, 147, 148, 151, 153, 154, 155

Stone Matrix Asphalt 14, 15, 16, 25

T

Tubos de geotêxteis 62

Z

Zoneamento de risco 91, 92, 98

Agência Brasileira do ISBN

ISBN 978-85-7247-746-8



9 788572 477468