



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Ciência e Tecnologia

Faculdade de Engenharia

Rachel da Silva Azevedo

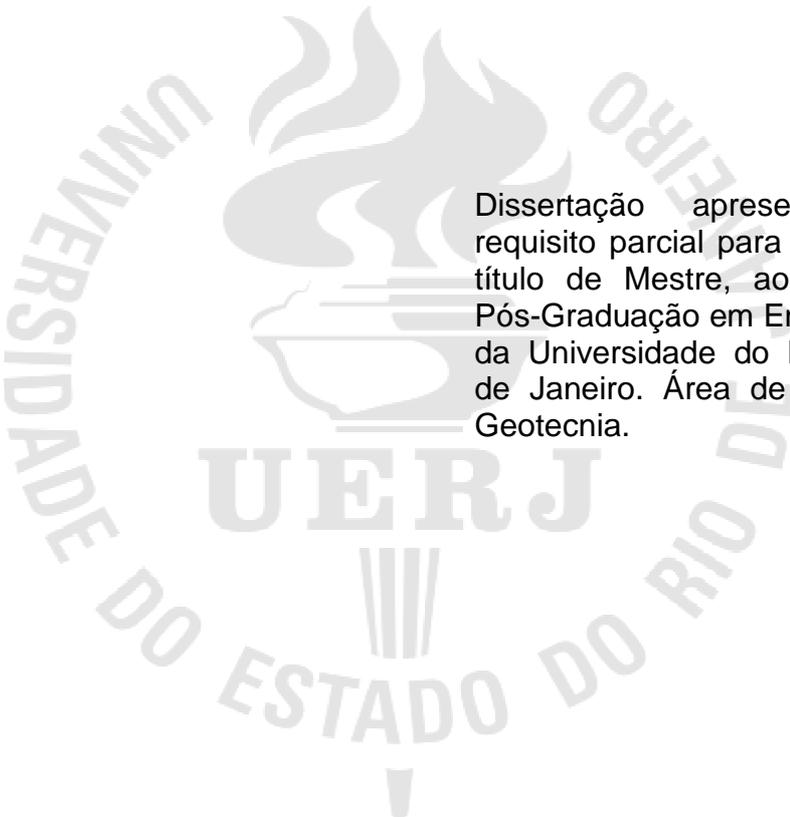
**Evolução do atrito negativo no tempo: estudo de um caso de estaca
metálica em argila muito compressível**

Rio de Janeiro

2017

Rachel da Silva Azevedo

**Evolução do atrito negativo no tempo: estudo de um caso de estaca metálica
em argila muito compressível**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadoras: Prof^a.Dr^a. Bernadete Ragoni Danziger
Prof^a.Dr^a. Denise Maria Soares Gerscovich

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

A994 Azevedo, Rachel da Silva.
Evolução do atrito negativo no tempo: estudo de um caso de estaca metálica em argila muito compressível / Rachel da Silva Azevedo. – 2017.
127f.

Orientadores: Bernadete Ragoni Danziger e Denise Maria Soares Gerscovich.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Solos argilosos - Teses. 3. Fundações (Engenharia) - Teses. 4. Estacas de aço - Teses. I. Danziger, Bernadete Ragoni. II. Gerscovich, Denise Maria Soares. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.154

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

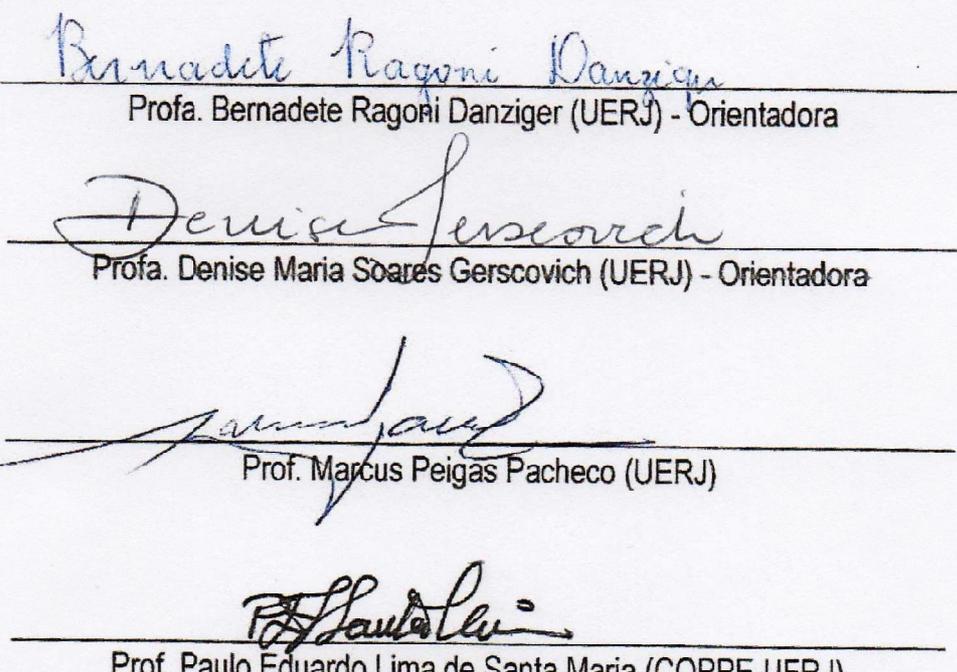
Rachel da Silva Azevedo

**Evolução do atrito negativo no tempo: estudo de um caso de estaca metálica
em argila muito compressível**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 27 de novembro de 2017

Banca Examinadora:



Prof. Bernadete Ragoni Danziger (UERJ) - Orientadora

Prof. Denise Maria Soares Gerscovich (UERJ) - Orientadora

Prof. Marcus Peigas Pacheco (UERJ)

Prof. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria (COPPE-UFRJ)

Rio de Janeiro

2017

AGRADECIMENTOS

Hoje, e sempre, procuro agradecer a Deus. Pois, a Ele que, nas horas de indecisão profunda, busco auxílio e como resposta pessoas incríveis aparecem em minha vida, acontecimentos maravilhosos ocorrem ou encontro algum livro que me passa a mensagem que preciso.

À minha mãe, primeira incentivadora, que sempre me dá amor, carinho e dedicação. Mais que mãe, ela é minha amiga, confidente e conselheira.

Ao meu pai com as incontáveis caronas até a UERJ, os incontáveis “paitrocínios” (leremos como investimentos a longo prazo), sempre atento e incentivador.

Aos meus irmãos, Ricardo e Elaine. Meu eterno “Ricaco” que, apesar de suas demonstrações de amor serem em forma de implicância, está sempre ao meu lado. Apoiando e irritando. Elaine, que sempre sabe a hora de me mandar uma mensagem motivadora quando eu menos espero, mas mais preciso.

À Bernadete e à Denise, minha admiração é tão grande que não saberia expressar, em palavras, tudo de bom que sinto quando penso nelas. Todo o carinho, a atenção, a ajuda, a amizade, o conhecimento passado, as boas conversas e as oportunidades que me forneceram. A gratidão de tê-las em minha vida é imensa.

Aos amigos: Raphael, Stephane, Karolyn e Leidi. Por escutarem sempre as lamúrias, as piadas sem graça, almoçar juntos, tomar cafezinho, chopps e coxinhas. Além, é claro, da troca saudável de provas antigas e referências bibliográficas.

À toda equipe PGECIV. À Helena que todas as vezes que mandei e-mail de “Me salva, Helena!” e ela, prontamente, me salvou. A todos os professores do PGECIV/Geotecnia, pelas aulas maravilhosas e sempre tão solícitos e acessíveis para tirar dúvidas.

A todos que conviveram comigo durante todo esse caminho e influenciaram no que sou hoje.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Ouçã o que eu digo: a gente nunca deve ter tanta certeza das coisas.

Péssimo hábito esse...

Curinga (O Dia do Curinga de Jostein Gaarder)

RESUMO

AZEVEDO, Rachel S. **Evolução do atrito negativo no tempo**: estudo de um caso de estaca metálica em argila muito compressível. 2017. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

O atrito negativo é um esforço transferido à estaca nos trechos em que o recalque do maciço de solo que a envolve é maior que o recalque da estaca. A argila encontrada na Baixada de Jacarepaguá, no Rio de Janeiro, é conhecida por ser muito mole, de peso específico bastante baixo e elevado índice de vazios. Os valores de recalques medidos nestes depósitos têm se revelado muito elevados. A disponibilidade de instrumentação de recalques de um extenso aterro em que as construções foram assentes em estacas metálicas motivou este trabalho de pesquisa. No caso em apreço são analisados os registros de execução de todas as estacas de um pequeno estaqueamento executado sob o talude de um aterro, num trecho bem caracterizado sob o ponto de vista geotécnico, e com recalques conhecidos. Conhecido o perfil de recalque medido, em algumas das verticais, foi procedida a previsão do atrito negativo em três alinhamentos de estacas sob o talude do aterro. Procurou-se proceder à estimativa do ponto neutro através da comparação entre o recalque do solo (conhecido) e o recalque da estaca (estimado). Como o recalque varia ao longo do tempo, foi feita a previsão do desenvolvimento do ponto neutro ao longo do tempo, para os três alinhamentos de estacas. O valor do atrito negativo foi também procedido ao longo do tempo, para os três alinhamentos, considerando e não considerando o efeito do adensamento secundário. Uma vez que a capacidade de carga também varia com o tempo, foi estimada e acompanhada a evolução da segurança à ruptura das estacas em relação à carga vertical de compressão ao longo do tempo. Observou-se uma diferença de comportamento entre os valores previstos para as estacas situadas sob os alinhamentos A e B, em relação àquelas situadas sob o alinhamento C. Embora não se trate de um caso com registros de atrito negativo medidos, a previsão de comportamento indicou que o ponto neutro nas estacas que atravessam camadas de argila extremamente compressíveis se localiza em cotas bem inferiores àquelas propostas nos métodos de cálculo mais empregados na prática. Como o valor do atrito negativo máximo é função da posição do ponto neutro, a avaliação do atrito negativo pelos métodos usuais, disponíveis na literatura, pode ser contra a segurança. Observou-se uma pequena influência da compressão secundária, em razão da grandeza, já bastante elevada, dos recalques por adensamento primário. Os resultados levantam discussões interessantes quanto à consideração da posição do ponto neutro, do desenvolvimento do atrito negativo com o tempo, da posição das estacas em relação ao seu alinhamento, bem como de diferentes expressões para o fator de segurança. É um assunto muito pouco estudado no Brasil, justificando pesquisas futuras, algumas das quais são propostas neste estudo.

Palavras-chave: Atrito Negativo; Ponto Neutro; Argila Mole; Solo Compressível; Fundações Profundas.

ABSTRACT

AZEVEDO, Rachel S. **Negative skin-friction evolution in time:** a case study of steel piles in a very soft compressible clay. 2017. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The negative friction is a loading transferred to the pile in the regions of pile shaft where soil settlement is greater than the pile settlement. The clay deposit found in the Jacarepaguá Lowlands, in Rio de Janeiro, is known to be very soft, with a very low unit weight and high void ratio. The soil settlement measured in these deposits are commonly very high. The present research has been motivated by the availability of the settlement instrumentation of an extensive landfill area whose constructions were founded on steel piles. In the documented case, the driving records of all the piles of a small piling situated under the slope of the embankment are analyzed. Once the measured settlement profile is known, the negative friction has been predicted for three piling alignments under the slope of the embankment. The depth of the neutral point has been estimated by the comparison of the measured soil settlement with the estimated pile settlement. As the soil and pile settlement vary with time, the prediction of the development of the neutral point with elapsed time for the three piling alignments was also made. The maximum negative friction was also estimated with elapsed time, for the three piling alignments, considering and not considering the influence of secondary settlement. As long as pile capacity also varies with time, the piling safety was also estimated during the settlement development. Differences in behavior has been observed when distinct piling alignment has been considered. Estimated values and behavior for pilings under alignments A and B were distinct from those estimated for pilings under alignments C. Although it is not an instrumented site, the estimated values indicated that the neutral point for piles driven in extremely compressible clay layers is located much lower than the depth commonly proposed by the calculation methods. Since the magnitude of the maximum negative friction is a function of the position of the neutral point, the evaluation of the negative friction by the available methods may be against safety. The influence of the secondary compression was not relevant, due to the very high magnitude of the values of consolidation settlements. The results raise interesting discussions regarding the consideration of the position of the neutral point, the development of negative friction with time, the position of the piles in relation to their alignment, as well as different expressions for the safety factor. The negative friction is an issue not thoroughly studied, mainly in Brazil, justifying future researches, some of which are proposed in this study.

Keywords: Negative Skin-Friction; Neutral Plane; Soft Clay; Deep Foundations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ocorrência do ponto neutro.....	21
Figura 2: Bloco de estacas sujeito à atrito negativo	22
Figura 3: Área e perímetro do bloco a ser considerado no método de Terzaghi e Peck (1948).....	22
Figura 4: Avaliação do atrito negativo para o grupo de estacas.....	24
Figura 5: Material amolgado ao redor do fuste.....	28
Figura 6: Estado de tensões no fuste da estaca	30
Figura 7: valores de $K\phi$ para estacas pintadas.....	32
Figura 8: Atrito negativo atuando em uma estaca.....	33
Figura 9: Decréscimo da tensão vertical por causa o atrito negativo	35
Figura 10: Johannessen e Bjerrum (1965) em a) Recalque do solo com a profundidade; b) tensões efetivas e poropressões; c) Deformação elástica (encurtamento) medida na estaca; d) Atrito negativo medido e calculado, ao longo do tempo	37
Figura 11: Bjerrum et al (1969) em a) Excesso de poropressão e tensão efetiva; b) Encurtamento da estaca com e sem tratamento com betume; c) Encurtamento medido em maio de 1967, sem e com betume; d) Atrito negativo medido e estimado	38
Figura 12: Endo et al (1969) em a) Distribuição do carregamento de atrito negativo ao longo das estacas; b) Recalque do solo e da estaca para a estaca de ponta fechada	40
Figura 13: Walker et al (1973) em a) recalque na superfície do terreno e desenvolvimento do carregamento com o tempo, a 20m de profundidade e b) carga medida na estaca sem e com betume.....	41
Figura 14: Indraratna et al (1992) em a) Distribuição do atrito negativo com a profundidade e b) Distribuição dos recalques.	42
Figura 15: Leung et al (1991), distribuição das cargas nas estacas do porto de Singapura.....	44
Figura 16: Esquema da atuação da carga móvel.....	44

Figura 17: Fellenius e Broms (1969), levantamento (valores negativos) medidos na argila próximo a estaca PII durante os 150 dias iniciais após a cravação (EOD = end of driving).....	46
Figura 18: Distribuição de carga nas estacas.....	47
Figura 19: Recalque superficial do solo <i>versus</i> raiz quadrada do tempo	49
Figura 20: Recalque da estaca e do solo	50
Figura 21: Desenvolvimento do atrito negativo com o tempo, (a) PT1; (b) PT2; (c) PC1; (d) PC2	51
Figura 22: Comparação entre os resultados medidos e aferição de β	53
Figura 23: Relação entre atrito negativo e deslocamento relativo	54
Figura 24: Critério de ruptura de Terzaghi.....	55
Figura 25: Curvas para o coeficiente α , fator de adesão.....	57
Figura 26: Mecanismo de transferência de carga em estacas	62
Figura 27: Distribuições típicas do atrito lateral.....	64
Figura 28: Localização do empreendimento e estaqueamento estudado	65
Figura 29: Localização das placas de recalque.....	67
Figura 30: Localização dos ensaios de campo de 2014.....	68
Figura 31: Resultados dos ensaios de caracterização	69
Figura 32: Variação dos parâmetros com a profundidade.....	70
Figura 33: Resistência não drenada obtidos	71
Figura 34: Esquema do estaqueamento e disposição das estacas.....	72
Figura 35: Estacas escolhidas para estudo.....	73
Figura 36: Alinhamento esquemático das estacas	74
Figura 37: Carregamento do aterro	75
Figura 38: Influência do aterro na linha A.....	76
Figura 39: Influência do aterro na linha B.....	76
Figura 40: Influência do aterro na linha C	77
Figura 41: Registro de cravação do “benchmark”	77
Figura 42: Registro de cravação estaca P1.....	78
Figura 43: Registro de cravação estaca P2.....	78
Figura 44: Comparação do atrito medido por Endo et al (1969) com o calculado por Zeevaert (1983).....	80
Figura 45: Comparação entre transferências de carga medidas por Endo et al (1969) e calculadas a partir das recomendações da API (2003)	82

Figura 46: Esquema de transferência de carga com influência de atrito negativo	88
Figura 47: Recalque do solo ao longo da profundidade; (a) com a espessura de 3,5m de argila referente à sondagem SP3; (b) com a espessura de 2,57m de argila referente à sondagem SP11.....	91
Figura 48: Recalque da estaca ao longo da profundidade; (a) estacas próximas à sondagem SP3; (b) estacas próximas à sondagem SP11	92
Figura 49: Previsão da posição do ponto neutro	93
Figura 50: Comparação entre recalque do solo e da estaca ao longo do tempo na estaca cE43.....	94
Figura 51: Recalque da estaca P1 ao longo do tempo.....	95
Figura 52: Posição do ponto neutro ao longo do tempo para espessura de argila de 3,5m	96
Figura 53: Posição do ponto neutro ao longo do tempo para espessura de argila de 2,57m	97
Figura 54: Atrito Negativo ao longo do tempo na Linha A para as estacas P1, P2, P5, P6 e P10.....	98
Figura 55: Atrito Negativo ao longo do tempo na Linha B para as estacas P11, P12 e P20.....	98
Figura 56: Atrito Negativo ao longo do tempo na Linha C para as estacas P21, P22, P25, P26 e P30.	99
Figura 57: Gráfico da comparação entre os métodos	101
Figura 58: Fator de Segurança calculado pela NBR6122/2010 ao longo do tempo	105
Figura 59: Fator de Segurança ao longo do tempo, de acordo com NBR6122/1996	107
Figura 60: Pontos coordenados estudados.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores teóricos de atrito negativo atuantes em estacas quando os valores de deslocamentos relativos são muito pequenos.....	20
Tabela 2: Valores estimados de β , sugeridos por Garlanger (1973).....	23
Tabela 3: Valores típicos de C_p	64
Tabela 4: Parâmetros geotécnicos.....	70
Tabela 5: Estacas selecionadas.....	74
Tabela 6: Valores medidos e estimados de atrito negativo máximo ($AN_{m\acute{a}x}$) do estudo de caso de Endo et al (1969).....	81
Tabela 7: Comparação da capacidade de carga inicial.....	84
Tabela 8: Cálculo do fator de correção de q_p	85
Tabela 9: Estimativas de S_u	86
Tabela 10: Comparação entre os métodos.....	101
Tabela 11: Comparação da magnitude do atrito negativo (AN) com e sem a consideração do adensamento secundário.....	102
Tabela 12: Parâmetros de projeto para solos não-coesivos.....	120
Tabela 13: Estacas da obra.....	122
Tabela 14: Comparação entre fatores de segurança ao longo do tempo.....	127

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
1.1 Avaliação do atrito negativo	18
1.2 Ponto Neutro.....	20
1.3 Métodos de Estimativa do Atrito Negativo	21
1.3.1 Método de Terzaghi e Peck (1948).....	21
1.3.2 Método de Garlanger (1973).....	23
1.3.3 Proposta de Long e Healy (1974) para a determinação do ponto neutro	25
1.3.4 Método de Endo, Minou, Kawasaki & Shibata (1969).....	26
1.3.5 Método de Zeevaert (1983)	27
1.3.6 Contribuições mais recentes.....	36
1.3.6.1 Fellenius (2006).....	36
1.3.6.2 Hong, Ng, Asce, Chen, Wang & Chan (2016)	49
1.4 Capacidade de Carga.....	55
1.4.1 Resistência Lateral	56
1.4.1.1 Soluções teóricas para resistência lateral de estacas em solos argilosos....	57
1.4.1.2 Soluções semi empíricas para resistência lateral de estacas em solos argilosos	60
1.5 Transferência de Carga	60
1.6 Recalque nas estacas.....	62
2 ESTUDO DE CASO	65
2.1 Caracterização da região em estudo	65
2.2 Estacas	72
2.3 Alinhamentos	74
2.4 Registros de cravação	77
3 PREVISÃO DE COMPORTAMENTO	79
3.1 Calibração da análise proposta	79
3.2 Previsão do atrito negativo máximo e da capacidade de carga.....	83
3.3 Previsão da transferência de carga e do atrito negativo do caso de obra em estudo	87
3.4 Previsão da posição do ponto neutro	90

4	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	94
4.1	A evolução do ponto neutro ao longo do tempo	94
4.2	A evolução da magnitude do atrito negativo ao longo do tempo	97
4.3	Comparação da magnitude de atrito negativo entre diferentes métodos.....	99
4.4	A influência da compressão secundária	102
4.5	Verificação dos fatores de segurança ao longo do tempo	103
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	108
5.1	Quanto à evolução do ponto neutro ao longo do tempo	108
5.2	Quanto à comparação da magnitude do atrito negativo entre diferentes métodos.....	108
5.3	Quanto à influência da compressão secundária	109
5.4	Quanto à verificação dos fatores de segurança ao longo do tempo	109
5.5	Sugestões para pesquisas futuras.....	109
	REFERÊNCIAS.....	111
	ANEXO A: MÉTODO TEÓRICO DESENVOLVIDO PELA API.....	118
A.	Resistência lateral e resistência de ponta em solos coesivos	118
B.	Resistencia lateral e resistência de ponta em solos não coesivos	119
	ANEXO B: INFORMAÇÕES DAS ESTACAS DA OBRA.....	122
	ANEXO C: FÓRMULA DINAMARQUESA (DANISH FORMULA)	123
	ANEXO D: FÓRMULA DA LOCALIZAÇÃO DO PONTO NEUTRO.....	124
	ANEXO E: COMPARAÇÃO ENTRE FATORES DE SEGURANÇA	127