



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciência
Faculdade de Engenharia


Danielle da Silva Arpino

**Avaliação teórica, numérica e probabilística de
fundações rasas tracionadas.**

Rio de Janeiro
2011

Danielle da Silva Arpino

**Avaliação teórica, numérica e probabilística de
fundações rasas tracionadas**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para 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.

Orientadores: Prof. Dr. Marcus Pacheco
Prof.^a Dr.^a Bernadete Ragoni Danziger

Rio de Janeiro

2011

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

A772 Arpino, Danielle da Silva
Avaliação teórica, numérica e probabilística de
fundações tracionadas. / Danielle da Silva Arpino. - 2011.
131f.

Orientadores: Marcus Pacheco. Bernadete Ragoni
Danziger
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Fundações (engenharia). I.
Pacheco, Marcus. II. Danziger, Bernadete Ragoni. III.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 624.15

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

Assinatura

Data

Danielle da Silva Arpino

Avaliação teórica, numérica e probabilística de fundações tracionadas.

Dissertação apresentada, como requisito parcial para 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: 21 de dezembro de 2011.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcus Pacheco (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof.^a Dr.^a Bernadete Ragoni Danziger (Orientadora)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof.^a Dr.^a Denise Maria Soares Gerscovich
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Aureo Pinheiro Ruffier dos Santos
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Eletrobrás - CEPTEL

Rio de Janeiro

2011

DEDICATÓRIA

Aos amigos verdadeiros que estiveram ao meu lado desde
o início dessa caminhada.

A minha carinhosa família sempre na torcida pelas minhas vitórias.
Ao meu amado esposo por mais essa etapa conquistada juntos e pelo seu olhar
doce e intenso que me transmite imenso amor.

AGRADECIMENTOS

Ao César Manoel Cruz de Almeida – gerente amigo, que contribuiu de maneira decisiva para que minha jornada acadêmica chegasse até esse ponto.

Ao Sergio Nevier Coimbra – gerente amigo, exemplo de liderança, competência e dedicação profissional inquestionáveis.

Ao mestre Marcus Pacheco – mestre e amigo, pela transmissão de conhecimento e de sua notável paixão pela engenharia.

À Bernadete Ragoni Danziger – mestre e amiga, pela sua contribuição sempre criteriosa e seu apoio especialmente na fase mais difícil do curso.

Aos mestres Ana Cristina Castro Sieira e Luciano Lima Rodrigues Ornelas – mestres e queridos amigos, fiéis incentivadores do aprendizado e da disseminação do conhecimento.

Aos amigos Carlos Alberto Ribeiro Junior e Caroline Sidrin Gomes Leite Mansur Antunes pela companhia e pelo apoio sempre bem humorado nessa fase de nossas vidas e pela presença nos melhores e nos mais difíceis momentos dessa caminhada.

RESUMO

ARPINO, Danielle da Silva. **Avaliação teórica, numérica e probabilística de fundações tracionadas**. Brasil. 2011. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

A geotecnia constitui uma disciplina relativamente recente na área da engenharia civil, e dessa disciplina faz parte um capítulo ainda menos estudado que trata de fundações submetidas a esforços de tração. O presente trabalho deriva do conjunto de provas de cargas realizado para um importante projeto de linhas de transmissão que permitiu a aferição da teoria de capacidade de carga à tração da Universidade de Grenoble, cujos estudos comparativos mostram bons resultados para fins de aplicações práticas. De posse da extensa documentação técnica produzida e documentada por esse estudo foi possível comparar os resultados obtidos pelas provas de cargas e os resultados teóricos com os resultados das modelagens 2D axisimétricas por elementos finitos. Além dessas análises, foi possível verificar a variação da resistência à tração através de análises paramétricas realizadas a partir da variação da coesão e do ângulo de atrito. Os estudos apresentados reafirmam a confiabilidade das teorias da Universidade de Grenoble, que contemplam a simplicidade desejada às aplicações de cunho prático, com resultados satisfatórios em relação àqueles obtidos nos ensaios de tração. Por outro lado, as análises paramétricas realizadas indicaram a tendência de comportamento que a resistência à tração deve apresentar para diferentes parâmetros do solo. O conhecimento dessas tendências permite ao projetista avaliar os fatores de segurança sob ponto de vista probabilístico, ou seja, permite o emprego de fatores de segurança com o conhecimento da probabilidade de ruína associada. As análises probabilísticas foram traçadas a partir do emprego de funções genéricas de várias variáveis no formato FOSM (First Order Second Moment) que fornecem soluções aproximadas para o cálculo de desvio padrão quando não existe uma amostragem representativa. Ao término das análises, obteve-se como resultado, o mapa comparativo da probabilidade de ruína para os mesmos fatores de segurança empregados com base em resistências estimadas através de diferentes métodos de cálculos (Universidade de Grenoble e modelagem computacional).

Palavras-chave: Fundações; Esforços verticais de tração; Linhas de transmissão; Análises probabilísticas.

ABSTRACT

Geotechnical engineering is a relatively recent area of civil engineering, which comprises the much less studied topic of foundations under tensile loads. Based on an extensive literature review this paper presents a set of foundation uplift tests carried out for an important transmission line project that allowed to compare the test results with the theory developed at the University of Grenoble, with fairly good results for practical purposes. The test results have also been compared to axisymmetric finite element analysis, also with satisfactory results. This study also presents parametric variations of the soil strength parameters to estimate the variation of the tensile foundation capacity based on sequentially increasing values of cohesion and friction angle. The parametric variation of the soil strength parameters was intended to provide the necessary insight to a complementary probabilistic analysis presented at the end of this dissertation. This work confirms the adequacy and simplicity of the theoretical framework developed at the University of Grenoble comparably to more refined techniques such as finite element analysis, providing a valuable tool for practical design applications. The probabilistic analysis was based on standard FOSM (First Order Second Moment¹) approximation, providing estimates of the standard deviation of the tensile foundation capacities to better understand expected variations of the foundation uplift capacity in practical problems.

Keywords: Tensioned foundations; Uplift foundation capacity; Transmission lines; Probabilistic analysis.

¹ Aproximação de primeira ordem para o segundo momento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação da superfície de ruptura real e fictícia do Método do Cone – Danziger e Pereira Pinto (1979b).....	23
Figura 2 -	Representação da superfície de ruptura do Método do Cilindro de Atrito – DANZIGER (1983).....	24
Figura 3 -	Representação da superfície de ruptura do Método de Balla - Balla (1961).....	25
Figura 4 -	Formas de ruptura para sapatas em solos resistentes (categoria 2) – Martin (1966).....	27
Figura 5 -	Arranjo geral das provas de carga (planta) – Danziger (1983).....	33
Figura 6 -	Perfis geotécnicos AA e BB – Danziger (1983).....	35
Figura 7 -	Boletim de Sondagem - SP 2 – Danziger (1983).....	36
Figura 8 -	Primeira tela de entrada de dados do Plaxis.....	44
Figura 9 -	Segunda tela de entrada de dados do Plaxis.....	45
Figura 10 -	Tabela de inserção de dados das propriedades da sapata S1 no Plaxis.....	46
Figura 11 -	Arranjo geral das provas de carga – Elevações – Danziger (1983).....	47
Figura 12 -	Tela de entrada de informações do solo – Critério de ruptura, tipo de análise e peso específico do solo.....	49
Figura 13 -	Tela de entrada de parâmetros de resistência e deformação do solo.....	50
Figura 14 -	Tela de inserção das características geométricas do sistema estrutural.....	51
Figura 15 -	Gráfico comparativo da carga de ruptura prevista pelos métodos de Grenoble e pela modelagem computacional com a carga de ruptura mensurada nas provas de carga.....	53
Figura 16 -	Tensões efetivas cisalhantes relativas – Fundação S1.....	54

Figura 17 -	Tensões efetivas cisalhantes relativas – Fundação S2.....	54
Figura 18 -	Tensões efetivas cisalhantes relativas – Fundação S3.....	55
Figura 19 -	Tensões efetivas cisalhantes relativas – Fundação S4.....	55
Figura 20 -	Deslocamentos totais – Fundação S1.....	56
Figura 21 -	Deslocamentos totais – Fundação S2.....	56
Figura 22 -	Deslocamentos totais – Fundação S3.....	57
Figura 23 -	Deslocamentos totais – Fundação S4.....	57
Figura 24 -	Pontos de plastificação e esforços de tração no solo – Fundação S1.....	58
Figura 25 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S1.....	60
Figura 26 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional em função da variação da coesão para a fundação S1.....	60
Figura 27 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S2.....	62
Figura 28 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional em função da variação da coesão para a fundação S2.....	62
Figura 29 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S3.....	64
Figura 30 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional em função da variação da coesão para a fundação S3.....	

Figura 31 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S4.....	66
Figura 32 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional em função da variação da coesão para a fundação S4.....	66
Figura 33 -	Gráfico da função densidade de probabilidade – Distribuição exponencial.....	70
Figura 34 -	Gráfico da função de distribuição acumulada – Distribuição exponencial.....	70
Figura 35 -	Gráfico da função densidade de probabilidade – Distribuição log normal.....	71
Figura 36 -	Gráfico da função de distribuição acumulada – Distribuição log normal.....	72
Figura 37 -	Gráfico da função densidade de probabilidade – Distribuição normal ou de Gauss.....	73
Figura 38 -	Probabilidade de ocorrência de um evento x – Distribuição normal.....	74
Figura 39 -	Gráfico da função de densidade de probabilidade – Distribuição normal padrão.....	75
Figura 40 -	Esquema gráfico da distribuição de probabilidade de ocorrência - Distribuição normal padrão.....	76
Figura 41 -	Demonstração gráfica do grau de assertividade do cálculo da resistência através do Método da Universidade de Grenoble.....	80
Figura 42 -	Demonstração gráfica do grau de assertividade do cálculo da resistência através do Método da Universidade de Grenoble.....	82
Figura 43 -	Curva de distribuição normal da carga atuante pelo método da Universidade de Grenoble para fundação S1.....	83
Figura 44 -	Curva de distribuição normal da carga atuante pelo método da Universidade de Grenoble para fundação S2.....	

Figura 45 -	Curva de distribuição normal da carga atuante pelo método da Universidade de Grenoble para fundação S3.....	85
Figura 46 -	Curva de distribuição normal da carga atuante pelo método da Universidade de Grenoble para fundação S4.....	86
Figura 47 -	Curva de distribuição normal da carga atuante pela modelagem computacional para fundação S1.....	87
Figura 48 -	Curva de distribuição normal da carga atuante pela modelagem computacional para fundação S2.....	88
Figura 49 -	Curva de distribuição normal da carga atuante pela modelagem computacional para fundação S3.....	89
Figura 50 -	Curva de distribuição normal da carga atuante pela modelagem computacional para fundação S4.....	90
Figura 51 -	Gráfico comparativo entre o parâmetro β obtido através do método da Universidade de Grenoble e através da modelagem computacional.....	94
Figura 52 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S1 – Descontinuidade em $\phi=15^\circ$	95
Figura 53 -	Gráfico da variação da resistência última à tração pelo método da Universidade de Grenoble em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S1 – Comportamento da função.....	96
Figura 54 -	Formas de rupturas para fundações rasas em solos fracos – Martin (1966).....	97
Figura 55 -	Formas de ruptura para sapatas em solos resistentes (categoria 2) –Martin (1966).....	98
Figura A.1 -	Coeficientes de capacidade de carga a tração M_c e $M_\phi + M_\gamma$ para $\lambda = -\phi/8$ - Martin (1966).....	113
Figura A.2 -	Coeficientes de capacidade de carga a tração M_q para $\lambda = -\phi/8$ - Martin (1966).....	

Figura A.3 -	Coeficientes de capacidade de carga a tração M_c e $M_\phi + M_\gamma$ para $\lambda = \arctg 0,2$ - Martin (1966).....	115
Figura A.4 -	Coeficientes de capacidade de carga a tração M_q para $\lambda = \arctg 0,2$ - Martin (1966).....	116
Figura A.5 -	Coeficientes de capacidade de carga a tração M_c e $M_\phi + M_\gamma$ para $\lambda = -\phi/4$ - Martin (1966).....	117
Figura A.6 -	Coeficientes de capacidade de carga a tração M_q para $\lambda = -\phi/4$ - Martin (1966).....	118
Figura A.7 -	Coeficientes de capacidade de carga a tração M_γ para $\lambda = -\phi$ - Martin (1966).....	119
Figura A.8 -	Coeficientes de capacidade de carga a tração M (sapatas circulares) - Martin (1966).....	120
Figura A.9 -	Coeficientes de capacidade de carga a tração M (sapatas não circulares) - Martin (1966).....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Tabela de resultados dos ensaios geotécnicos (amostras coletadas durante as escavações para a execução das sapatas) – Danziger (1983).....	37
Tabela 2 -	Tabela de resumo dos parâmetros geotécnicos do solo – Danziger (1983).....	38
Tabela 3 -	Módulo de Young Estimado.....	39
Tabela 4 -	Análise paramétrica da variação do módulo de Young.....	43
Tabela 5 -	Análise paramétrica da variação do coeficiente de Poisson.....	44
Tabela 6 -	Resumo das características geométricas e propriedades do material da fundação.....	48
Tabela 7 -	Capacidade de carga das fundações a partir do método da Universidade de Grenoble, prova de carga e modelagem computacional.....	53
Tabela 8 -	Tabela com cargas de ruptura pelos métodos da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional no software Plaxis para fundação S1.....	59
Tabela 9 -	Tabela com cargas de ruptura pelos métodos da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional no software Plaxis para fundação S2.....	61
Tabela 10 -	Tabela com cargas de ruptura pelos métodos da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional no software Plaxis para fundação S3.....	63
Tabela 11 -	Tabela com cargas de ruptura pelos métodos da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional no software Plaxis para fundação S4.....	65
Tabela 12 -	Tabela 10 da escala subjetiva MIL – STD – 882 – Ocorrência de ruptura ou fator de confiabilidade.....	77
Tabela 13 -	Variação da coesão para as fundações de S1 a S4.....	78
Tabela 14 -	Variação do ângulo de atrito para as fundações de S1 a S4.....	79

Tabela 15 -	Coeficientes de variação e erros associados ao cálculo da capacidade de carga das fundações S1 a S4 verificados através dos resultados obtidos pelo método da Universidade de Grenoble.....	79
Tabela 16 -	Coeficientes de variação e erros associados ao cálculo da capacidade de carga das fundações S1 a S4 verificados através dos resultados obtidos pela Modelagem Computacional 2-D.....	81
Tabela 17 -	Análise probabilística para fundação S1 através dos resultados obtidos pela aplicação do método da Universidade de Grenoble para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	83
Tabela 18 -	Análise probabilística para fundação S2 através dos resultados obtidos pela aplicação do método da Universidade de Grenoble para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	84
Tabela 19 -	Análise probabilística para fundação S3 através dos resultados obtidos pela aplicação do método da Universidade de Grenoble para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	85
Tabela 20 -	Análise probabilística para fundação S4 através dos resultados obtidos pela aplicação do método da Universidade de Grenoble para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	86
Tabela 21 -	Análise probabilística para fundação S1 através dos resultados obtidos pela modelagem computacional para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	27
Tabela 22 -	Análise probabilística para fundação S2 através dos resultados obtidos pela modelagem computacional para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	88
Tabela 23 -	Análise probabilística para fundação S3 através dos resultados obtidos pela modelagem computacional para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	89
Tabela 23 -	Análise probabilística para fundação S4 através dos resultados obtidos pela modelagem computacional para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	90
Tabela 26 -	Comparação entre os resultados de Danziger (1983), Ruffier dos Santos (1985) e Arpino (2011).....	92
Tabela A.1 -	Variação de α e R_e conforme tipo de solo.....	112

Tabela A.2 -	Aplicação de FOSM para resultados do Método da Universidade de Grenoble.....	122
Tabela A.3 -	Aplicação de FOSM para resultados do Método da Universidade de Grenoble.....	123
Tabela B.1 -	Análise probabilística para fundação S1 através dos resultados obtidos pelo método da Universidade de Grenoble para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	125
Tabela B.2 -	Probabilidade de ocorrência de ruptura para diferentes cargas de ruptura pelo método da Universidade de Grenoble – Fundação S1.....	125
Tabela B.3 -	Análise probabilística para fundação S2 através dos resultados obtidos pelo método da Universidade de Grenoble para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	126
Tabela B.4 -	Probabilidade de ocorrência de ruptura para diferentes cargas de ruptura pelo método da Universidade de Grenoble – Fundação S2.....	126
Tabela B.5 -	Análise probabilística para fundação S3 através dos resultados obtidos pelo método da Universidade de Grenoble para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	127
Tabela B.6 -	Probabilidade de ocorrência de ruptura para diferentes cargas de ruptura pelo método da Universidade de Grenoble – Fundação S3.....	127
Tabela B.7 -	Análise probabilística para fundação S4 através dos resultados obtidos pelo método da Universidade de Grenoble para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	128
Tabela B.8 -	Probabilidade de ocorrência de ruptura para diferentes cargas de ruptura pelo método da Universidade de Grenoble – Fundação S4.....	128
Tabela B.9 -	Análise probabilística para fundação S1 através dos resultados obtidos pela modelagem computacional para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	129
Tabela B.10 -	Probabilidade de ocorrência de ruptura para diferentes cargas de ruptura através da modelagem computacional– Fundação S1.....	129
Tabela B.11 -	Análise probabilística para fundação S2 através dos resultados obtidos pela modelagem computacional para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	130

Tabela B.12 - Probabilidade de ocorrência de ruptura para diferentes cargas de ruptura através da modelagem computacional– Fundação S2.....	130
Tabela B.13 - Análise probabilística para fundação S3 através dos resultados obtidos pela modelagem computacional para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	131
Tabela B.14 - Probabilidade de ocorrência de ruptura para diferentes cargas de ruptura através da modelagem computacional– Fundação S3.....	131
Tabela B.15 - Análise probabilística para fundação S4 através dos resultados obtidos pela modelagem computacional para FS=1,5; FS=2,0, FS=3,0.....	132
Tabela B.16 - Probabilidade de ocorrência de ruptura para diferentes cargas de ruptura através da modelagem computacional – Fundação S4.....	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Teses brasileiras desenvolvidas visando aplicações de fundações de linhas de transmissão – Garcia (2005) - Atualizada	30
--	----

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.1	Generalidades	19
1.2	Métodos de estimativa de capacidade de carga de fundações rasas submetidas a esforços de tração	22
1.2.1	<u>Método do cone</u>	22
1.2.2	<u>Método do cilindro de atrito</u>	24
1.2.3	<u>Método de Balla</u>	24
1.2.4	<u>Método da Universidade de Grenoble</u>	25
1.2.4.1	Generalidades	25
1.2.4.2	Determinação da capacidade de carga	27
1.2.5	<u>Contribuições de autores brasileiros</u>	30
2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA ÁREA DE TESTE	32
3	APRESENTAÇÃO DAS ETAPAS DA MODELAGEM, CONSIDERAÇÕES E RESULTADOS	40
3.1	Modelo numérico – generalidades	40
3.2	Modelagem computacional	42
3.3	Apresentação dos resultados	52
4	ANÁLISES PROBABILÍSTICAS	67
4.1	Conceitos	67
4.1.1	<u>Distribuição exponencial</u>	69
4.1.2	<u>Distribuição lognormal</u>	71
4.1.3	<u>Distribuição normal ou de Gauss</u>	73
4.1.4	<u>Distribuição normal standard ou padrão</u>	74
4.1.5	<u>Ocorrência de ruína</u>	76
4.2	Desenvolvimento	77
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	91
6	SUGESTÕES DE TEMAS PARA PESQUISAS	95
	REFERÊNCIAS	99
	ANEXO A – Coeficientes do método de Grenoble	110
	APÊNDICE A – Memória de cálculo do desvio padrão	122
	APÊNDICE B – Memória de cálculo da probabilidade de ocorrência	124