

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

**PROJETO DE UMA PERFURATRIZ MULTIFUNCIONAL PARA
EXECUÇÃO DE ESTACAS E DESENVOLVIMENTO DE UM ENSAIO
DE CAMPO QUE UTILIZA O SISTEMA DE MONITORAÇÃO
ELETRÔNICA DA PERFURATRIZ**

Volume 1

Gilmar Wilian Barreto

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Doutor em Ciências, Programa de
Pós Graduação em Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Angelo Cintra

São Carlos – SP
2014

Versão corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

B273p

Barreto, Gilmar Wilian

Projeto de uma perfuratriz multifuncional para execução de estacas e desenvolvimento de um ensaio de campo que utiliza o sistema de monitoração eletrônica da perfuratriz / Gilmar Wilian Barreto; orientador José Carlos Angelo Cintra. São Carlos, 2014.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Perfuratriz. 2. Estaca. 3. Ensaio de Campo FDT. 4. Energia. 5. Princípio de Hamilton. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GILMAR WILIAN BARRETO**.

Título da Tese: "Projeto de uma perfuratriz multifuncional para execução de estacas e desenvolvimento de um ensaio de campo que utiliza o sistema de monitoração eletrônica da perfuratriz".

Data da defesa: 14/11/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **José Carlos Angelo Cintra (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Nelson Aoki**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Antonio Sergio de Pietro Damasco Penna**
(Universidade Presbiteriana Mackenzie)

APROVADO

Prof. Dr. **Paulo José Rocha de Albuquerque**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Doutor **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Quando recebemos um ensinamento devemos receber como um valioso presente e não como uma dura tarefa. Eis aqui a diferença que transcende.

Albert Einstein

*Dedico este trabalho ao meu pai Flávio (em memória), à
minha mãe Aurora, à minha esposa Cilze e aos meus filhos
Leonardo e Maria.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado forças para conseguir concluir este trabalho.

Ao Professor Dr. José Carlos A. Cintra pelo apoio, amizade, orientação, ajuda e paciência.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo pelo apoio.

Ao Professor Nelson Aoki por estar sempre disposto à troca de ideias.

Aos colegas das diversas turmas que cursei as disciplinas, com os quais tive o prazer de conviver por vários anos.

À Professora Dr^a Cristina Tsuha pela ajuda com a indicação de artigos.

Aos projetistas, mecânicos, engenheiros, técnicos, operadores, ajudantes e demais funcionários da empresa E.G.Barreto que colaboraram nas diversas etapas deste trabalho.

Ao Engenheiro Luiz Antonio Schiavon pela colaboração e apoio.

À Universidade de Campinas – UNICAMP, em especial aos Professores David de Carvalho e Paulo José Rocha de Albuquerque pela disponibilização do Campo Experimental de Fundações e Geotecnia da Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI, da Universidade de Campinas - UNICAMP para a execução dos ensaios.

Ao colega Dr. Carlos Medeiros pela ajuda através da indicação de literatura.

À PLAEGE Construtora pela ajuda e apoio.

A todos os colaboradores do departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos pelo apoio recebido, em especial à Maristela Zotesso Batissaco pela ajuda e paciência.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro dado à pesquisa.

Ao amigo engenheiro Newton Localli da GEOESP – Engenharia Geotécnica pela ajuda, apoio e incentivo.

Aos meus amigos e familiares pelo apoio e incentivo.

A todos, muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Estaca hélice contínua.....	11
2.1.1 Histórico.....	11
2.1.2 Metodologia executiva.....	12
2.1.2.1 Perfuração.....	12
2.1.2.2 Concretagem.....	12
2.1.2.3 Colocação da armadura.....	14
2.1.3 Descrição da Instrumentação.....	14
2.1.4 Generalidades sobre os equipamentos.....	15
2.1.4.1 Constituição.....	15
2.1.4.2 Comparação com processos executivos de outras estacas.....	16
2.1.4.3 Aplicações.....	17
2.1.5 Equipamentos.....	17
2.1.5.1 Equipamentos CZM.....	17
2.1.5.2 Equipamentos B.S. INDÚSTRIA.....	19
2.1.5.3 Equipamentos GEAX.....	20
2.1.5.4 Equipamentos CMV.....	21
2.1.5.5 Equipamentos SOILMEC.....	21
2.1.5.6 Equipamentos CASAGRANDE.....	23
2.1.5.7 Equipamentos LLAMADA.....	23
2.1.5.8 Equipamentos MAIT.....	25
2.1.5.9 Equipamentos TES CAR.....	25
2.1.5.10 Equipamentos BAUER.....	26
2.2 Estaca hélice segmentada.....	27

2.2.1 Histórico	27
2.2.2 Metodologia executiva	33
2.2.3 Instrumentação.....	33
2.2.4 Generalidades sobre os equipamentos	36
2.2.4.1 Constituição	36
2.2.4.2 Comparação com processos executivos de outras estacas	36
2.2.4.3 Aplicações	37
2.3 Estaca escavada	37
2.4 Estaca <i>hollow – auger</i>	42
2.5 Estaca raiz.....	45
2.5.1 Histórico	45
2.5.2 Método executivo	46
2.5.2.1 Perfuração	46
2.5.2.2 Instalação da armadura	48
2.5.2.3 Injeção da argamassa	49
2.5.2.4 Retirada do tubo de revestimento	50
2.5.3 Generalidades sobre o equipamento	51
2.5.3.1 Constituição	51
2.5.3.2 Comparação com processos executivos de outras estacas	53
2.5.3.3 Aplicações	53
2.5.4 Equipamentos	54
2.5.4.1 Equipamentos CLÓ ZIRONI.....	54
2.5.4.2 Equipamentos CZM.....	54
2.5.4.3 Equipamentos BS INDÚTRIA	55
2.5.4.4 Equipamentos CMV	56
2.5.4.5 Equipamentos SOILMEC.....	58
2.5.4.6 Equipamentos CASAGRANDE	59
2.5.4.7 Equipamentos TES CAR.....	60
2.5.4.8 Equipamentos MC DRILL TECHNOLOGY	62
2.6 Contribuições para a previsão do comportamento de estacas	62
2.7 Ensaio de campo	65
2.7.1 SPT – <i>Standard Penetration Test</i>	65
2.7.2 CPT e CPTU – <i>Cone Penetration Test</i> e <i>Piezocone Penetration Test</i>	71
2.7.3 Ensaio de palheta.....	73

2.7.4 Ensaio pressiométrico.....	75
2.7.5 Ensaio dilatométrico.....	77
2.8 Estudo dos helicoides.....	81
2.8.1 Aspectos Gerais.....	81
2.8.2 Modelos teóricos de transporte de material.....	83
2.8.3 Influência da geometria da hélice.....	94
2.8.4 Influência do processo de instalação.....	96
2.8.5 Relações entre capacidade de carga, torque e energia de instalação de estacas.....	96

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DA PERFURATRIZ

MULTIFUNCIONAL.....	103
3.1 Concepção.....	103
3.2 Perfuratriz montada.....	104
3.3 Especificações técnicas.....	111
3.4 Dimensionamento dos principais elementos da perfuratriz.....	111
3.4.1 Potência necessária.....	111
3.4.2 Mesa rotativa.....	114
3.4.2.1 Torque no motor hidráulico.....	114
3.4.2.2 Torque no eixo de saída do redutor intermediário.....	114
3.4.2.3 Torque na hélice para pressão de trabalho de 30 MPa (300 bar).....	114
3.4.2.4 Velocidade de rotação.....	115
3.4.2.5 Torques na hélice para pressões de trabalho de 20 MPa e de 25 MPa e alimentação do cabeçote rotativo com duas bombas.....	115
3.4.2.6 Velocidade de rotação.....	116
3.4.3 Guincho principal.....	116
3.4.3.1 Velocidade de rotação do motor hidráulico.....	116
3.4.3.2 Velocidade de rotação do tambor.....	117
3.4.3.3 Velocidade do cabo.....	117
3.4.3.4 Velocidade máxima de extração da hélice.....	118
3.4.3.5 Força de extração da hélice.....	118
3.4.4 Guincho auxiliar.....	119
3.4.4.1 Velocidade de rotação do motor hidráulico.....	119
3.4.4.2 Velocidade de rotação do tambor.....	119
3.4.4.3 Velocidade máxima do cabo.....	119

3.4.4.4 Força no cabo	119
4. DESENVOLVIMENTO DE UM ENSAIO DE CAMPO EXECUTADO POR PERFURATRIZ MONITORADA ELETRONICAMENTE.....	123
4.1 Introdução.....	123
4.2 Concepção do instrumento e descrição do ensaio	124
4.3 Desenvolvimento teórico.....	128
4.3.1 Consideração das resistências, de ponta e por atrito lateral	128
4.3.2 Consideração da resistência por atrito lateral	138
5. ENSAIOS FDT.....	153
5.1 Introdução.....	153
5.2 Campo experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da UNICAMP.....	153
5.3 Apresentação e análise dos resultados, de atrito lateral equivalente, obtidos no Campo Experimental de Fundações UNICAMP.....	155
5.4 Comparação entre os resultados de atrito lateral e demanda de energia, obtidos através de ensaios <i>FDT</i>	184
5.5 Ajustes com provas de carga estáticas.....	188
5.6 Resultados dos ensaios de campo <i>SPT</i> , <i>FDT</i> e Prova de Carga Estática realizados no site de Igreja do Evangelho Quadrangular	190
6. CONCLUSÕES.....	199
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	204

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Fases de execução de uma estaca hélice contínua. (Brasfond, 2001)	13
Figura 2.2 Ponteira da hélice com vista da tampa. (ENGESTRAUSS, 2005)	13
Figura 2.3 Vista da ligação do mangote ao tubo central da hélice.(GEOESP, 2010)	14
Figura 2.4 Bomba de concreto montada sobre caminhão. (ENGESTRAUS, 2005).....	14
Figura 2.5 Introdução da armadura na estaca. (FHWA, 2007).....	15
Figura 2.6 Relatório final de monitoramento de uma estaca. (FUNDESP, 2001)	15
Figura 2.7 Perfuratriz CA 80 S/30 com sistema “Bottom – Drive”. (CLO ZIRONI, 2006)	18
Figura 2.8 Perfuratriz CD 30 CFA. (CLÓ ZIRONI, 2009)	19
Figura 2.9 Perfuratriz EM800EC. (CZM, 2010)	19
Figura 2.10 Perfuratriz EM800US. (CZM, 2010)	19
Figura 2.11 Perfuratriz BS CFA 1842. (BS INDÚSTRIA, 2010).....	20
Figura 2.12 Perfuratriz modelo EK90 CFA. (GEAX, 2009).....	20
Figura 2.13 Perfuratriz TH 26.(CMV, 2006)	21
Figura 2.14 Perfuratriz TH 10/25. (CMV, 2000)	21
Figura 2.15 Perfuratriz TH 26 equipada com trado curto e hastes telescópicas para execução de tubulões. (CMV, 2000)	21
Figura 2.16 Perfuratriz CM 48. (SOILMEC, 200-?)	22
Figura 2.17 Perfuratriz SR-55. (SOILMEC, 2000)	22
Figura 2.18 Perfuratriz SF-70 – Vista parcial. (SOILMEC, 2010)	22
Figura 2.19 Perfuratriz R-1240 CFA. (SOILMEC, 2005).....	22
Figura 2.20 Perfuratriz R – 622. (SOILMEC, 200-?).....	22
Figura 2.21 Perfuratriz B125. (Casagrande, 2010).....	23
Figura 2.22 Perfuratriz C800 DH. (Casagrande, 2010).....	23
Figura 2.23 Perfuratriz LLMADA modelo P – 135 – Evolution. (LLMADA, 2009).....	24
Figura 2.24 Vista da cabine da perfuratriz P – 135 – Evolution. (LLMADA, 2009).....	24
Figura 2.25 Perfuratriz LLAMADA P – 90TT. (LLAMADA,2009).....	24
Figura 2.26 Perfuratriz modelo P – 140TT. (LLMADA, 2009).....	24
Figura 2.27 Detalhe da mesa rotativa da perfuratriz P-1440T (LLMADA, 2009).....	24
Figura 2.28 Perfuratriz P – 90 TT. Vista do limpador de trado. (LLAMADA, 2009).....	24
Figura 2.29 Perfuratriz CFA 24. (MAIT, 1998)	25
Figura 2.30 Figura 2.30 Perfuratriz CF 6 CFA (TESCAR, 200-?)	25
Figura 2.31 Figura 2.31 Perfuratriz CF 10. (TESCAR, 200-?)	25

Figura 2.32 Vista geral das perfuratrizes Bauer. (BAUER MASCHNEN, 2010).....	26
Figura 2.33 Vista da perfuratriz BG 25. (BAUER MASCHINEN, 2010)	26
Figura 2.34 Vista da perfuratriz modelo BG 30. (BAUER MASCHINEN, 1994)	27
Figura 2.35 Execução de estaca próxima à divisa. (ENGESTRAUSS, 2002)	28
Figura 2.36 Vista da perfuratriz operando com dois segmentos de trados. (ENGESTRAUSS, 2002)	29
Figura 2.37 Manômetro analógico. (BARRETO, 2005)	29
Figura 2.38 Transdutor de pressão. (BARRETO, 2005)	29
Figura 2.39 Transdutor e indicador de pressão. (BARRETO, 2005)	29
Figura 2.40 Sistema hidráulico de autocarregamento (BARRETO, 2005)	29
Figura 2.41 Vista do carregamento da perfuratriz. (E.G. BARRETO, 2006)	30
Figura 2.42 Vista do equipamento modificado. Fase de escavação. (E.G. BARRETO, 2010).....	30
Figura 2.43 Vista do equipamento modificado. Fase de concretagem. (E.G. BARRETO, 2008)..	31
Figura 2.44 Perfuratriz SD 45. (MUCHETI, 2008).....	31
Figura 2.45 Equipamento para execução de estacas com trados segmentados. (FHWA - Federal Highway Administration, 2007)	32
Figura 2.46 Perfuratriz BS SFA 80. (BS Indústria de Perfuratrizes, 2008)	32
Figura 2.47 Vista do transdutor de pressão. (E.G. BARRETO, 2010).....	34
Figura 2.48 Sensor de velocidade de rotação. (E.G. BARRETO, 2010).....	34
Figura 2.49 Vista frontal do conjunto de medida de profundidade. (E.G. BARRETO, 2010) .	34
Figura 2.50 Relatório do monitoramento de uma estaca. (E.G. BARRETO, 2010)	35
Figura 2.51 Perfuratriz M 500 (E.G. Barreto, 1987)	38
Figura 2.52 Perfuratriz CD 27 (Cló Zironi, 199-?).....	39
Figura 2.53 Perfuratriz CD 17 (Cló Zironi, 199-?).....	39
Figura 2.54 Equipamento H 800 (E.G. Barreto, 1993).....	39
Figura 2.55 Perfuratriz H 800 – Posição de transporte (E.G. Barreto, 1994).....	39
Figura 2.56 H 1000 – Implantação em obra com utilização de guindaste (E.G. Barreto, 199-?) ..	39
Figura 2.57 Perfuratriz CL -07. (Cló Zironi, 199-?).....	39
Figura 2.58 Perfuratriz MH 500. (E.G. Barreto, 1996)	40
Figura 2.59 Perfuratriz HT 7 10. (E.G. Barreto, 1997)	40
Figura 2.60 Perfuratriz HC 9 18. (E.G. Barreto, 1998)	40
Figura 2.61 Perfuratriz HC 9 20. (E.G. Barreto, 1999)	40
Figura 2.62 Perfuratriz HT 9 16. (E.G. Barreto, 1999)	41
Figura 2.63 Perfuratriz HC 9 16. (E.G. Barreto, 2001)	41

Figura 2.64 Perfuratriz CD 20 P/PR. (Cló Zironi, 2002)	41
Figura 2.65 Perfuratriz CD 12. (Cló Zironi, 2002).....	41
Figura 2.66 Perfuratriz BS 1000. (BS Tubos & Bombas, 200-?).....	42
Figura 2.67 Perfuratriz BS 1200. (BS Tubos, 200-?)	42
Figura 2.68 Estaca <i>hollow-auger</i> . Wirth (19--?)	43
Figura 2.69 Equipamento sobre esteiras com trado <i>hollow-auger</i> (Cló Zironi, 199?).....	44
Figura 2.70 Perfuratriz HT 7 10 – Execução de sondagens em aterro sanitário, no município de Leme -SP. (E.G.Barreto, 2004).....	44
Figura 2.71 Sonda CME 55 que utiliza trado <i>hollow-auger</i> na execução de diversos ensaios. Alphageos (2000).....	44
Figura 2.72 Detalhe da tampa de proteção da ponta de um trado <i>hollow-auger</i> . (E.G.Barreto, 2003)	45
Figura 2.73 Posicionamento e introdução do tubo de revestimento no terreno. (EG BARRETO, 2005).....	46
Figura 2.74 Circulação de água (NEVES, BIESUZ & VENTURA, 2008)	47
Figura 2.75 Circulação de água (NEVES, BIESUZ & VENTURA, 2008)	47
Figura 2.76 Broca de três asas tipo tricone. (TECTOOLS, 200-?; EG BARRETO, 2010 e ROCKSMITH, 2011).....	47
Figura 2.77 Sapata com ponta (a) em metal duro; (b) e (c) diamantada. (SIRLEI PERFURAÇÕES, 2010).....	48
Figura 2.78 (a) martelos de fundo (E. G. BARRETO, 2010).....	48
Figura 2.78 (b) utilização do martelo de fundo <i>bit</i> de botão (LEITE; GIRARDI; SOUZA, 2007)	48
Figura 2.78 (c) bits de botão (E. G. BARRETO, 2010)	48
Figura 2.78 (d) bit de botão (LEITE; GIRARDI; SOUZA, op. cit.)	48
Figura 2.79 (a) armadura (EG BARRETO, 2007)	49
Figura 2.79 (b) colocação da armadura (NEVES, BIESUZ & VENTURA, 2008)	49
Figura 2.79 (c) armadura colocada (LEITE, GIRARDI & SOUZA, 2007)	49
Figura 2.80 Introdução do tubo de injeção. (LEITE; GIRARDI; SOUZA, 2007).....	49
Figura 2.81 Injeção da argamassa. (EG BARRETO, 2007).....	50
Figura 2.82 Extravasamento da argamassa injetada. (LEITE, GIRARDI & SOUZA, 2007) ..	50
Figura 2.83 Extração do tubo de revestimento. (NEVES, BIESUZ & VENTURA, 2008)	51
Figura 2.84 Desacoplamento do revestimento com uso de corrente. (EG BARRETO, 2007).....	51
Figura 2.85 Perfuratriz CR140. (CLÓ ZIRONI, 2006).....	54

Figura 2.86 Perfuratriz CR160. (CLÓ ZIRONI, 2006)	54
Figura 2.87 Perfuratriz MC140 em posição de transporte. (CZM, 200-?)	55
Figura 2.88 Perfuratriz MC180 em atividade com martelo de fundo. (CZM, 200-?)	55
Figura 2.89 Perfuratriz BS450. (BS INDÚSTRIA, 2008)	56
Figura 2.90 Perfuratriz BS280. (BS INDÚSTRIA, 2008)	56
Figura 2.91 Perfuratriz MK 420. (CMV, 2008)	56
Figura 2.92 Perfuratriz MK 800C. (CMV, 2008)	57
Figura 2.93 Perfuratriz MK 2000D em execução de estaca raiz. (CMV, 2008)	57
Figura 2.94 Perfuratriz MK 2000D em execução de Jet Grouting (CMV, 2008)	57
Figura 2.95 Perfuratriz MK 2000M. (CMV, 2008)	57
Figura 2.96 Perfuratriz PSM 8B. (SOILMEC, 2008)	58
Figura 2.97 Perfuratriz PSM 8B. (SOILMEC, 2008)	58
Figura 2.98 Perfuratriz SM5. (SOILMEC, 2008)	58
Figura 2.99 Perfuratriz SM5.(SOILMEC, 2008)	58
Figura 2.100 Perfuratriz M3 E. (CASAGRANDE, 2006)	59
Figura 2.101 Perfuratriz C14. (CASAGRANDE, 2006)	59
Figura 2.102 Perfuratriz C4. (CASAGRANDE, 2006)	60
Figura 2.103 Perfuratriz C8. (CASAGRANDE, 2006)	60
Figura 2.104 Perfuratriz TES20. (TESCAR, 200-?)	61
Figura 2.105 Perfuratriz TES20 Compact. (TESCAR, 200-?)	61
Figura 2.106 Perfuratriz TES40. (TESCAR, 2000)	61
Figura 2.107 Perfuratriz MDT80B. (MC DRILL TECHNOLOGY, 200-?)	62
Figura 2.108 Perfuratriz MDT 140B. (MC DRILL TECHNOLOGY, 200-?)	62
Figura 2.109 Perfuratriz MDT 180B. (MC DRILL TECHNOLOGY, 200-?)	62
Figura 2.110 Vista do equipamento para a realização de ensaios dilatométricos. Marchetti (2010)	78
Figura 2.111 Ilustração do dilatômetro. (Marchetti, 2010)	80
Figura 2.112 Vistas da lâmina dilatométrica. Marchetti (2010)	80
Figura 3.1 Perfuratriz montada para execução dos tipos de estacas que utilizam trados helicoidais	105
Figura 3.2 Vistas, frontal e lateral da perfuratriz montada para execução de estacas que utilizam helicoides	106
Figura 3.3 Perfuratriz montada para execução de estacas do tipo raiz	107
Figura 3.4 Chassi interno posicionado à esquerda do chassi externo	109

Figura 3.5 Chassi interno posicionado a direita do chassi externo.....	109
Figura 3.6 Desenho de conjunto da perfuratriz. Vista em planta	110
Figura 3.7 Perfuratriz apoiada no solo e em posição adequada para receber a prancha de carregamento sob sua estrutura.....	110
Figura 3.8 Perfuratriz apoiada no solo e com a prancha de carregamento posicionada sob sua estrutura	110
Figura 3.9 Perfuratriz apoiada na prancha de carregamento	111
Figura 4.1 Vista geral do instrumento padrão	125
Figura 4.2 Seções transversais do instrumento.....	125
Figura 4.3 Lâmina cortante (ponta)	125
Figura 4.4 Imagem do instrumento padrão em uso	125
Figura 4.5 Imagem do primeiro instrumento desenvolvido	126
Figura 4.6 Vista do instrumento para determinação de atrito lateral.....	133
Figura 4.7 Vista do instrumento montado	133
Figura 4.8 Vista da montagem do cilindro de empuxo axial.....	134
Figura 4.9 Vista do computador da perfuratriz.....	134
Figura 4.10 Curvas de rendimentos do motor hidráulico OMV 630. (Danfoss, 2012).....	147
Figura 4.11 Curva de vazão na mesa rotativa – Metodologia 1	150
Figura 4.12 Curva de vazão na mesa rotativa – Metodologia 2	151
Figura 5.1 Perfil Geológico da Região de Campinas (Zuquete, 1987).....	154
Figura 5.2 Perfil típico do subsolo do campo experimental da UNICAMP.....	155
Figura 5.3 Locação de ensaios <i>SPT</i> e <i>CPT</i> realizados por Peixoto (2001), de provas de carga estáticas realizadas por Albuquerque (2001) e ensaios <i>FDT</i>	156
Figura 5.4 Atrito lateral unitário x Profundidade – <i>FDT-1-Int=1cm</i>	159
Figura 5.5 Atrito lateral unitário x Profundidade - <i>FDT-1-Int=25 cm</i>	159
Figura 5.6 Atrito lateral unitário x Profundidade – <i>FDT-1-Int=1 m</i>	160
Figura 5.7 Atrito lateral unitário x Profundidade – <i>FDT-2-Int=1 cm</i>	162
Figura 5.8 Atrito lateral unitário x Profundidade – <i>FDT-2-Int=25 cm</i>	162
Figura 5.9 Atrito lateral unitário x Profundidade – <i>FDT-2-Int=1 m</i>	163
Figura 5.10 Atrito lateral unitário x Profundidade – <i>FDT-3-Int=1 cm</i>	168
Figura 5.11 Atrito lateral unitário x Profundidade – <i>FDT-4-Int=1 cm</i>	170
Figura 5.12 Atrito lateral unitário x Profundidade – <i>FDT-5-Int=1 cm</i>	172
Figura 5.13 Curva Atrito lateral – Profundidade – <i>FDT-6-Int=1 cm</i> com consideração dos valores máximos de atrito obtidos nos primeiros centímetros.....	174

Figura 5.14 Curva Atrito lateral – Profundidade – <i>FDT-6-Int=1</i> cm sem consideração dos valores máximos de atrito obtidos nos primeiros centímetros.....	174
Figura 5.15 Curva Atrito lateral <i>versus</i> Profundidade. <i>FDT-7-Int=1</i> cm.....	177
Figura 5.16 Curvas de Atrito lateral <i>versus</i> Profundidade para intervalos de profundidade igual a, 1cm, 25 cm e 1 m.....	177
Figura 5.17 Curva Atrito lateral <i>versus</i> Profundidade para o ensaio <i>FDT- 8</i> para intervalo de profundidade igual a 1cm	180
Figura 5.18 Curvas, Média do atrito lateral médio <i>versus</i> Profundidade para os ensaios <i>FDT-2</i> a <i>FDT-7</i> , excluindo-se o ensaio <i>FDT-6</i> , e Atrito lateral médio <i>versus</i> Profundidade para o ensaio <i>FDT-8</i>	181
Figura 5.19 Curvas de Atrito lateral <i>versus</i> Profundidade para os ensaios <i>FDT-2</i> a <i>FDT-7</i>	182
Figura 5.20 Curva de Atrito lateral <i>versus</i> Profundidade para os ensaios <i>FDT-1</i> a <i>FDT-7</i> com intervalo de aquisição de dados igual a 1m	183
Figura 5.21 Curvas de atrito lateral unitário equivalente <i>versus</i> profundidade.....	186
Figura 5.22 Curvas de demanda de energia <i>versus</i> profundidade	187
Figura 5.23 Perfil individual da sondagem <i>SPT-02</i> realizada na IEQ-Araras-SP.....	191
Figura 5.24 Vista do arranjo da prova de carga realizada na IEQ-Araras-SP.....	191
Figura 5.25 Curva carga-recalque da estaca hélice segmentada com diâmetro nominal de 35 m e comprimento de 14,08 m	192
Figura 5.26 Curva de Atrito lateral <i>versus</i> Profundidade para os ensaios <i>FDT-1</i> a <i>FDT-5</i> com intervalo de aquisição de dados igual a 1 cm e profundidades contadas a partir da cota da boca de cada furo de investigação	192
Figura 5.27 Curva de Atrito lateral <i>versus</i> Profundidade para os ensaios <i>FDT-1</i> a <i>FDT-5</i> com intervalo de aquisição de dados igual a 1 cm e profundidades contadas a partir da cota 98.38 m.....	193
Figura 5.28 Curva de Atrito lateral <i>versus</i> Profundidade para os ensaios <i>FDT-1</i> e <i>FDT-2</i> ...	194
Figura 5.29 Curva de Atrito lateral <i>versus</i> Profundidade para os ensaios <i>FDT-4</i> e <i>FDT-5</i> ...	195
Figura 5.30 Previsão de capacidade de carga com base nos resultados do ensaio <i>FDT-2</i> executado ao lado da estaca hélice segmentada ensaiada.....	195
Figura 5.31 Previsão de capacidade de carga a partir dos resultados do ensaio <i>FDT-1</i> executado a aproximadamente 10 m da estaca hélice segmentada ensaiada	196
Figura 5.32 Reta 1 da curva e curva de tendência linear, através da qual se obtém a carga por atrito lateral segundo CHIN & VAIL (1973).....	196

Figura 5.33 Reta 2 da curva e curva de tendência linear através da qual se obtém a carga de ruptura segundo CHIN & VAIL (1973)	197
Figura 5.34 Curva carga – recalque extrapolada.....	197

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Interpretação do Ensaio de Palheta para diversas hipóteses. Lund, Soares & Schnaid (1996).....	75
Tabela 3.1 Perfuratriz Multifuncional	112
Tabela 4.1 Dados gerais.....	137
Tabela 4.2 Resultados das pressões medidas.....	137
Tabela 4.3 Resultados obtidos a partir das medidas realizadas.....	138
Tabela 4.4 Velocidade de rotação, pressões nos motores e perdas de carga.....	149
Tabela 4.5 Resultados do ensaio para a determinação das vazões de óleo hidráulico na mesa rotativa.....	150
Tabela 4.6 Resultados de ensaios de vazão hidráulica com utilização de instrumento.....	150
Tabela 5.1 Ensaio <i>FDT</i> realizados em diversos Sítios.....	153
Tabela 5.2 Descrição do significado de cada coluna da tabela de resultados de ensaio <i>FDT</i>	157
Tabela 5.3 Resultados do ensaio <i>FDT-1</i>	158
Tabela 5.4 Resultados do ensaio <i>FDT-2</i>	161
Tabela 5.5 Valores obtidos para o ensaio <i>FDT-2</i> entre 6.39 m e 6.47 m.....	164
Tabela 5.6 Resultados do ensaio <i>FDT-3</i>	166
Tabela 5.7 Resultados do ensaio <i>FDT-4</i>	168
Tabela 5.8 Resultados do ensaio <i>FDT-5</i>	170
Tabela 5.9 Resultados do Ensaio <i>FDT-6</i>	172
Tabela 5.10 Resultados do ensaio <i>FDT-7</i>	175
Tabela 5.11 Resultados do ensaio <i>FDT-8</i>	178
Tabela 5.12 Coeficientes de variação para os diversos ensaios	184
Tabela 5.13 Valores de f_{sem} , v_i , n_i e W_{perf} para ensaios com 12 m de profundidade	186
Tabela 5.14 Valores de resistências das estacas, por atrito lateral, entre 0 m e 11,70 m (KN)	188
Tabela 5.15 Valores do fator G_2	189
Tabela 5.16 Valores de resistências das estacas, por atrito lateral, previstas e medidas, entre 0 m e 5,00 m (kN).....	189
Tabela 5.17 Valores de resistências das estacas, por atrito lateral, previstas e medidas, entre 0 m e 11,10 m (kN).....	189
Tabela 5.18 Valores de resistências das estacas, por atrito lateral, previstas e medidas, entre 0 m e 12,00 m (kN).....	189

Tabela 5.19 Relações entre resistências, previstas e medidas	190
Tabela 5.20 Coeficientes de variação obtidos nos ensaios SPT e FDT.....	193
Tabela 5.21 Resultados de previsões de capacidade de carga obtidos através de diversos métodos	198

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>CNPq</i>	<i>Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico</i>
<i>BNDES</i>	<i>Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social</i>
<i>IBGE</i>	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
<i>FDT</i>	<i>Full Displacement Test</i>
<i>UNICAMP</i>	<i>Universidade de Campinas</i>
<i>SPT</i>	<i>Standard Penetration Test</i>
<i>CFA</i>	<i>Continuous Flight Auger</i>
<i>EHC</i>	<i>Estaca Hélice Contínua</i>
<i>USP</i>	<i>Universidade de São Paulo</i>
<i>ABEF</i>	<i>Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia</i>
<i>NBR</i>	<i>Norma Brasileira</i>
<i>INPI</i>	<i>Instituto Nacional da Propriedade Intelectual</i>
<i>DTH</i>	<i>Down the Hole</i>
<i>NA</i>	<i>Nível de Água</i>
<i>ABMS/NRSP</i>	<i>Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Núcleo Regional de São Paulo</i>
<i>PDA</i>	<i>Pile Dynamic Analysis</i>
<i>UFRJ</i>	<i>Universidade Federal do Rio de Janeiro</i>
<i>ABGE</i>	<i>Associação Brasileira de Geologia de Engenharia</i>
<i>CPT</i>	<i>Cone Penetration Test</i>
<i>CPTU</i>	<i>Piezocone Penetration Test</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>UFRGS</i>	<i>Universidade Federal do Rio Grande do Sul</i>
<i>LVDT</i>	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
<i>SBPM</i>	<i>Pressiômetro Auto Perfurante</i>
<i>CPMT</i>	<i>Cone Pressuremeter Test</i>
<i>DMT</i>	<i>Dilatômetro de Marchetti</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{ck}	resistência característica do concreto.
E_{ts}	energia cinética total do sistema.
V	energia potencial do sistema, incluindo a energia de deformação e potencial de qualquer força externa conservativa.
W_{nc}	trabalho realizado pelas forças não conservativas atuantes no sistema, incluindo amortecimento e quaisquer forças externas arbitrárias atuantes.
δt	variação durante o intervalo de tempo indicado.
W_p	parcela do trabalho final gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante a penetração.
U	energia potencial normalizada do <i>SPT</i> (478 J).
η_s	eficiência no ensaio <i>SPT</i> .
V	energia potencial de deformação.
V_{es}	energia potencial elástica devido à deformação elástica do solo e do amostrador.
N_{spt}	resistência a Penetração.
q_c	resistência da Ponta.
f_s	atrito Lateral.
u_2	pressão neutra.
Ch	coeficiente de adensamento horizontal.
Cv	coeficiente de adensamento vertical.
Dr	densidade relativa.
Su	resistência não drenada.
ϕ	ângulo de atrito efetivo de areias.
K	coeficiente de permeabilidade.
T	torque.
n	velocidade de rotação.
nc	fator que define a configuração de tensões na superfície horizontal da palheta.
H	altura.
D	diâmetro.
τ_H	tensão de corte numa superfície horizontal.
τ_{mH}	tensão de corte máxima no perímetro da palheta.
b	razão de anisotropia.

S_{uv}	resistência não-drenada na superfície vertical.
S_{uH}	resistência não- drenada nas superfícies horizontais.
M	torque máximo medido no ensaio de palheta.
DMT	ensaio dilatométrico.
A	pressão necessária para que ocorra um deslocamento horizontal do centro da membrana de 0,05 mm ($\pm 0,02$ mm), no ensaio dilatométrico.
B	pressão de gás no interior do diafragma para um deslocamento radial da membrana de 1,10 mm ($\pm 0,03$ mm), no ensaio dilatométrico.
C	pressão interna no diafragma durante a despressurização do sistema, quando a membrana retorna ao deslocamento correspondente à pressão A, no ensaio dilatométrico.
z_m	desvio de zero do manômetro, no ensaio dilatométrico.
ΔA	pressão de gás relativa à leitura A, em calibração ao ar (correção devido à rigidez da membrana), no ensaio dilatométrico.
ΔB	pressão de gás relativa à leitura B, em calibração ao ar (correção devido à rigidez da membrana), no ensaio dilatométrico.
k_0	coeficiente de empuxo em repouso.
ϕ	ângulo de atrito interno nas areias.
OCR	razão de sobre adensamento.
v	velocidade de transporte do material.
n_i	velocidade de rotação da hélice.
p_h	passo da hélice.
A	área livre da hélice para transporte.
d	diâmetro externo da hélice.
d_0	diâmetro do tubo central da hélice.
Q_s	vazão de material (solo).
Δt	intervalo de tempo considerado.
V_d	volume de solo deslocado.
d_0	diâmetro do tubo central do trado.
v_i	velocidade de avanço da hélice.
V_c	volume de solo cortado.
V_r	volume de solo removido.
r	raio da hélice.
μ_w	coeficiente de atrito entre a hélice e a parede do furo.

w	velocidade angular da hélice.
v_0	componente vertical da velocidade da partícula
α	ângulo de inclinação da hélice.
ϕ_f	ângulo de atrito entre o solo e a superfície da chapa da hélice.
g	aceleração da gravidade.
Q	vazão.
Q_{1h}	volume de material elevado até a altura "H" em uma hora.
m	massa.
V	volume.
W	trabalho.
N	potência.
N_f	potência necessária para vencer o atrito devido ao deslizamento do solo na hélice.
R	reação normal da chapa da hélice na partícula considerada.
μ_f	coeficiente de atrito entre o material e a superfície da hélice.
v_c	velocidade da partícula sobre a linha média da hélice.
γ	densidade do material (solo) a ser elevado.
β	ângulo que define a direção do vetor velocidade da partícula em relação à horizontal.
n_k	velocidade de rotação mínima da hélice para que o material não deslize para baixo.
ϕ_w	ângulo de atrito entre o material transportado e a parede do tubo de encapsulamento da hélice.
α	ângulo de inclinação da hélice.
α_c	ângulo de inclinação da hélice na linha média da hélice.
N_w	potência total para a elevação de uma massa de solo.
Q	força axial fornecida pela perfuratriz.
P_p	resistência de ponta.
F_a	força axial gerada pela rotação da hélice.
M	torque.
E_s	energia específica de instalação da hélice.
T_i	torque de instalação da hélice.
Ω	área da seção transversal do trado.
Ac	área da seção transversal do cone.

E_c	energia específica para instalação do CPT.
v_c	velocidade de instalação do cone (20 mm/s = 72 m/h).
CPT	resistência fictícia do CPT.
F_v	força vertical atuante na hélice.
ψ	ângulo de inclinação da hélice medido no círculo correspondente à superfície onde as forças se equilibram.
λ	ângulo de atrito na interface hélice – areia.
Q_u	capacidade de carga.
γ_{ar}	peso específico da areia.
A_{sh}	área da superfície da hélice.
H_i	profundidade de instalação.
d_{eh}	deslocamento da estaca helicoidal.
F_{si}	força exercida no sentido da instalação da hélice.
R_o	raio do tubo central da hélice.
m	número total de lâminas helicoidais da estaca.
mI	número de lâminas helicoidais que atravessam trajetórias independentes.
R_m	raio da lâmina "m".
R_n	raio da lâmina "n".
t_m	espessura da chapa da hélice "m".
t_n	espessura da chapa da hélice "n".
α	razão entre o cisalhamento lateral e a resistência à penetração.
λ_{he}	comprimento efetivo da haste da estaca.
T_h	momento resistente à instalação das hélices.
T_s	momento resistente à instalação do tubo central da estaca helicoidal.
T_{hi}	momento resistente à instalação atuante na hélice "i".
i	índice de I a n .
n_h	número de hélices.
Q_u	capacidade de carga à tração da estaca metálica helicoidal.
Q_s	resistência por atrito lateral do tubo da estaca metálica helicoidal.
Q_h	parcela da capacidade de carga à tração relativa às hélices da estaca metálica helicoidal.
Q_{hi}	parcela de capacidade de carga relativa à hélice "i" da estaca metálica helicoidal.
θ	ângulo da linha correspondente à superfície da hélice com a horizontal.

δ_r	ângulo de atrito residual na interface entre a hélice e a areia envolvente.
Q_{b1}	vazão da bomba hidráulica 1.
Q_{b2}	vazão da bomba hidráulica 2.
Q_{b3}	vazão da bomba hidráulica 3.
d_{v1}	deslocamento volumétrico da bomba 1.
d_{v2}	deslocamento volumétrico da bomba 2.
d_{v3}	deslocamento volumétrico da bomba 3.
n_{md}	velocidade de rotação do motor a diesel.
P_{kW}	potência (<i>kW</i>).
p	pressão.
P_{hp}	potência (<i>hp</i>).
η_g	eficiência global do sistema hidráulico.
T_{mh}	torque no motor hidráulico.
T_{red1}	torque no redutor 1.
T_{hel}	torque na hélice.
n_{mh}	velocidade de rotação do motor hidráulico.
n_{red1}	velocidade de rotação do redutor 1.
n_{red2}	velocidade de rotação do redutor 2.
i_g	redução total.
i_{rp}	redução do redutor planetário.
i_{cr}	redução da caixa redutora.
q_{mh}	quantidade de motores hidráulicos.
dV_{mh}	deslocamento volumétrico do motor hidráulico.
n_{tg}	velocidade de rotação do tambor do guincho.
n_{mh}	velocidade de rotação do motor hidráulico.
i_{cr}	relação de transmissão do redutor do guincho.
v_c	velocidade do cabo do guincho.
D	diâmetro do tambor do guincho mais o diâmetro do cabo.
n_{tg}	velocidade de rotação do tambor do guincho.
v_{ext}	velocidade de extração da hélice.
F_{cg}	força no cabo de aço do guincho.
F_{ext}	força de extração da hélice.
T_g	torque do guincho.
R	raio considerado para o tambor do guincho.

v_i	velocidade de translação da composição de perfuração.
n_i	velocidade de rotação da composição de perfuração.
M_i	torque aplicado ao helicóide (igual ao torque no eixo de saída da mesa rotativa).
N_A	potência disponibilizada na entrada da mesa rotativa
p_A	pressão na entrada dos motores hidráulicos da mesa rotativa para movimentos simultâneos de rotação e de translação da composição de perfuração.
Q_A	vazão de óleo na entrada dos motores hidráulicos da mesa rotativa.
η_{mr}	eficiência da mesa rotativa.
F_s	soma das forças verticais secundárias atuantes na composição de hastes.
F_{pp}	peso próprio, da mesa rotativa mais composição de hastes.
F_{pull}	força axial de empuxo axial (<i>pull-down</i>).
F_{solo}	peso próprio do solo envolvido na hélice.
F_{fluid}	peso próprio de eventual fluido estabilizante.
N_S	potência disponibilizada pelas forças verticais secundárias no topo do instrumento.
N_{LR}	potência devida ao atrito por rotação.
F_{LR}	força devida ao atrito por rotação.
d_i	diâmetro externo do instrumento.
N_{LT}	potência devida ao atrito por translação.
F_{LT}	força devida ao atrito por translação.
N_{AMR}	potência devida ao atrito da mesa rotativa com os trilhos guias da torre.
F_{AMR}	força devida ao atrito da mesa rotativa com os trilhos da torre.
N_P	potência devida ao avanço da ponta do instrumento.
F_P	força de reação da ponta (carga de ruptura da ponta).
N_R	potência devida aos esforços reativos no instrumento.
p_B	pressão no sistema hidráulico para o instrumento com velocidade de rotação mantida e velocidade de translação (avanço) igual a zero.
f_s	atrito lateral unitário.
l_i	comprimento de ensaio do instrumento (comprimento útil).
μ_{mt}	coeficiente de atrito entre o material de deslizamento da mesa rotativa e o material do perfil guia da torre da perfuratriz.
l_c	distância entre os centros de aplicação das cargas normais geradas pelo torque na mesa rotativa.
Δp	diferença de pressão.

A_p	área da seção transversal da ponta do instrumento.
K_{AT}	relação entre o atrito lateral por translação e o atrito lateral por rotação.
$f_{s,R}$	resistência de atrito lateral por rotação.
$f_{s,T}$	resistência de atrito lateral por translação.
$F_{L,T}$	carga de ruptura do atrito lateral por translação.
A_p	área da ponta do instrumento.
p_{fsTqc}	pressão hidráulica no cilindro de empuxo axial (<i>pull-down</i>) devida, ao atrito lateral de translação e resistência de ponta.
p_{fsT}	pressão hidráulica no cilindro de empuxo axial (<i>pull-down</i>) devida, ao atrito lateral de translação.
p_{qc}	pressão hidráulica no cilindro de empuxo axial (<i>pull-down</i>) devida, à resistência de ponta.
A_c	área da seção transversal da camisa do cilindro de <i>pull-down</i> .
A_h	área da seção transversal da haste do cilindro de <i>pull-down</i> .
p_{fsRqc}	pressão nos motores da mesa rotativa devida, ao atrito lateral por rotação e à resistência de ponta.
p_{fsR}	pressão nos motores da mesa rotativa devida ao atrito lateral por rotação
A_L	área lateral do instrumento de ensaio.
f_{se}	Atrito lateral unitário equivalente.
p_{corr}	pressão hidráulica corrigida, nos motores hidráulicos da mesa rotativa.
p_{perdas}	pressão para acionamento da mesa rotativa e composição de perfuração.
N_v	potência total perdida.
N_o	potência de funcionamento em vazio.
N_z	potência perdida nos dentes.
N_L	potência perdida nos mancais para funcionamento com carga.
N_{oz}	potência de atrito das engrenagens.
N_{pl}	potência de agitação do lubrificante.
N_{oL}	potência nos mancais.
N_Z	potência perdida nos dentes.
N_I	potência de acionamento.
Z_I	número de dentes da engrenagem motora do redutor (pinhão).
β	ângulo de inclinação do dente.
v_t	velocidade tangencial medida no círculo do diâmetro primitivo do engrenamento.
μ_L	coeficiente de atrito dos mancais.

F_L	carga no mancal.
d_L	diâmetro do eixo do mancal.
n_L	velocidade de rotação do eixo do mancal.
η_t	rendimento da transmissão por engrenagens.
μ_d	coeficiente de atrito de deslizamento entre os dentes.
Z_2	número de dentes da engrenagem movida do redutor (coroa).
$dp_{pinhão}$	diâmetro primitivo do pinhão.
$n_{pinhão}$	velocidade de rotação do pinhão.
dp	diâmetro primitivo de uma engrenagem de dentes retos.
m	módulo do dente de uma engrenagem.
N_m	potência média.
Q_m	vazão média.
p_m	pressão média.
Q_{mh}	vazão em um motor hidráulico.
Q_b	vazão de uma bomba hidráulica.
q_{mh}	quantidade de motores hidráulicos instalados na mesa rotativa.
η_t	rendimento do engrenamento.
η_{mh}	rendimento do motor hidráulico.
$H_{óleo}$	altura do óleo em um tambor.
$V_{óleo}$	volume de óleo em um tambor.
r_L	atrito lateral unitário na estaca.
G_2	fator de correção que leva em conta os diferentes comportamentos entre o instrumento e a estaca.
Q_{medida}	vazão medida.
Q_{estim}	vazão estimada.
f_{sem}	atrito lateral unitário equivalente médio.
W_{Iv}	trabalho realizado para uma volta do instrumento de ensaio FDT.
d_{Iv}	deslocamento circular no plano horizontal, para uma volta do instrumento FDT.
t_{exec}	tempo teórico para execução de um ensaio FDT.
L_e	comprimento da perfuração no ensaio FDT.
n_v	número de voltas do instrumento para a execução de um ensaio FDT.
W_{perf}	trabalho realizado devido à rotação do instrumento no ensaio FDT.
v_{im}	velocidade média de perfuração.

n_{im}	velocidade média de rotação.
P_{lprev}	resistência prevista por atrito lateral da estaca.
P_{lmed}	resistência medida por atrito lateral da estaca.
P	carga.
ρ	recalque.
P_L	resistência por atrito lateral de um elemento isolado de fundação.
P_p	resistência de ponta de um elemento isolado de fundação.
P_r	resistência à ruptura de um elemento isolado de fundação.
c	cota.
dv_{bh}	deslocamento volumétrico de uma bomba hidráulica.
n_{md}	velocidade de rotação do motor a diesel.
t	tempo.
n_t	número total de rotações.
W_t	trabalho realizado devido à translação do instrumento FDT.
W_r	trabalho realizado devido à rotação do instrumento FDT.
F_{ct}	força normal de compressão exercida pela mesa rotativa no trilho da torre da perfuratriz.
F_{te}	força tangencial equivalente.
f_a	força de atrito.

RESUMO

Barreto, G.W. **Projeto de uma perfuratriz multifuncional para execução de estacas e desenvolvimento de um ensaio de campo que utiliza o sistema de monitoração eletrônica da perfuratriz.** 2014. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Esta tese apresenta, o projeto de uma perfuratriz que permite a execução de cinco tipos de fundação profunda, e o desenvolvimento de um ensaio de campo que possibilita avaliar as resistências por atrito lateral desenvolvidas entre o instrumento envolvido pelo solo escavado e o terreno natural. A perfuratriz foi projetada para executar estacas dos tipos hélice contínua monitorada, escavadas com trado mecânico, hélice segmentada monitorada, raiz e *hollow-auger*. As estacas dos tipos hélice contínua monitorada e as escavadas com trado mecânico são muito utilizadas no Brasil; as estacas raiz e *hollow-auger* são utilizadas em situações especiais e a estaca hélice segmentada monitorada é mais recente, mas sua aplicação tem tido um crescimento importante nos últimos dez anos. Para a perfuratriz multifuncional são apresentados cálculos e desenhos básicos dos principais conjuntos. Para a nova investigação de campo, denominada *FDT – Full Displacement Test*, é apresentado um desenvolvimento teórico com base no princípio universal da conservação de energia que, em termos práticos, resulta na obtenção da parcela de atrito lateral, denominado atrito lateral unitário equivalente (f_{se}). Os resultados obtidos a partir dos dados aquisitados pelo sistema de monitoramento eletrônico da perfuratriz apresentaram-se concordantes entre si, indicando a possibilidade de praticamente se conseguir a repetibilidade do ensaio. Entre os diversos ensaios realizados, foi dada ênfase aos ensaios realizados no campo experimental de Fundações e Geotecnia da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, da Universidade de Campinas - UNICAMP e foram feitas correlações com as resistências obtidas nas provas de carga estáticas realizadas no local por Albuquerque (2001), a partir dos ajustes feitos para o nível instrumentado na profundidade de 11,70 m para o qual foi determinado um fator (G_2), para cada tipo de estaca ensaiada (escavada, hélice contínua e ômega). A partir dos ajustes feitos para o nível 11,70 m foram feitas previsões de capacidade de carga por atrito lateral para os outros níveis instrumentados (5,00 m; 11,10 m e 12,00 m), sendo que os resultados apresentaram-se concordantes.

Palavras-chave: Perfuratriz; Estaca; Ensaio de Campo *FDT*; Energia; Princípio de Hamilton

ABSTRACT

Barreto, G.W. **Design of a multifunctional drilling rig for the construction of piles and development of a field test using its electronic monitoring system.** 2014. PhD Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2014.

This thesis presents the design of a drilling rig that allows the execution of five types of deep foundation, and the development of a field test that allows measuring the skin friction resistance developed between the instrument involved by the excavated ground and the natural soil. The drilling rig was designed to make continuous flight auger, bored pile, continuous flight auger with segmented auger, root pile and hollow-auger pile. The continuous flight auger and bored piles are widely used in Brazil; the root pile and hollow-auger pile are used for in special conditions, and the continuous flight auger with segmented auger, is although more recent, but its application has had increased application grown in over the last ten years. For the multifunctional drilling rig, calculations and basic designs of the main sets are presented. For the new field test denominated FDT – Full Displacement Test, a theoretical development based on the universal principle of energy conservation was made carried out resulting and the result, in practical terms, was to obtain in the attainment of the skin friction defined in this thesis as equivalent unit skin friction (f_{se}). The results obtained from the data acquired by the electronic monitoring system of drilling rigs were consistent among themselves, indicating the possibility of practically achieve the repeatability of the test. Among the various tests performed, emphasis was given to tests in the experimental field of foundations and geotechnics, of the College of Agricultural Engineering – FEAGRI, Campinas University –UNICAMP, and were correlated to the skin friction resistance obtained from the static load tests performed on site by Albuquerque (2001), based on the adjustments done to the instrumented level depth of 11.70 m, for which a factor (G_2) was given in each type tested (bored, C.F.A and omega). From the adjustments made to the 11,70 m level, load-bearing capacity of skin friction predictions were made for other instrumented levels (5.00 m; 11.10 m and 12.00 m) presenting consistent results.

Key-words: Drilling rig; Pile, Field Test *FDT*; Energy; Hamilton's Principle

1. INTRODUÇÃO

A execução de uma obra de fundação quase sempre envolve a utilização de equipamento projetado para executar, predominantemente, de um a dois tipos de fundação. Como exemplo, podem ser citadas as estacas Franki; escavadas com lama bentonítica e barrete; escavadas e fustes de tubulões mecanizados com utilização de trado curto; hélice contínua e hélice de deslocamento; hélice segmentada; cravadas de concreto e de aço; Strauss; raiz, microestacas e *hollow-auger*.

Em praticamente todo o mundo os equipamentos estão sendo projetados e construídos cada vez mais potentes, mais pesados e mais sofisticados que os modelos anteriores, com o objetivo de se executar estacas de elevada capacidade de carga e de se obter grande produtividade. No Brasil, as empresas executoras de fundações, de porte médio a grande, conseguem adquirir esses equipamentos, geralmente, recorrendo a financiamento; bancário, no caso de equipamento importado e a junto ao BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social no caso de equipamento nacional. Não se conhece nenhuma empresa executora de fundação sediada em município com menos de 100 mil habitantes que possua uma perfuratriz para execução de, por exemplo, estaca hélice contínua. Dessa forma, os equipamentos atuais, além de caros, normalmente não são multifuncionais e estão concentrados nas empresas localizadas nos grandes centros urbanos.

No censo de 2010 o IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, obteve dados relativos ao número de municípios, considerando determinadas faixas de quantidades de habitantes. Constatou-se que são mais de 5 mil municípios com população inferior a 100 mil habitantes, e menos de 300 com mais de 100 mil habitantes.

Para as empresas executoras de fundações sediadas nos municípios com menos de 100 mil habitantes a aquisição de diversos equipamentos específicos, como por exemplo, para estaca hélice contínua, para estaca raiz e para estaca escavada, é totalmente inviável.

Ao longo dos últimos 36 anos de experiência com execução de obras de engenharia civil, o autor desta tese observou que nas cidades de até aproximadamente 500 mil habitantes, predominam construções de galpões industriais, silos, reservatórios, pontes, edifícios residenciais e comerciais com até aproximadamente doze pavimentos, além de condomínios

fechados cujas construções normalmente apresentam até dois pavimentos e área construída de até aproximadamente 600 m². Onde ocorrem solos não saturados é comum se projetar fundações por estacas escavadas com trado mecânico e, ainda, tubulões com bases alargadas manualmente, sendo que nesses casos as empresas executoras locais conseguem atender a essa demanda de serviços. No entanto, onde ocorrem solos saturados ou solos com presença de matacões e/ou blocos de rocha ou rocha, ou ainda, uma combinação das ocorrências acima citadas, as empresas executoras locais, normalmente, não conseguem atender às exigências do projeto de fundação, havendo necessidade de se recorrer às empresas instaladas nos grandes centros urbanos, as quais geralmente dispõem de equipamentos preparados especificamente para a execução de cada tipo de estaca, tais como: hélice contínua, raiz, *hollow-auger*, escavadas com trado mecânico, escavadas com lama estabilizante e ultimamente hélice segmentada.

A diversidade de equipamentos implica na necessidade de área compatível de pátio, além dos elevados custos de aquisição, manutenção e depreciação desses equipamentos.

As empresas buscam e/ou preparam, cada vez mais, colaboradores polivalentes. Já é comum nas empresas executoras de fundação um colaborador ser contratado com a função “Operador de Máquinas e Veículos” ao invés de, por exemplo, “Operador de Equipamento de Estaca Raiz”. Essa flexibilização propicia melhores salários e maiores possibilidades dos colaboradores serem mantidos no emprego, mesmo em épocas de crise.

Por outro lado, no Brasil, o desenvolvimento e a utilização de novas tecnologias ligadas aos ensaios de campo estão muito aquém dos avanços que vêm ocorrendo nos equipamentos destinados à execução de fundações.

É sabido que a sondagem a percussão com medida de *SPT* é praticamente a única investigação de campo através da qual a maioria dos engenheiros brasileiros dimensionam os elementos isolados de fundação.

RANZINI (1988) propõe o ensaio *SPT-T* que consiste na rotação da composição de hastes e amostrador utilizando-se um torquímetro, sendo que durante a rotação faz-se a leitura do torque máximo necessário para romper a adesão entre o solo e o amostrador, permitindo o cálculo do atrito lateral na interface amostrador-solo. Dando continuidade à rotação do amostrador até que a leitura do torque se mantenha constante, a esse valor de torque dá-se o nome de torque residual.

DÉCOURT e QUARESMA FILHO (1994) apresentam uma aplicação prática da utilização da medida do torque no ensaio *SPT* (*SPT-T*).

Atualmente, poucos geotécnicos projetam fundações apenas com os resultados de torque; muitos utilizam os valores de *SPT* e de Torque e muitos, continuam utilizando apenas os resultados de *SPT*.

Outra forma de explorar melhor o *SPT*, que parece ser promissora, parte da medida do embuchamento no amostrador, segundo as recentes palestras do Prof. Nelson Aoki. A medida do embuchamento faz do ensaio *SPT* um substituto do ensaio *CPT* de penetração estática de cone (CINTRA et al, 2013).

No caso das estacas cravadas pode-se contar com as medidas de *nega* e de *repique*, o que não acontece com as estacas moldadas *in loco*, para as quais se utiliza algum processo de escavação.

Os ensaios *CPT* e *CPTu*, embora muito interessantes do ponto de vista de praticidade, facilidade de execução e produtividade, são muito pouco utilizados em nosso país. O mesmo ocorre com os ensaios dilatométricos e com os pressiométricos.

Diante do exposto, torna-se interessante o desenvolvimento do projeto de uma perfuratriz multifuncional para a execução de estacas executadas por processo rotativo, sendo que essa ou qualquer outra perfuratriz equipada com o sistema de monitoração eletrônica de execução de estaca hélice contínua ou hélice segmentada, poderá executar, além de vários tipos de estacas, uma investigação geotécnica complementar com o objetivo de se obter resultados mais precisos em termos de previsão de capacidade de carga do elemento isolado de fundação.

O desenvolvimento do projeto da perfuratriz para a execução de diversos tipos de estacas é uma continuação da dissertação de mestrado do mesmo autor (BARRETO, 2005). A partir desse trabalho com o título “DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA EXECUÇÃO DE ESTACAS HÉLICE SEGMENTADA”, a produção de perfuratrizes para a execução desse tipo de fundação foi facilitada, o que parece ter contribuído para a engenharia geotécnica brasileira. No passado recente, nas cidades pequenas e médias, era comum a execução de estacas escavadas com trado mecânico utilizando-se equipamento de pequeno porte, e estacas do tipo Strauss nas obras com presença de água, o que o parece não ser correto, já que o concreto é lançado da superfície (não é injetado) e é muito difícil garantir que a escavação fique isenta de água. Atualmente muitas obras pequenas e médias têm suas fundações executadas, com sucesso, por estacas hélice segmentada, cujo processo de concretagem é por injeção e normalmente existe um sistema de monitoramento eletrônico da execução da estaca. MUCHETI (2008), comprova que é perfeitamente normal se conseguir a

integridade do fuste da estaca hélice segmentada, desde que seguidos os procedimentos pertinentes.

A ideia do ensaio de campo denominado *FDT – Full Displacement Test*, surge no decorrer desta tese como um trabalho complementar, mas que ao longo dos ensaios realizados em diversos sítios, parece ter crescido em importância, devido à consistência dos resultados obtidos e à possibilidade de ser, num futuro próximo, uma ferramenta importante na previsão de capacidade de carga do sistema estaca-solo.

A seguir apresenta-se um histórico de alguns estudos realizados e conhecimentos adquiridos, ligados às estacas que utilizam um helicóide como ferramenta de escavação, que acabaram resultando no surgimento da ideia do ensaio *FDT*.

No final da década de 90, estudos realizados por Van IMPE, na Europa, concluem sobre a tendência na diminuição da utilização de estacas escavadas com utilização de fluido de contenção do fuste, e no aumento da utilização de estacas hélice contínua.

AOKI (1997) apresenta sua tese de doutorado denominada: DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA ÚLTIMA DE ESTACA CRAVADA EM ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO DE ENERGIA CRESCENTE. O trabalho é desenvolvido aplicando-se o princípio de conservação da energia de Hamilton em cada impacto do martelo. A leitura da tese do Professor Nelson Aoki desperta maior interesse na aplicação do princípio de Hamilton em outros problemas de engenharia.

Na década de 2000 ocorre, no Brasil, um aumento significativo da utilização da estaca hélice contínua. No entanto, o SPT continua sendo praticamente o único ensaio utilizado para a previsão da capacidade de carga do *sistema estaca-solo*.

AOKI & CINTRA (2000), baseados no Princípio de Hamilton, propõem calcular a eficiência do SPT a partir do trabalho realizado na penetração do amostrador no solo e não a partir da energia cinética que atinge o mesmo.

Em 2003, no programa de mestrado na USP - Escola de Engenharia de São Carlos, durante a disciplina Engenharia de Fundações, ministrada pelo Professor Nelson Aoki, inicia-se um trabalho que mostra de forma teórica, as relações práticas entre os números de golpes de cada uma das três parcelas do ensaio SPT com o número de golpes total, obtidas por TEIXEIRA (1993). Esse trabalho é desenvolvido utilizando-se o princípio da conservação da energia. (BARRETO, 2003).

Entre 2003 e 2004, este doutorando acompanha o desenvolvimento do trabalho de Seixas Neves (2004), que apresenta uma metodologia para a determinação da eficiência do

ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão. Essa dissertação de mestrado tem como base o Princípio de Hamilton.

TSUHA (2007) apresenta em sua tese de doutorado, um modelo teórico para o controle da capacidade de carga à tração de estacas metálicas. A autora propõe um modelo teórico da relação entre o torque medido durante a instalação de uma estaca metálica helicoidal e a capacidade de carga à tração desse tipo de estaca em areias. A tese mostra observar que para uma determinada configuração de estaca, quanto maior for o torque de instalação maior será a capacidade de carga da estaca, o que indica que a capacidade de carga é dependente da demanda de energia de instalação.

ARAÚJO et al (2009) apresentam, no Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste, em Goiânia, o trabalho denominado: CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACA HÉLICE CONTÍNUA EM FUNÇÃO DO TORQUE OBTIDO DURANTE A EXECUÇÃO. Esse trabalho chama a atenção com relação à contribuição à engenharia de fundações, principalmente no que se refere às estacas executadas por processo rotativo, que essa abordagem pode resultar.

Em 2010, este doutorando inicia um estudo cujo objetivo era determinar as resistências por atrito lateral e de ponta de um helicóide de aço carbono com o solo, durante a escavação de uma estaca do tipo hélice segmentada. Essa pesquisa foi paralisada pelos seguintes motivos:

- a. Havia muita dificuldade para a quantificação dos esforços atuantes no helicóide, tais como: atrito entre a borda da hélice e o solo, atrito entre a superfície superior da chapa da hélice e o solo, atrito entre a superfície inferior da chapa da hélice e o solo, tensões radiais e tangenciais atuantes no tubo central da hélice, separação das parcelas de forças de atrito e de ponta;
- b. O preenchimento dos espaços vazios do helicóide ocorria de forma muito heterogênea, o que resultava num variabilidade muito grande no nível de confinamento do solo ao longo do comprimento do trado. Esse fato implicaria em erros grosseiros no cálculo, por exemplo, do atrito lateral entre o helicóide e o solo circundante.
- c. Para que os ensaios fossem consistentes haveria a necessidade de se padronizar um trado contínuo, definindo-se o diâmetro, a inclinação da hélice, a espessura da chapa, as geometrias das pontas cortantes, entre outros itens. Mas, para um trado contínuo, que é uma ferramenta e não um instrumento, seria muito difícil controlar todas essas variáveis.

SILVA (2011), apresenta na Universidade de Brasília, a tese com o título: ENERGIA E CONFIABILIDADE APLICADA AOS ESTAQUEAMENTOS TIPO HÉLICE CONTÍNUA.

Silva desenvolveu uma nova metodologia, denominada SCCAP, para o controle de fundações executadas por hélice contínua. A metodologia tem como base a lei de conservação da energia e quantifica o trabalho realizado para escavar cada estaca da obra de fundação. O autor do trabalho destaca que o estaqueamento deve ser executado com condições controladas. Essa afirmação indica que SILVA (2011) observou que procedimentos, tais como: manter o mesmo equipamento para a execução de todo o estaqueamento, controlar as velocidades de rotação e translação da hélice, controlar a geometria da hélice como, por exemplo, o diâmetro ao longo do comprimento, as condições das ferramentas de corte instaladas na ponta, a inclinação do helicóide, a espessura da chapa, entre outros itens, eram de fundamental importância para a obtenção de resultados consistentes.

A partir dos conhecimentos adquiridos, principalmente através dos trabalhos acima citados, pensou-se basicamente o seguinte:

- Utilizar o princípio de Hamilton ao invés de tentar conhecer todos os esforços atuantes no helicóide, e considerar o atrito lateral na interface instrumentação de solo como um atrito lateral equivalente;
- Desenvolver uma hélice de deslocamento na qual as características geométricas possam ser facilmente controladas de forma que essa hélice possa ser um instrumento e não uma ferramenta;
- Padronizar a velocidade de penetração do instrumento, com baixa magnitude (em torno de 20 m/h) e utilizar uma ponta com elevado poder de desestruturação do solo, de sorte que a demanda de energia na ponta possa ser distribuída ao longo da área lateral do instrumento, sem a implicação de erros grosseiros nos resultados;
- Testar algumas hélices de deslocamento variando-se o diâmetro e o comprimento de ensaio de forma que os ensaios possam ser feitos com os torques e forças de penetração compatíveis com os equipamentos existentes no mercado, para a execução de estaca hélice contínua.

Os objetivos básicos desta pesquisa estão descritos a seguir.

- a. Desenvolver o projeto de uma perfuratriz multifuncional para executar os seguintes tipos de estacas:
 - a.1. hélice contínua monitorada;
 - a.2. hélice segmentada monitorada;
 - a.3. escavada com trado mecânico em solos não saturados;

a.4. *hollow-auger*;

a.5. raiz.

- b. Desenvolver um ensaio de campo que utiliza os parâmetros obtidos com o equipamento de monitoramento eletrônico instalado na perfuratriz para se obter o atrito lateral entre o instrumento e o maciço de solo.

Para se atingir os objetivos propostos são estudadas em detalhes as características relacionadas ao desempenho dos equipamentos existentes para se estabelecer a concepção do projeto da nova perfuratriz. São desenvolvidos cálculos preliminares dos mecanismos de acionamentos hidráulicos, com base nos torques, velocidades de rotação da mesa rotativa e dos guinchos, força de extração da hélice além dos mecanismos de manobra dos equipamentos existentes. São elaborados desenhos de peças, subconjuntos e conjuntos, que são apresentados neste trabalho.

No projeto da perfuratriz são utilizados conjuntos e componentes conhecidos nas diversas especialidades das engenharias, tais como, mecânica, hidráulica mobil, instrumentação, geotécnica e estrutural. No entanto, a ideia original se constitui na forma como os componentes e os conjuntos são utilizados de sorte a garantir a funcionalidade do equipamento. O projeto da perfuratriz foi desenvolvido para satisfazer requisitos que não existem em outros equipamentos, da forma como foram combinados neste desenvolvimento. O projeto prevê que a perfuratriz terá capacidade de executar cinco tipos de estacas, o que irá minimizar a descontinuidade de operação do equipamento, inclusive em épocas de recessão. A perfuratriz irá executar estaca hélice contínua monitorada com diâmetros de 250 mm, 300, 350, 400, 500 e 600 mm, com profundidade de até 18 m; estaca hélice segmentada com os mesmos trados da estaca hélice contínua, exceto o trado de 600 mm, com comprimento de até 22 m; estaca escavada com trado mecânico, em solo não saturado, com os mesmos diâmetros executados em hélice contínua, até 22 m de profundidade; estaca escavada com trado mecânico, em solo não saturado, com os mesmos diâmetros executados em hélice contínua, acrescentando-se o diâmetro de 700 mm, até 18 m de profundidade; estaca raiz com diâmetros nominais de 120 mm, 150, 160, 200, 310 e 400 mm, com profundidade de até 30 m e estaca do tipo trado vazado segmentado (*hollow-auger*) com diâmetros de 250 mm, 300, 350, 400 e 500 mm, com profundidade de até 22 m.

O projeto prevê ainda a utilização de um mecanismo de manobras que elimina a utilização de esteiras rodantes e outro mecanismo de nivelamento e autocarregamento da perfuratriz, que dispensa a utilização de pranchas inclinadas (rampas).

No que se refere ao novo ensaio de campo, foi desenvolvida uma hélice de deslocamento com geometria e dimensões apropriadas para que tornasse possível a realização dos ensaios com a utilização de uma perfuratriz de porte médio de propriedade do autor desta tese. A partir dos resultados dos ensaios realizados em seis sítios, foram feitas diversas interpretações e comparações com ensaios *SPT*.

Finalmente são iniciados estudos de previsão de capacidade de carga por atrito lateral, para alguns tipos de fundações profundas, sem, no entanto, ser conclusivo nessa área, devido à necessidade de se executar uma quantidade significativa de provas de carga estáticas para que os ajustes possam ser feitos com a confiabilidade necessária.

A tese foi dividida em dois volumes. O primeiro volume contém o desenvolvimento da tese propriamente dita, em seis capítulos, e o segundo volume contém ANEXOS relacionados aos equipamentos de execução de estacas escavadas com trado mecânico, hélice contínua, hélice segmentada, raiz e *hollow-auger* e APÊNDICES relacionados ao ensaio de campo desenvolvido pelo autor da tese.

Este capítulo apresenta uma introdução ao assunto desenvolvido e os objetivos e organização da tese.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos temas abordados. Faz-se um breve histórico de cada tipo de estaca que o equipamento projetado poderá executar, apresentam-se as metodologias executivas, descreve-se a instrumentação utilizada, apresentam-se aspectos gerais desses equipamentos, são feitas comparações com outros tipos de estacas, são mencionadas as principais aplicações e apresentam-se os principais fabricantes. Com relação ao ensaio desenvolvido são apresentados: As contribuições para a previsão do comportamento de estacas, os ensaios de campo e diversos estudos dos helicoides.

O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do projeto da perfuratriz multifuncional abordando a concepção do equipamento, mostrando a perfuratriz montada, apresentando as especificações técnicas da perfuratriz e o dimensionamento dos principais conjuntos.

O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do ensaio de campo executado por perfuratriz monitorada eletronicamente. Este ensaio foi denominado pelo autor desta tese como ensaio *FDT*, que são as iniciais de *Full Displacement Test*, já que o ensaio é feito pela inserção no solo de uma hélice de deslocamento padronizada, com geometria, também desenvolvida pelo autor da tese. Nesse capítulo é feito um desenvolvimento teórico com base no princípio universal da conservação da energia, ou seja, com base no princípio de Hamilton.

As perfuratrizes que executam estaca hélice contínua são equipadas com um sistema de monitoramento eletrônico de execução da estaca, sendo que esse sistema registra, durante a

escavação, dados de pressão hidráulica, velocidade de rotação e velocidade de translação da hélice, além de dados de verticalidade, em intervalos de no mínimo 0,01 m.

A pressão hidráulica e a velocidade de rotação do helicóide estão associados, respectivamente, ao torque disponibilizado na mesa rotativa e à vazão de óleo nos motores hidráulicos. As velocidades de translação e de rotação estão associadas à potência consumida e, portanto, devem ser padronizadas para que se possa trabalhar em termos de demanda de energia.

Sabe-se que, num sistema hidráulico, o produto da pressão pela vazão é igual à potência consumida.

Por outro lado, mantendo-se a vazão de óleo, a velocidade de rotação da hélice será mantida, desde que os deslocamentos volumétricos dos motores hidráulicos sejam constantes. E sendo assim, um aumento da pressão no sistema hidráulico indica um aumento da resistência que o solo oferece à rotação e penetração do helicóide padronizado (instrumento). Com base nesses conceitos é que o ensaio é, como poderá ser visto em detalhes nesse capítulo.

O capítulo 5 trata do ensaio *FDT* propriamente dito, apresentando os resultados e análises dos ensaios realizados no Campo Experimental de Fundações e Geotecnia da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI – UNICAMP. São apresentados também, os resultados e análises dos ensaios *FDT* feitos na Igreja do Evangelho Quadrangular de Araras onde foi realizada uma prova de carga estática do tipo rápido em uma estaca hélice segmentada.

O capítulo 6 apresenta as principais conclusões da tese e sugestões para pesquisas ligadas ao tema abordado.

No volume 2, os ANEXOS foram divididos da seguinte forma.

O ANEXO A apresenta tabelas de especificações técnicas de equipamentos, destinados, predominantemente à execução de estaca hélice contínua monitorada. O ANEXO B apresenta uma tabela de especificações técnicas de equipamentos destinados predominantemente à execução de estaca hélice segmentada monitorada e o ANEXO C apresenta tabelas de especificações técnicas de equipamentos destinados, predominantemente, à execução de estacas, raiz e *hollow-auger*.

Os APÊNDICES do volume 2 foram divididos conforme descritos a seguir.

O APÊNDICE A apresenta um resumo da função de cada componente ou conjunto e apresentação dos desenhos correspondentes.

Os APÊNDICES B, C, D, E e F, apresentam, respectivamente, os resultados obtidos nos ensaios *FDT* nos sítios, Reserva das Araras, Edifício São Mateus, Prédio Educacional da Igreja do Evangelho Quadrangular, Goodyear do Brasil e Residencial Ouro Verde.

O APÊNDICE G apresenta resultados de ensaios SPT-T obtidos por PACHECO (2001), relações entre o atrito lateral no ensaio *FDT* e o Torque no ensaio *SPT-T*, relações entre o atrito lateral médio no ensaio *FDT* e o N_{spt} médio no ensaio *SPT*, além de relações entre o Torque máximo e o N_{spt} (valores médios).

O APÊNDICE H apresenta a dedução da expressão para o cálculo do atrito lateral unitário equivalente (f_{se}) em função dos deslocamentos volumétricos dos motores hidráulicos da mesa rotativa.

O APÊNDICE I apresenta o critério adotado para se obter os dados de atrito lateral unitário equivalente (f_{se}) para a aplicação na relação f_{se}/N_{spt} .

O APÊNDICE J apresenta as zonas definidas por SLATTER (2000), para os trados tipos Ômega, e V e as zonas definidas pelo autor desta tese para o instrumento *FDT*, além de algumas considerações sobre essas hélices de deslocamento.

O APÊNDICE K apresenta esquemas hidráulicos da perfuratriz multifuncional.

O APÊNDICE L apresenta o processo de cálculo da demanda de energia para a execução de um ensaio *FDT*. Com os resultados dos ensaios *FDT* realizados no Campo Experimental da FEAGRI-UNICAMP, demonstra-se que a energia disponibilizada pela mesa rotativa, para o avanço vertical do instrumento, é praticamente desprezível em relação à energia necessária para vencer o atrito lateral do instrumento preenchido pelo solo com o solo circundante a ele. Esse APÊNDICE apresenta também uma demonstração de que a demanda de energia devida ao atrito da mesa rotativa com os trilhos da torre pode ser desprezada.

O APÊNDICE M apresenta dois desenhos esquemáticos do instrumento. O primeiro esquema (Figura M.1) mostra os principais esforços externos que atuam no instrumento durante a realização do ensaio *FDT*. O segundo esquema (Figura M.2) mostra os principais esforços que o solo aplica no instrumento durante a realização do ensaio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTACA HÉLICE CONTÍNUA

2.1.1 HISTÓRICO

O emprego de estacas executadas com trado contínuo (CFA = Continuous Flight Auger) segundo PENNA et al (1999) iniciou-se nos Estados Unidos na década de 50. Uma mesa rotativa era adaptada a um guindaste com torre acoplada e as estacas eram executadas com diâmetros de 27,5, 30 e 40 cm. No início da década de 70 a ideia foi introduzida na Europa e posteriormente no Japão.

Segundo CAPUTO et al (1997), no final da década de 80 era estimado que o método contribuía com aproximadamente metade das estacas de pequeno diâmetro (até 600 mm) executadas na Grã-Bretanha, enquanto o número de equipamentos disponíveis atingia 60, a maior parte dos quais não mais guindastes de esteiras adaptados, mas equipamentos construídos especificamente para execução de EHC (Estaca Hélice Contínua). No Brasil, as primeiras obras com esse tipo de estaca foram realizadas em 1987 utilizando-se equipamento fabricado em nosso país a partir de modelos utilizados no exterior, com torques disponíveis de 35 kNm. Esse equipamento conseguia executar estacas com diâmetro de até 425 mm e comprimentos de até 15 m. Até 1993 existiam apenas dois equipamentos no Brasil e tinham sido executadas cerca de 5500 estacas acompanhadas de 10 provas de carga. A partir desta data chegaram os equipamentos importados que disponibilizavam torques na faixa de 85 kNm e conseguiam executar estacas com diâmetros de até 800 mm e profundidades de até 24 m.

Segundo CAPUTO (2008), as fundações em estacas do tipo hélice contínua representavam, até o ano de 2008, aproximadamente 66% de todas as fundações profundas executadas no mundo.

Estudos realizados por Van IMPE na década de 90, na Europa, concluíram sobre a tendência na diminuição da utilização de estacas escavadas com utilização de fluido de contenção do fuste. Segundo BRONS & KOOL (1988), as vantagens técnicas combinadas ao custo relativamente baixo fizeram com que as estacas hélice contínua tornassem muito populares na década de 80.

De COCK (1998), em sua pesquisa sobre estacas escavadas submetidas a cargas axiais, coletou dados dos vários tipos de estacas utilizadas em países europeus e constatou que na França, Irlanda, Itália, Holanda e Reino Unido esse tipo de fundação já tinha uma grande utilização.

ALONSO (1996) discute a questão da possibilidade de seccionamento da estaca, principalmente na fase da concretagem quando não há monitoramento no processo. Tal seccionamento pode ocorrer devido à rápida extração do trado ou mesmo contaminação do concreto devido à lentidão da retirada da hélice.

BOTTIAU (1993) ressalta que o desenvolvimento da estaca hélice contínua conseguiu eliminar uma das mais importantes desvantagens da estaca escavada que é a descompressão do solo. Ensaio de campo realizados com dilatômetro de Marchetti, verificaram que o processo executivo não causou descompressão do solo.

Durante a realização do XII ICSMFE em 1989, no Rio de Janeiro, ocorre a primeira publicação técnica sobre as estacas hélice contínua. Tal publicação “ABEF Research on Foundation Engineering” apresenta as pesquisas realizadas no campo experimental de fundações da Escola Politécnica da USP (ABEF, 1989).

2.1.2 METODOLOGIA EXECUTIVA

2.1.2.1 PERFURAÇÃO

A execução de uma estaca hélice contínua é basicamente constituída de três fases: perfuração, concretagem e instalação da armadura, (Figura 2.1).

A extremidade inferior da hélice é dotada de ferramentas de corte (pontas) que permitem cortar o terreno, e de uma tampa destinada a impedir a entrada de solo no tubo central durante a escavação, e permitir a saída de concreto durante a fase de concretagem (Figura 2.2). A perfuração consiste na introdução da hélice no solo, através de rotação combinada com carga vertical constituída pelo peso próprio do conjunto (trado mais cabeçote rotativo). O processo exige que em nenhum momento a hélice seja retirada do solo, durante a fase de escavação. Devido a essa principal característica da estaca hélice contínua, a de não permitir alívio significativo do solo durante as etapas de escavação e concretagem, torna-se possível a sua execução tanto em solos coesivos como arenosos, na presença ou não de lençol freático.

2.1.2.2 CONCRETAGEM

Atingida a cota de parada da estaca, a concretagem é feita através do tubo central do trado contínuo (Figura 2.3), utilizando-se uma bomba adequada, (Figura 2.4).

A norma NBR 6122/1996 recomendava que a extração do trado fosse feita em conjunto com a concretagem, sem rotação.

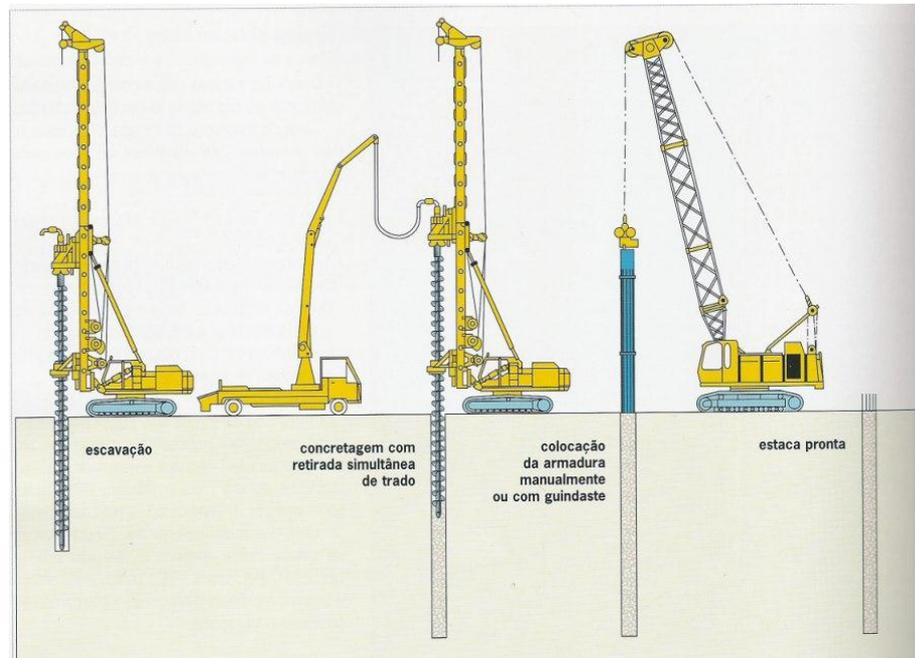


Figura 2.1 Fases de execução de uma estaca hélice contínua (BRASFOND, 2001).



Figura 2.2 Ponta da hélice com vista da tampa.

(ENGESTRAUSS, 2005).

A pressão do concreto é controlada de forma que este preencha os vazios causados pela extração da hélice, até, normalmente, a superfície do terreno. Os equipamentos modernos são equipados com um sistema de monitoramento que registra, durante a escavação: a posição da ponta do trado em relação a um referencial adotado (superfície do terreno), a rotação, a pressão hidráulica no cabeçote rotativo e a inclinação da torre da perfuratriz, e durante a fase

de concretagem : a pressão do concreto na parte superior do tubo central, a vazão de concreto e a posição da ponta do trado em relação ao referencial adotado.



Figura 2.3 Vista da ligação do mangote ao tubo central da hélice.
(GEOESP, 2010)



Figura 2.4 Bomba de concreto montada sobre caminhão.
(ENGESTRAUS, 2005).

2.1.2.3 COLOCAÇÃO DA ARMADURA

O método executivo da estaca hélice contínua exige a colocação da armadura após a sua concretagem. Essa armadura é constituída de barras longitudinais e estribos horizontais. A Figura 2.5 mostra um guindaste ao lado da perfuratriz com uma armadura longa posicionada na vertical e em condições de ser inserida no concreto.

2.1.3 DESCRIÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

A execução da estaca hélice contínua, normalmente, é monitorada por uma instrumentação específica. Segundo CAPUTO et al. (1997), a monitoração eletrônica da execução das estacas pode ser uma ferramenta capaz de trazer confiabilidade à integridade da estaca, desde que seja bem usada e interpretada. Esses autores analisam os parâmetros de controle durante a execução da estaca e concluem que a pressão de concreto nas proximidades da parte superior do tubo central da hélice é, sem dúvida, a informação mais importante fornecida pelo sistema de monitoramento de execução da estaca.



Figura 2.5 Introdução da armadura na estaca.
(FHWA, 2007).

A Figura 2.6 apresenta um relatório final fornecido pelo sistema de monitoramento eletrônico da perfuratriz.

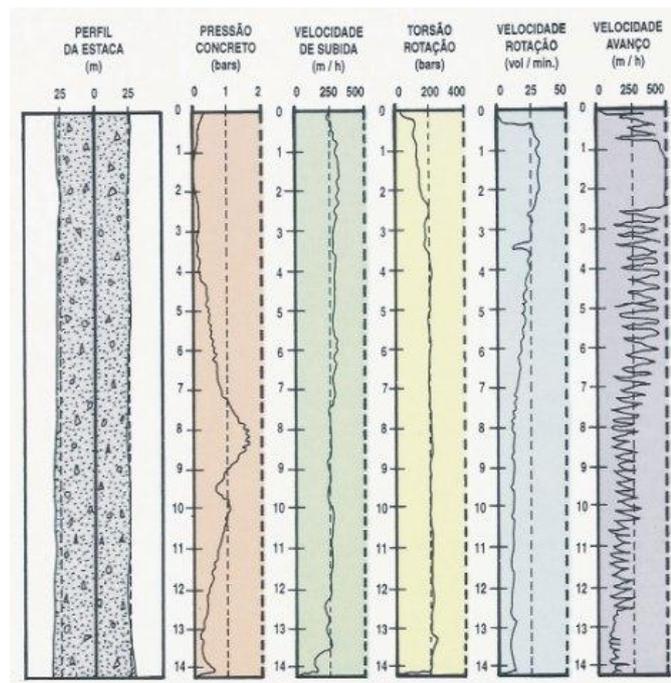


Figura 2.6 Relatório final de monitoramento de uma estaca.
(FUNDESP, 2001).

2.1.4 GENERALIDADES SOBRE OS EQUIPAMENTOS

2.1.4.1 CONSTITUIÇÃO

Os equipamentos utilizados na execução das estacas do tipo hélice contínua são basicamente constituídos dos seguintes conjuntos:

- a) Esteira rodante acionada por motoredutores;

- b) Estrutura, constituída de perfis de aço, montada sobre a esteira;
- c) Unidade de força movida a diesel (motor diesel);
- d) Sistema hidráulico constituído de bombas, motores, válvulas de comandos, válvulas diversas, cilindros hidráulicos, reservatório hidráulico, filtros, mangueiras e conexões;
- e) Torre constituída de perfis metálicos;
- f) Mesa rotativa também conhecida como cabeçote de perfuração, constituída de uma caixa redutora na qual são montados um ou mais motores ou motoredutores hidráulicos;
- g) Guincho principal constituído, de uma estrutura metálica, tambor, motor hidráulico ou motoredutor, redutor, válvula de frenagem, também conhecida com válvula de contrabalanço e cabo de aço;
- h) Guincho auxiliar, constituído basicamente dos mesmos itens do guincho principal, com diferenças na geometria, na bitola do cabo de aço e nas características do motor de acionamento hidráulico;
- i) Segmentos de trados que montados na vertical formam a hélice contínua;
- j) Aparelho de monitoramento eletrônico do processo executivo da estaca.

Segundo CAPUTO et al. (1997), na década de 90 estavam disponíveis em nosso mercado equipamentos que forneciam torques de 35 a 200 kNm e que executavam estacas hélice contínua com diâmetros nominais de 275 a 1000 mm e comprimentos de 15 a 24 m. Atualmente existem equipamentos de hélice contínua, com potência de 400 kW (540 CV), que fornecem torques da ordem de 470 kNm, que executam estacas com diâmetros nominais de até 1200 mm, que disponibilizam força de extração da hélice de 1160 kN, que escavam até 25,5 m de profundidade e que pesam em torno de 1400 kN (SOILMEC, 2009).

2.1.4.2 COMPARAÇÃO COM PROCESSOS EXECUTIVOS DE OUTRAS ESTACAS

As estacas hélice contínua apresentam as seguintes vantagens em relação às estacas mais tradicionais:

- Maior rapidez na execução resultando em elevada produtividade;
- Maior facilidade de manuseio do equipamento na obra;
- Ausência quase total de vibrações no terreno, comum nos equipamentos a percussão;
- Menor descompressão do terreno quando comparado com as estacas escavadas;
- Ausência de detritos provenientes do uso de lama bentonítica.

São conhecidas as seguintes desvantagens:

- Necessidade de terreno plano e com espaço que possibilite fácil movimentação;
- A central de concreto não pode estar muito longe da obra;
- Elevada taxa de mobilização de equipamento, necessitando de quantidade razoável de estacas para viabilizar a implantação do equipamento;
- Limitação do comprimento da estaca, dada pelas características dos equipamentos;
- Limitação do comprimento da armadura longitudinal;
- Necessidade de remoção do material escavado.

2.1.4.3 APLICAÇÕES

As estacas do tipo hélice contínua estão sendo aplicadas, principalmente, nos seguintes casos:

- Nos centros urbanos, próximos de edifícios antigos, hospitais, escolas e outras edificações onde seria desaconselhável a utilização de equipamentos que viessem a produzir vibrações, ruídos excessivos ou desconfinamento do terreno;
- Em obras com quantidade elevada de estacas de mesmo diâmetro tais como indústrias de grande porte e conjuntos habitacionais. Nesses casos a elevada produtividade alcançada pelo processo, torna a aplicação muito atrativa;
- Em estruturas de contenção, principalmente em divisas com prédios existentes, quando o projeto exige estacas de grandes diâmetros, já que o cabeçote de perfuração disponibiliza escavações a distâncias a partir de 40 cm, medidas da parede de divisa até o eixo da estaca.

2.1.5 EQUIPAMENTOS

Existe uma grande variedade de equipamentos para execução de estaca hélice contínua. A seguir, apresentam-se os equipamentos, nacionais e importados, mais conhecidos no meio geotécnico brasileiro, destinados à execução de estacas hélice contínua e hélice segmentada.

2.1.5.1 EQUIPAMENTOS CZM – INDÚSTRIA DE EQUIPAMENTOS LTDA

A empresa CZM iniciou a fabricação de perfuratrizes para fundações em 1976 com o objetivo de suprir o mercado de construção civil com tecnologias mais avançadas. Na época a razão da empresa era Cló – Zironi Ltda. A empresa se dedica exclusivamente ao desenvolvimento e fabricação de equipamentos para a área de geotecnia, com maior foco nos equipamentos para execução de fundações. A participação da empresa nas principais feiras e

eventos em todo o mundo têm contribuído de forma significativa para a atualização tecnológica dos produtos fabricados em nosso país.

A CZM fabrica diversos modelos de perfuratrizes para execução de estaca hélice contínua, com torques na mesa rotativa que variam de 60 kNm a 150 kNm e motores com potências entre 82 a 180 kW (110 a 243 CV), diâmetros que podem ser escavados na faixa de 400 a 800 mm e profundidades de 17 a 30 m, com forças de extração da hélice que variam de 200 a 600 kN.

A grande exclusividade da empresa é o sistema denominado *Bottom – Drive*. Trata-se da invenção de um mecanismo que possibilita que a mesa rotativa trabalhe apenas na parte de baixo da torre o que traz grandes vantagens tais como:

- A torre só recebe esforços de torção entre seu apoio e a mesa rotativa;
- O equipamento pode ter dimensões menores que os convencionais por ter o centro de gravidade mais próximo do solo;
- É viável a utilização de equipamento de hélice contínua sobre caminhão.

A Figura 2.7 mostra um equipamento que utiliza o sistema *Bottom – Drive*. Na frente da torre e atrás da hélice pode ser observado um cilindro de empuxo axial (*pull-down*), cujo curso da haste corresponde ao deslocamento máximo da mesa rotativa. Esse sistema foi patenteado no Brasil e em diversos outros países. A Figura 2.8 mostra a perfuratriz CD 30 CFA, montada sobre caminhão graças ao mecanismo que possibilitou posicionar o cabeçote de perfuração na parte inferior da torre. A Figura 2.9 e a Figura 2.10 mostram as perfuratrizes modelos EM800EC e EM800US, respectivamente. Cabe ressaltar que equipamentos como esses, montados sobre esteiras, têm maior facilidade de manobra na obra do que aqueles montados sobre caminhões.



Figura 2.7 Perfuratriz CA 80 S/30 com sistema “Bottom – Drive”. (CLO ZIRONI, 2006).

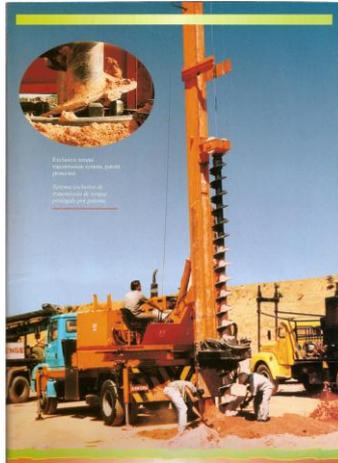


Figura 2.8 Perfuratriz CD 30 CFA. (CLÓ ZIRONI, 2009).

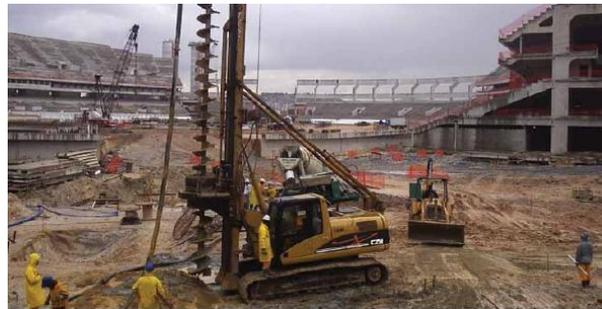


Figura 2.9 Perfuratriz EM800EC. (CZM, 2010).



Figura 2.10 Perfuratriz EM800US. (CZM, 2010).

2.1.5.2 EQUIPAMENTOS BS INDÚSTRIA

A BS INDÚSTRIA, empresa nacional, fabrica diversos modelos de equipamentos destinados à execução de fundações, sendo um deles para a execução de estaca hélice contínua e um modelo para a execução de estaca hélice segmentada.

A Figura 2.11 apresenta uma imagem do equipamento BS CFA 1842 projetado para a execução de estaca hélice contínua.

O sistema de monitoramento eletrônico para todas as perfuratrizes que executam estacas hélice contínua pode ser importado ou nacional. Atualmente existem duas empresas brasileiras que desenvolveram o sistema de monitoramento eletrônico, a DIGITUS situada em Belo Horizonte – MG e a COMPUGEO com sede em São Paulo – SP. Esse fato representa uma contribuição importante para a engenharia geotécnica brasileira, no que se refere a instrumentação.



Figura 2.11 Perfuratriz BS CFA 1842.
(BS INDÚSTRIA, 2010).

2.1.5.3 EQUIPAMENTOS GEAX

A empresa GEAX, de origem italiana, é fabricante de algumas perfuratrizes compactas para execução de estacas escavadas e tubulões além de alguns modelos que executam estacas hélice contínua. A Figura 2.12 mostra uma perfuratriz fabricada pela empresa para a execução de estaca hélice contínua. Nesse equipamento, a torre, o cabeçote rotativo, os guinchos e demais conjuntos são montados sobre uma retroescavadeira praticamente como é fornecida pelo fabricante.



Figura 2.12 Perfuratriz modelo EK90 CFA.
(GEAX, 2009).

2.1.5.4 EQUIPAMENTOS CMV

A CMV é uma empresa italiana que oferece, no segmento de estaca hélice contínua, mais de uma dezena de modelos de perfuratrizes. A empresa disponibiliza equipamentos que conseguem executar estaca hélice contínua com torques na mesa rotativa que variam de 100 kNm a 220 kNm, motores a diesel que disponibilizam potências entre 115 a 388 kW (155 a 400 CV), diâmetros que podem ser escavados na faixa de 600 a 1200 mm e profundidades de 16 a 27 m, com forças de extração da hélice que variam de 280 a 774 kN. A Figura 2.13 mostra uma vista da perfuratriz TH 26, que é uma das mais pesadas e a que disponibiliza um dos maiores torques na mesa rotativa. A Figura 2.14 mostra o equipamento TH 10/25 que é o modelo mais leve da empresa CMV e a Figura 2.15 mostra a perfuratriz TH 26 montada com conjunto de hastes telescópicas, para a execução de estaca escavada de grande diâmetro.

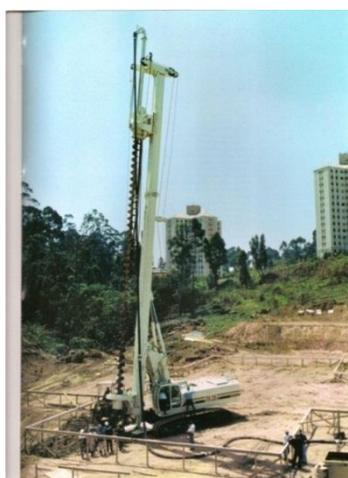


Figura 2.13 Perfuratriz TH 26. (CVM, 2006).



Figura 2.14 Perfuratrizes TH 10/25 (CMV, 2000).

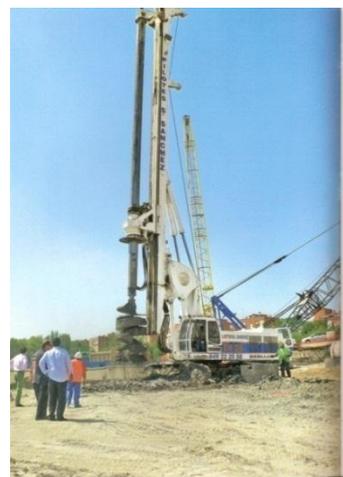


Figura 2.15 Perfuratriz TH 26 Equipada com trado curto e Hastes telescópicas. (CMV, 2000).

2.1.5.5 EQUIPAMENTOS SOILMEC

A empresa SOILMEC é de origem italiana e é reconhecida internacionalmente como projetista, fabricante e distribuidora de equipamentos para fundações. Foi fundada em 1969 pelo Sr. Davide Trevisani com o nome “Pali Trevisani”. A empresa é uma referência mundial em equipamentos para fundações. Em meados de 2013 a empresa disponibilizou um catálogo geral, para o Brasil (SOILMEC, 2013). Os equipamentos desenvolvidos e fabricados pela SOILMEC, para hélice contínua, conseguem executar estacas com torques nas mesas rotativas que variam de 88 kNm a 469 kNm, os motores utilizados disponibilizam potências entre 116 a 500 kW (155 a 670 CV), escavam estacas com diâmetros de 600 a 1400 mm e com profundidades de 15,5 a 39,5 m, disponibilizam forças de extração da hélice que variam de

280 a 1160 kN e pesam entre 260 e 1400 kN. As Figuras de 2.16 a 2.20 mostram equipamentos SOILMEC.



Figura 2.16 Perfuratriz CM 48. (SOILMEC, 200-?).



Figura 2.17 Perfuratriz SR-55. (SOILMEC, 2000).



Figura 2.18 Perfuratriz SF-70-Vista parcial. (SOILMEC, 2010).



Figura 2.19 Perfuratriz R-1240 CFA (SOILMEC, 2005).



Figura 2.20 Perfuratriz R-622. (SOILMEC, 200-?).

2.1.5.6 EQUIPAMENTOS CASAGRANDE

A empresa Casagrande foi fundada em 1963. O escritório e a fábrica matriz estão localizados em Fontanafredda na Itália. É conhecida por possuir uma grande linha de equipamentos para fundações, com máquinas destinadas a execução de estaca hélice contínua, estaca escavada, microestaca, estaca raiz e tirante. As perfuratrizes para execução de estaca hélice contínua da Casagrande são produzidas com motor movido a diesel com potência de 147 a 406 kW, com cabeçotes de perfuração que disponibilizam torques de 100 a 545 kNm. Algumas dessas máquinas executam estacas com até 34 m de profundidade e diâmetro de até 1,60 m. A Figura 2.21e a Figura 2.22 apresentam dois modelos de perfuratrizes produzidas pela Casagrande.

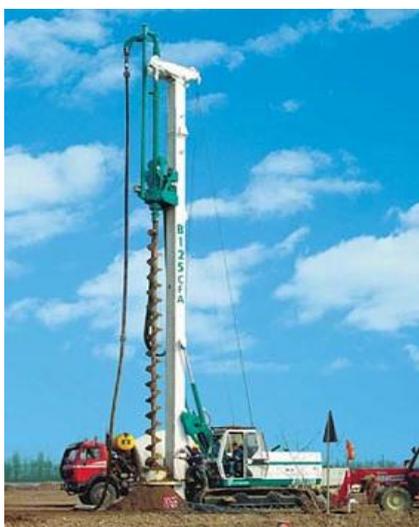


Figura 2.21 Perfuratriz B 125.
(Casagrande, 2010).



Figura 2.22 Perfuratriz C800 DH
(Casagrande, 2010).

2.1.5.7 EQUIPAMENTOS LLAMADA

A empresa LLAMADA é de origem espanhola. As perfuratrizes desenvolvidas pela empresa, embora com especificações técnicas semelhantes aos modelos italianos, apresentam detalhes diferentes e interessantes como a utilização de um contrapeso móvel na parte traseira de alguns modelos, torre telescópica, limpador mecânico de trado, e suportes das roldanas com balanços menores que os utilizados por outras empresas. O limpador de hélice apresentado na Figura 2.28 é bastante simples e não necessita de nenhum mecanismo acionado hidraulicamente, como normalmente é utilizado nos modelos de outras empresas. Da Figura 2.23 à Figura 2.28 são mostrados alguns equipamentos LLAMADA.



Figura 2.23 Perfuratriz LAMADA P – 135 – Evolution. (LLMADA, 2009).



Figura 2.24 Vista da cabine da perfuratriz P-135 P-135 – Evolution. (LLMADA, 2009).



Figura 2.25 Perfuratriz LAMADA P – 90TT. (LLMADA, 2009).



Figura 2.26 Perfuratriz modelo P-140TT. (LLMADA, 2009).



Figura 2.27 Detalhe da mesa rotativa da perfuratriz P-140TT. (LLMADA, 2009).



Figura 2.28 Perfuratriz P – 90 TT.
Vista do limpador de trado. (LLMADA, 2009).

2.1.5.8 EQUIPAMENTOS MAIT

A MAIT é uma empresa italiana que produz diversos modelos de perfuratrizes para execução de fundações profundas, tirantes e injeções.

A Figura mostra uma vista do equipamento CFA 24 na posição de trabalho.



Figura 2.29 Perfuratriz CFA 24. (MAIT, 1998).

2.1.5.9 EQUIPAMENTOS TESCAR

Trata-se de mais uma empresa italiana que desenvolve e produz equipamentos para fundações. Foi fundada em 1976 e destaca-se pelos equipamentos compactos que têm desenvolvido utilizando esteiras de pequeno porte. As Figuras 2.30 e 2.31 mostram, respectivamente, as perfuratrizes CF 6 CFA e CF 10 CFA.



Figura 2.30 Perfuratriz CF 6 CFA.
(TESCAR, 200-?).



Figura 2.31 Perfuratriz CF 10.
(TESCAR, 200-?).

2.1.5.10 EQUIPAMENTOS BAUER

Há mais de quarenta anos o Grupo Bauer tem projetado e construído equipamentos especiais para fundações. A empresa tem uma rede de distribuição de equipamentos e assistência técnica na Itália, Suécia, Estados Unidos, Rússia, China e Malásia. A *Bauer Maschinen GmbH* foi formada em 2001 como parte da reestruturação do Grupo Bauer. Atualmente a *Bauer Maschinen* oferece uma completa gama de equipamentos especiais para fundações, tais como, perfuratrizes da série BG que, para estacas escavadas, perfuram até 3 m de diâmetro e até 80 m de profundidade, acessórios para perfuração, equipamentos e acessórios para paredes diafragmas, perfuratrizes para estacas de pequenos diâmetros que executam estacas de até 300 mm de diâmetro e até 60 m de profundidade, equipamentos e ferramentas para execução do sistema CSM (*Cutter Soil Mixing*), equipamentos para melhoria de solos entre outros. A Figura 2.32 apresenta uma imagem geral das perfuratrizes Bauer. A Figura 2.33 apresenta uma imagem da perfuratriz modelo BG 25 e a Figura 2.34 mostra uma imagem da perfuratriz BG 30.



Figura 2.32 – Vista geral das perfuratrizes Bauer.
(BAUER MASCHNEN, 2010).



Figura 2.33 Vista da perfuratriz BG 25.
(BAUER MASCHNEN, 2010).



Figura 2.34 Vista da perfuratriz modelo BG 30. (BAUER MASCHINEN, 1994).

2.2 ESTACA HÉLICE SEGMENTADA

2.2.1 HISTÓRICO

A estaca hélice segmentada é uma estaca moldada *in loco* executada por escavação do solo com utilização de uma mesa rotativa e de segmentos de trados que são acoplados entre si na medida em que cada segmento é introduzido no solo. Os segmentos são introduzidos no solo, por rotação e pela aplicação de cargas axiais devidas, ao peso próprio da composição (mesa rotativa e trados) e/ou através de um sistema mecânico, com acionamento hidráulico, que, durante a fase de escavação, aplica forças descendentes e na direção do deslocamento do trado (*pull-down*), e durante a fase de extração dos segmentos de hélice, aplica forças ascendentes (*pull-back*).

Na fase de escavação o movimento de rotação e de translação da hélice é paralisado, durante alguns minutos, cada vez que um novo segmento é acoplado sobre o segmento anterior, até se atingir a cota da ponta da estaca. A extração dos segmentos de trado é feita, sem rotação da hélice, simultaneamente com a injeção de concreto, ocorrendo novamente a paralisação do movimento vertical para cada segmento de hélice que é extraído.

Segundo MUCHETI (2008), a primeira máquina fabricada pela empresa italiana EGTECHNOLOGY, cujo modelo recebeu a denominação MD 3000, ocorreu em 2002 a pedido do engenheiro Paulo Sérgio Augustini, fundador da empresa Engestrauss Engenharia

e Fundações Ltda. A perfuratriz disponibiliza torques no eixo de saída da mesa rotativa (cabeçote de perfuração) de até 30 kNm e pode executar estacas de até 18 m de comprimento, com diâmetros de 25, 30 e 35 cm. Escava solos coesivos com N_{spt} da ordem de 25 e solos não coesivos com N_{spt} de até 40. Média 2 m de largura, 8 m de comprimento, 8 m de altura e pesava 200 kN.

Esse modelo opera com um segmento sempre acoplado ao cabeçote de perfuração e até outros dois em um mecanismo denominado alimentador, responsável pelas emendas necessárias para que o trado fique contínuo da superfície do solo para baixo. A Figura 2.35 mostra o equipamento executando uma estaca muito próxima de uma das divisas de um terreno estreito e a Figura 2.36 apresenta uma vista do mesmo equipamento operando com dois segmentos de trado de 6 m.

BARRETO (2005) apresentou os resultados conseguidos com o desenvolvimento de uma perfuratriz montada sobre pneus. Inicialmente o equipamento foi projetado para injetar argamassa de cimento e areia. Operava com quatro segmentos de 3,5 m e podia escavar estacas com diâmetros de 25 cm e 30 cm e profundidades de até 14 m. O monitoramento das pressões de injeção de argamassa era feito por um manômetro analógico (Figura 2.37), ou por um transdutor de pressão (Figura 2.38) instalado próximo à entrada da argamassa no tubo central da hélice, que transmitia os sinais para um leitor digital, instalado próximo ao operador.



Figura 2.35 Execução de estaca próxima à divisa. (ENGESTRAUSS, 2002).

A Figura 2.39 apresenta uma imagem do transdutor de pressão e do indicador digital. As pressões de injeção eram lidas pelo operador durante a fase de extração da hélice, já que o sistema de monitoramento não possibilitava a gravação de dados.



Figura 2.36 Vista da perfuratriz operando com dois segmentos de trados.(ENGESTRAUSS, 2002).



Figura 2.37 Manômetro analógico. (BARRETO, 2005).



Figura 2.38 Transdutor de pressão. (BARRETO, 2005)

O equipamento é autocarregável através de quatro cilindros que também servem para manter a verticalidade da torre durante a execução da estaca (Figura 2.40).

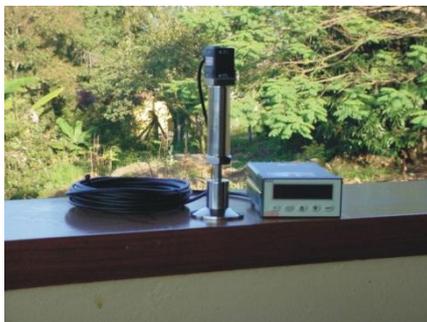


Figura 2.39 Transdutor e indicador de pressão. (BARRETO, 2005).



Figura 2.40 Sistema hidráulico de autocarregamento (BARRETO, 2005).

Posteriormente o equipamento sofreu as seguintes modificações:

- A torre foi aumentada;
- Foi projetada e construída uma nova mesa rotativa com maior torque (aprox. 25 kNm);
- O alimentador de trados foi modificado de sorte a permitir a utilização de três segmentos de trado de 6 m;
- O sistema de injeção de argamassa foi substituído por um sistema que possibilitou a injeção de concreto;
- As modificações permitiram que fossem escavadas estacas nos diâmetros de 25cm, 30, 35 e 40 cm, com profundidades de até 18 m;
- Foi instalado o sistema de monitoramento eletrônico que comumente é utilizado nos equipamentos de execução de estacas do tipo hélice contínua.

A Figura 2.41 mostra uma imagem do equipamento sendo carregado em uma carreta com capacidade para 200 kN.



Figura 2.41 Vista do carregamento da perfuratriz. (E.G. BARRETO, 2006).

A Figura 2.42 e a Figura 2.43 apresentam o equipamento modificado.



Figura 2.42 Vista do equipamento modificado. Fase de escavação. (E.G. BARRETO, 2010).



Figura 2.43 Vista do equipamento modificado. Fase de concretagem. (E.G.BARRETO, 2008).

Em 2003 foi criada a empresa Solodrill Indústria e Comércio de Máquinas perfuratrizes. A empresa nasce da soma de ideias das empresas Ferplas Indústria e Comércio, fabricante de equipamentos e ferramentas para perfuração de solos, a Mori Foundation, fabricante italiana de máquinas e Colidrill Group, também uma empresa italiana (SOLODRILL, 2010). O primeiro equipamento para execução de estacas do tipo hélice segmentada produzido pela empresa foi a perfuratriz modelo SD40 BR. Esse equipamento possibilitava a execução de estacas com diâmetros de até 400 mm e profundidades de até 16 m. Posteriormente a empresa desenvolveu mais três modelos de perfuratrizes para a execução desse tipo de estaca, sendo: a SD 40 que executava estacas com diâmetro máximo de 40 cm e profundidade máxima de 16 m, a SD 45 para estacas com diâmetro máximo de 40 cm e profundidade máxima de 18,30 m e a SD 55 para diâmetro máximo de 50 cm e profundidades de até 18 m. A Figura 2.44 apresenta uma imagem da perfuratriz SD 45 executando estaca hélice segmentada no campo experimental de fundações da Universidade de Campinas (FEAGRI - UNICAMP). (MUCHETI, 2008).



Figura 2.44 Perfuratriz SD 45. (MUCHETI, 2008).

No trabalho desenvolvido por DAN A. BROWN et al.(2007), para o departamento de estradas dos Estados Unidos (FHWA: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION) foi apresentado um equipamento que utiliza trados segmentados e que é construído para operar em locais com altura livre limitada. Os autores consideraram que a estaca produzida por essa perfuratriz é do tipo hélice contínua com trados segmentados e o equipamento é chamado de *Low Headroom CFA Pile Rig* (Figura 2.45).



Figura 2.45 Equipamento para execução de estacas com trados segmentados. (FHWA - Federal Highway Administration, 2007).

Todavia, pelo fato desse tipo de equipamento disponibilizar torque da ordem de 28 kNm, os autores recomendaram sua utilização onde o solo apresentasse condições favoráveis à aplicação pretendida, de sorte a evitar o seccionamento da estaca.

Em meados de 2007 a empresa BS Indústria de Perfuratrizes com sede em Belo Horizonte, lançou a perfuratriz modelo BS SFA80. Esse equipamento para execução de estacas hélice segmentada executava, segundo o fabricante, estacas com diâmetros de 300 mm a 500 mm e com comprimentos de até 20 m (Figura 2.46).



Figura 2.46 Perfuratriz BS SFA 80. (BS Indústria de Perfuratrizes, 2008).

2.2.2 METODOLOGIA EXECUTIVA

Os processos executivos das estacas, hélice segmentada e hélice contínua são parecidos, podendo ser destacadas as seguintes diferenças:

- Na fase de perfuração os segmentos de trado são acoplados entre si na medida em que a perfuração é feita;
- Na fase de concretagem cada segmento de trado é desacoplado do segmento imediatamente abaixo na medida em que cada segmento é extraído do solo;
- Na fase de concretagem a pressão de injeção é zerada nos intervalos de tempo que os segmentos são desacoplados uns dos outros;
- Os processos de perfuração e de concretagem não são contínuos, já que ocorrem pequenas paralisações nos momentos de acoplagem e de separação dos segmentos de trados.

2.2.3 INSTRUMENTAÇÃO

O controle da execução da estaca hélice segmentada é feito utilizando-se o mesmo sistema de monitoramento eletrônico que é utilizado para a execução da estaca hélice contínua. Um transdutor de pressão (Figura 2.47) instalado próximo à entrada de um dos motores hidráulicos da mesa rotativa permite a obtenção das pressões hidráulicas que ocorrem durante a escavação da estaca. Os torques disponibilizados na hélice são proporcionais a essas pressões, que normalmente são medidas em “bares”.

O sensor de velocidade de rotação é instalado em uma posição que permite captar o movimento de rotação da hélice, sendo necessária a colocação de pinos metálicos no perímetro do tubo da hélice, numa quantidade pré-determinada para que a contagem do número de voltas por minuto (*rpm*) do trado possa ser feita. A Figura 2.48 mostra um sensor de rotação instalado na parte inferior da mesa rotativa de um equipamento de estaca do tipo hélice segmentada, numa posição favorável, já que os parafusos de fixação de dois flanges ali existentes servem para a contagem da rotação da hélice. A posição da extremidade inferior da hélice é conseguida através de um sensor de profundidade. Uma das pontas de um cabo de aço é fixada na parte superior da torre da perfuratriz e a outra é fixada na mesa rotativa. Esse cabo passa por um conjunto de roldanas sendo que uma das roldanas tem um diâmetro pré-determinado de sorte que uma volta dessa roldana corresponderá a um determinado deslocamento para baixo ou para cima da mesa rotativa (Figura 2.49). Esse deslocamento é determinado pelo sensor de profundidade instalado de tal forma que seu eixo é ligado no eixo

da roldana principal. Na fase de concretagem são utilizados: um sensor de profundidade que é o mesmo utilizado na fase de perfuração da estaca e um transdutor de pressão que fornece a pressão de injeção de concreto, configurado normalmente a cada 8 cm de deslocamento da composição de trados.



Figura 2.47 Vista do transdutor de pressão. (E.G. BARRETO, 2010).

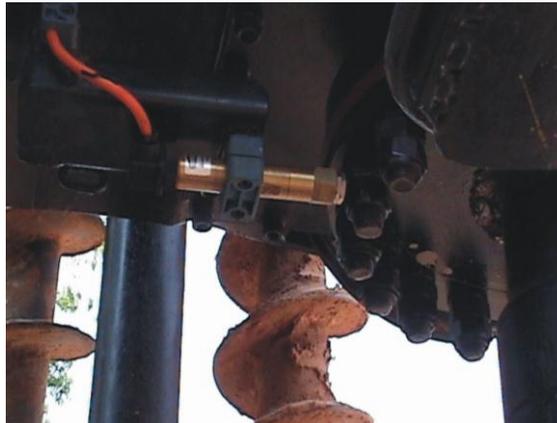


Figura 2.48 Sensor de velocidade de rotação. (E.G. BARRETO, 2010).



Figura 2.49 Vista frontal do conjunto de medida de profundidade.
(E.G. BARRETO, 2010).

Um programa de computador é utilizado para gerar os relatórios de execução das estacas. A Figura 2.50 apresenta parte de um relatório gerado por um equipamento da empresa COMPUGEO, instalado numa perfuratriz da empresa E.G. Barreto.

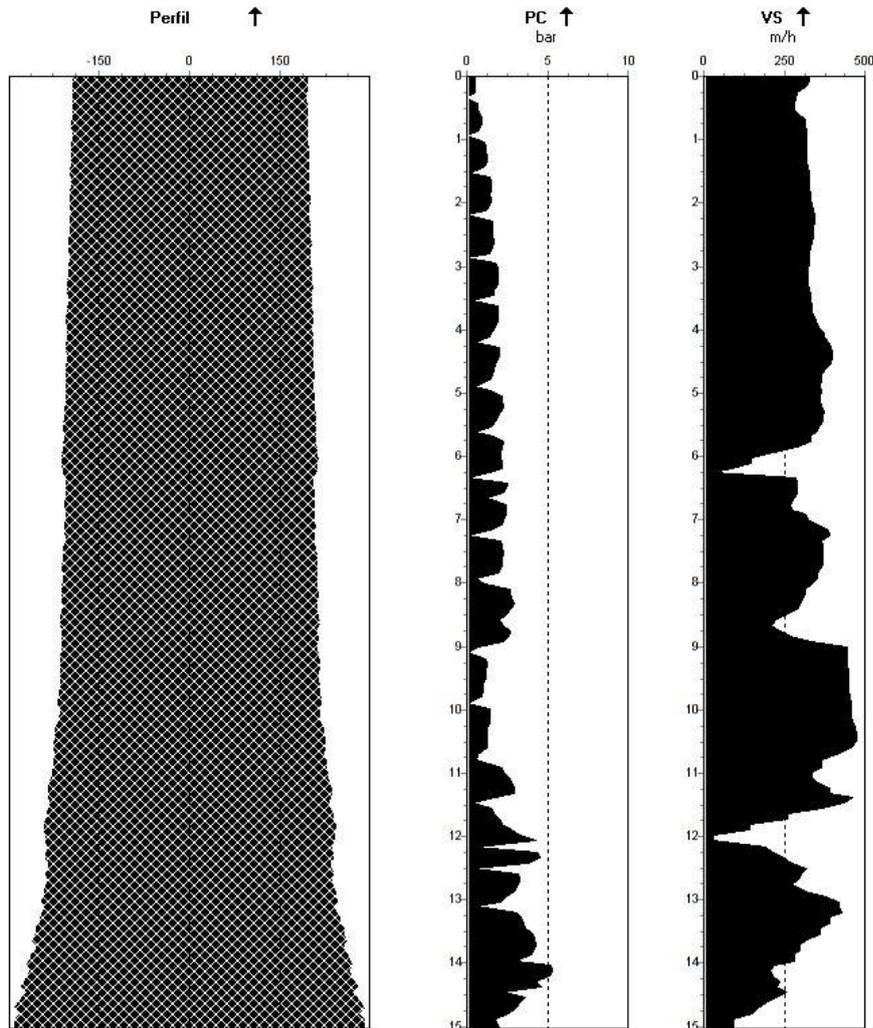


Figura 2.50 Relatório do monitoramento de uma estaca. (E.G. BARRETO, 2010).

No gráfico de velocidade de extração, as posições onde a velocidade é igual a zero indicam que houve a segmentação da hélice. No relatório completo de monitoramento de execução da estaca, o gráfico de “MT” (Momento de Torção), na verdade não apresenta os torques, mas sim as pressões que ocorrem durante a fase de escavação da estaca. Essa indicação, incorreta, é comum em praticamente todos os equipamentos de monitoramento de estacas hélice contínua e hélice segmentada. Durante o processo de escavação da estaca o sensor de inclinação capta as inclinações da torre em relação à vertical, sendo “IX”, num plano vertical paralelo à direção longitudinal da perfuratriz (comprimento), e “IY” num plano vertical transversal paralelo à direção transversal da perfuratriz (largura). Essas inclinações são fornecidas em graus.

2.2.4 GENERALIDADES SOBRE OS EQUIPAMENTOS

2.2.4.1 CONSTITUIÇÃO

Os equipamentos utilizados na execução das estacas hélice segmentada são basicamente constituídos pelos seguintes conjuntos:

- a) Esteira rodante acionada por motoredutores;
- b) Estrutura montada sobre a esteira, formada por perfis de aço;
- c) Unidade de força movida a diesel (motor diesel);
- d) Sistema hidráulico constituído por bombas, motores, válvulas de comandos, válvulas diversas, cilindros hidráulicos, reservatório hidráulico, filtros, mangueiras e conexões;
- e) Torre constituída por perfis metálicos;
- f) Mesa rotativa também conhecida como cabeçote de perfuração, constituída de uma caixa redutora na qual são montados um ou mais motores ou motoredutores hidráulicos;
- g) Guincho principal, constituído de uma estrutura metálica, tambor, motor hidráulico ou motoredutor, redutor, válvula de frenagem, e cabo de aço;
- h) Guincho auxiliar, constituído basicamente pelos mesmos itens do guincho principal, com diferenças na geometria, na bitola do cabo de aço e nas características do motor de acionamento hidráulico;
- i) Segmentos de trados que são acoplados entre si na medida em que a estaca é executada;
- j) Aparelho de monitoramento eletrônico do processo executivo.

2.2.4.2 COMPARAÇÃO COM PROCESSOS EXECUTIVOS DE OUTRAS ESTACAS

As estacas do tipo hélice segmentada apresentam as seguintes vantagens em relação às estacas hélice contínua:

- É possível operar em locais relativamente confinados devido ao menor porte do equipamento;
- Têm menor preço unitário de execução (US\$/m) principalmente devido ao menor custo de mobilização de equipamento e de pessoal;
- Permitem a execução de estacas mais próximas às divisas devido às dimensões mais reduzidas da mesa rotativa;
- Não exigem carreta com elevada capacidade de carga de transporte;

- Podem operar em terrenos menos resistentes na superfície, já que as tensões aplicadas ao solo pela esteira são, normalmente, menores;

Devido ao conjunto de vantagens, têm substituído processos mais rudimentares e menos confiáveis, como, por exemplo, a estaca tipo *Strauss*, o que contribui para a melhoria da qualidade dos serviços de fundações.

A estaca hélice segmentada apresenta as seguintes desvantagens em relação à estaca hélice contínua:

- Maior limitação de diâmetros e profundidades;
- Menor produção diária, devida principalmente ao processo de segmentação dos trados durante as fases de perfuração e de extração da hélice e também devido à maior limitação de potência desses equipamentos;
- Exige maior cuidado do operador na fase de extração da hélice nos momentos de segmentação do trado, pois se não for garantida uma coluna de concreto no tubo central da hélice de sorte que a pressão na ponta da mesma seja positiva, poderá haver o seccionamento da estaca.

2.2.4.3 APLICAÇÕES

As estacas do tipo hélice segmentada estão sendo aplicadas, principalmente, nos seguintes casos:

- Nos centros urbanos, próximos de edifícios antigos, hospitais, escolas e outras edificações onde não é recomendada a utilização de processo que cause vibrações e ruídos elevados;
- Em estruturas de contenção, principalmente em divisas, com a utilização de estacas de pequenos diâmetros;
- Em locais onde equipamentos de maior porte não têm acesso.

2.3 ESTACA ESCAVADA

Em 1983 o autor deste trabalho iniciou o desenvolvimento de um equipamento para a execução de estacas escavadas de pequeno diâmetro (Figura 2.51), que resultou em patente do modelo, junto ao Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI). A rapidez na execução e o baixo custo de escavação das estacas fizeram com que os trados manuais fossem praticamente abolidos das obras residenciais. Por algum tempo essas estacas foram chamadas de “estacas brocas”.

A empresa brasileira Cló Zironi, fundada em 1976, atualmente com a razão social CZM Indústria de Equipamentos Ltda, desenvolveu e comercializou diversos modelos de perfuratrizes para a execução de estacas escavadas mecanicamente.



Figura 2.51 Perfuratriz M 500
(E.G.Barreto, 1987).

A perfuratriz CD 27, montada sobre caminhão, foi projetada para escavar fustes com diâmetros entre 0,25 m e 1,20 m e profundidade máxima de 17 m (Figura 2.52). O sucesso nas vendas deu grande impulso à empresa, possibilitando o desenvolvimento de uma série de outros equipamentos que até hoje estão contribuindo para a execução de fundações profundas em nosso país e até no exterior. Posteriormente, a empresa desenvolveu um modelo mais leve (Figura 2.53), para estacas e tubulões com diâmetro de até 0,80 m e profundidade de até 15 m.

No final da década de 80 a empresa E.G.Barreto Ltda desenvolve a linha “**H**” de perfuratrizes hidráulicas. Eram equipamentos autopropelidos e sobre rodas de pneus. Foram desenvolvidos os equipamentos H 800 e H 1000 que escavavam, respectivamente, estacas e tubulões com fustes de até 0,80 m e 1,00 m. A torre padrão permitia a escavação de até 12 m de profundidade, podendo ser prolongada para possibilitar a perfuração de estacas e tubulões com profundidade máxima de 17 m (Figuras 2.54 e 2.55). Esses modelos foram muito utilizados em obras onde o acesso com equipamentos sobre caminhões não era possível (Figura 2.56). A empresa Cló Zironi também lançou um modelo de perfuratriz autopropelida, sobre rodas de pneus. O modelo batizado de CL 07 pesava aproximadamente 35 kN, escavava estacas e tubulões com diâmetros de 0,25 m a 0,80 m e profundidade máxima de 15 m (Figura 2.57).



Figura 2.52 Perfuratriz CD 27
(Cló Zironi, 199-?).



Figura 2.53 Perfuratriz CD 17
(Cló Zironi, 199-?.)



Figura 2.54 Equipamento H 800
(E.G.Barreto, 1993).



Figura 2.55 Perfuratriz H 800 – Posição de transporte
(E.G.Barreto, 1994).



Figura 2.56 – H 1000 – Implantação em obra com
utilização de guindaste (E.G.Barreto, 199-?).



Figura 2.57 Perfuratriz CL -07. (Cló Zironi, 199-?).

Em seguida, os lançamentos da E.G.Barreto para a execução de estacas e tubulões em solos não saturados foram as perfuratrizes: MH 500 (Figura 2.58), HT 7 10 (Figura 2.59), HC 9 18 e HC 9 20 (Figuras 2.60 e 2.61), HT 9 16 (Figura 2.62) e HC 9 16 (Figura 2.63). A perfuratriz modelo MH 500 diferenciava-se das demais por ser bastante leve (27 kN), e pelo fato de ser composta por alguns acionamentos hidráulicos e outros mecânicos que resultavam em menor custo.

Esse desenvolvimento deveu-se à recessão experimentada pelas empresas de fundações, no final da década de 90 e no início do novo século.



Figura 2.58 – Perfuratriz MH 500 (E.G.Barreto, 1996).



Figura 2.59 Perfuratriz HT 7 10 (E.G.Barreto, 1997).



Figura 2.60 Perfuratriz HC 9 18 (E.G.Barreto, 1998).



Figura 2.61 Perfuratriz HC 9 20. (E.G.Barreto, 1999)

Em 2002 a empresa Cló Zironi lançou a perfuratriz modelo CD 20 com haste telescópica guiada em sua parte superior e sistema de empuxo axial que permitia a perfuração de estacas inclinadas (Figura 2.64). Com esse modelo podia-se escavar estacas e tubulões com diâmetros de 0,25 m a 1,00 m e profundidades de até 20 m.



Figura 2.62 Perfuratriz HT 9 16. (E.G.Barreto, 1999).



Figura 2.63 – Perfuratriz HC 9 16 (E.G.Barreto, 2001).



Figura 2.64 – Perfuratriz CD 20 P/PR (Cló Zironi, 2002).

Provavelmente, também devido às dificuldades econômicas das empresas pequenas e médias, a Cló Zironi desenvolveu uma perfuratriz de pequeno porte, sobre caminhão (Figura 2.65).



Figura 2.65 – Perfuratriz CD 12 (Cló Zironi, 2002).

Há alguns anos a empresa BS Tubos & Bombas Ltda iniciou a fabricação de equipamentos para fundações. A empresa, situada na cidade de Belo Horizonte, fabrica e comercializa dois modelos de perfuratrizes hidráulicas para estacas escavadas e tubulões, em solos. O modelo BS 1000 que perfura estacas entre 0,25 m e 1,00 m de diâmetro e com comprimentos de até 20 m (Figura 2.66) e o modelo BS 1200 que escava até 20 m de profundidade e até 1,20 m de diâmetro (Figura 2.67).



Figura 2.66 – Perfuratriz BS 1000 (BS Tubos & Bombas, 200-?).



Figura 2.67 – Perfuratriz BS 1200 (BS Tubos, 200-?).

Observa-se que os equipamentos nacionais apresentados foram desenvolvidos nas duas últimas décadas, havendo um importante avanço tecnológico em termos de equipamentos para estacas e tubulões escavados mecanicamente em solos não saturados. Entretanto, excetuando-se os equipamentos para estacas do tipo raiz, o desenvolvimento de equipamentos nacionais para execução de fundações profundas através de sistema rotativo e abaixo do nível do lençol freático é muito recente.

2.4 ESTACA *HOLLOW* – *AUGER*

Uma estaca concretada no local após ter sido escavada por um processo qualquer de perfuração que não garanta o confinamento do solo circundante à ferramenta de escavação, é chamada de estaca escavada. De acordo com esse conceito, a estaca *hollow-auger* pode ser considerada como uma estaca escavada. Esse tipo de fundação, embora pouco mencionado na literatura, apresenta especial interesse em situações especiais, como por exemplo, quando se necessita executar uma fundação profunda em local que apresenta interferência aérea e/ou altura livre limitada (pé-direito baixo), onde não é permitido o uso de água durante o processo de execução e ainda onde a utilização de estaca cravada é desaconselhada devido às questões de vibração, dificuldades de manobras e dimensões do equipamento, normalmente ligadas a esse tipo de fundação.

A estaca *hollow-auger* apresenta alguma semelhança com a estaca hélice segmentada pelo fato de ser executada com diversos segmentos de trados que vão sendo sobrepostos durante o avanço do helicóide no terreno. No entanto, não se trata de uma hélice segmentada, já que não é monitorada eletronicamente e normalmente o diâmetro interno do tubo central da hélice (150 a 200 mm) é maior que o utilizado na hélice segmentada que normalmente varia de 76 a 100 mm. Parece razoável que a previsão de capacidade de carga dessa estaca não deve ser feita como para a estaca raiz pelo fato de ocorrer maior desconfinamento do solo em relação à estaca raiz, já que os equipamentos utilizados, normalmente não disponibilizam torque elevado na mesa rotativa.

BARRETO, 2005 define a estaca *hollow-auger* como sendo uma estaca escavada que consiste na introdução no terreno de pequenos segmentos de trados até que o primeiro segmento introduzido no solo, o qual é provido de uma tampa de proteção em sua extremidade inferior, atinja a cota de apoio da estaca. Os segmentos de trado utilizados normalmente possuem comprimentos variáveis de 1,0 a 2,0 m.

A Figura 2.68 mostra a perfuratriz modelo B1F da empresa WIRTH Latina S.A., em operação com trado oco (*hollow-auger*). Observa-se que a lâmina da hélice tem altura reduzida e que o diâmetro interno do tubo central tem uma dimensão importante. Essa geometria é utilizada para que a relação entre a área da seção transversal da estaca e a área da seção transversal do furo central seja a menor possível. Com isso torna-se possível a extração do trado sem necessidade de monitoramento eletrônico. Essa metodologia de execução só é utilizada em casos especiais pelo fato do processo ser extremamente lento.



Figura 2.68 Estaca *hollow-auger*. Wirth (19--?).

Diversas empresas brasileiras disponibilizam o ferramental necessário à execução da estaca *hollow-auger*, sendo que o equipamento normalmente é o mesmo que executa estaca do tipo raiz. A Figura 2.69 mostra um trado do tipo *hollow-auger* montado em equipamento de estaca raiz.

Os trados ocios são ainda muito utilizados para a realização de ensaios de campo.

A Figura 2.70 mostra o equipamento HT 7 10 da E.G.Barreto, executando sondagens em um aterro sanitário na cidade de Leme - SP.

A empresa Alphageos, situada na cidade de Barueri-SP, especializada em geotecnia e geologia de engenharia possui equipamentos adquiridos da empresa americana CME (Figura 2.71). Esses equipamentos executam sondagens *SPT* e rotativas, poços de monitoramento do lençol freático e outros ensaios com utilização de trados *hollow-auger*.



Figura 2.69 – Equipamento sobre esteiras com trado *hollow-auger* (Cló Zironi, 199?).



Figura 2.70 Perfuratriz HT 7 10 – Execução de sondagens em aterro sanitário, no município de Leme – SP. (E.G. Barreto, 2004).



Figura 2.71 Sonda CME 55 que utiliza trado *hollow-auger* na execução de diversos ensaios. Alphageos (2000).

Na Figura 2.72 pode ser visto o detalhe da tampa de proteção da ponta de um trado *hollow-auger*, a qual é semelhante às utilizadas nos trados para estacas hélice contínua, diferenciando-se apenas nas suas dimensões que são maiores devido ao diâmetro interno do tubo central da hélice.



Figura 2.72 Detalhe da tampa de proteção da ponta de um trado *hollow-auger*. (E.G.Barreto, 2003).

2.5 ESTACA RAIZ

2.5.1 HISTÓRICO

Originalmente concebida com o objetivo de utilização em reforço de fundações, a técnica construtiva da estaca raiz promoveu uma completa mudança e grande ascensão desse campo de atuação da engenharia civil (Sodré, 1994). Foram empregadas primeiramente de modo a formar um reticulado e transformar o solo num solo armado (ALONSO, 1996). Daí a denominação *pali radice*, estaca raiz.

Desenvolvida e patenteada no início da década de 1950 pelo engenheiro Fernando Lizzi, diretor técnico da empresa FONDEDILE SpA., a estaca raiz foi o primeiro modelo de estaca injetada de pequeno diâmetro (LIZZI, 1982). As dimensões reduzidas dos equipamentos propiciavam o trabalho em locais de difícil acesso e altura mínima de pé-direito da ordem de três metros (FALCONI, GOTLIEB, 2000).

No Brasil, a tecnologia da estaca raiz foi introduzida pela empresa BRASFOND S.A., na década de 1970. Atualmente, várias empresas já utilizam esta tecnologia. No início de sua aplicação no Brasil, a estaca raiz, classificada sob a denominação de *estaca de pequeno diâmetro*, era executada com diâmetro nominal de até 200 mm. Ao longo de sua aplicação, houve uma tendência de se utilizar diâmetros cada vez maiores, chegando-se a até 500 mm (ALONSO, 1996). A NBR 6122:2010 apresenta para as estacas raiz os diâmetros nominais de 150 mm, 160 mm, 200 mm, 250 mm, 310 mm, 400 mm e 450 mm.

O crescimento do emprego de estacas raiz em território nacional tem promovido o interesse no estudo da tecnologia e comportamento destas fundações. Como exemplo, pode-se citar os trabalhos de MASSAD et al. (1981), LAMARE NETO (1985), CORRÊA (1988), CABRAL et al. (1991), CARVALHO (1991), ALONSO (1993), CARVALHO e CINTRA (1993), SODRÉ (1994), AMANN e MASSAD (2000), POLIDO *et al.* (2000), GOULART et al. (2004), OLIVEIRA et al. (2008).

2.5.2 MÉTODO EXECUTIVO

De acordo com a NBR 6122:2010, as estacas tipo raiz são aquelas em que a injeção da argamassa de cimento e areia é utilizada para moldar o fuste da estaca. As estacas raiz são revestidas integralmente, quando perfuradas em solos, sendo que o revestimento é recuperado.

Logo após o preenchimento da perfuração com o material aglutinante é aplicada pressão no topo com ar comprimido uma ou mais vezes, concomitantemente à retirada do tubo de revestimento. A estaca raiz é armada integralmente de modo que a armadura seja completamente envolvida pela argamassa injetada. Na estaca raiz, a armadura longitudinal é responsável por suportar uma grande parcela do carregamento aplicado à estaca. Por isso a área da seção transversal da armadura longitudinal da estaca raiz é maior do que nas estacas tradicionais.

Neste texto, o processo executivo de uma estaca raiz foi dividido em quatro etapas distintas: perfuração, colocação da armadura, injeção e retirada do revestimento. Estes processos são abordados a seguir.

2.5.2.1 PERFURAÇÃO

As estacas raiz têm como uma das principais características a possibilidade de execução em solos ou em rochas. Conforme o Manual de Especificações de Produtos e Procedimentos (ABEF, 1999), os equipamentos e acessórios necessários para a execução das estacas raiz devem ser definidos em função do material no qual a estaca raiz será executada.

Na perfuração, é utilizada uma tubulação munida de uma coroa com diâmetro ligeiramente maior que o diâmetro externo do tubo de revestimento. O revestimento é então introduzido no solo por meio da rotação produzida por uma perfuratriz (Figura 2.73).



Figura 2.73 Posicionamento e introdução do tubo de revestimento no terreno (EG BARRETO, 2005)

A perfuração em solo é realizada por rotação dos tubos com auxílio de circulação de água (ALONSO, 1996). Injeta-se água sob pressão na parte interna da tubulação, do topo para a base. A água retornará para o topo por meio do espaço existente entre a parede externa do revestimento e a parede da escavação. O material desagregado pela rotação do tubo é transportado para a região superior do fuste e para fora do furo juntamente com a água (Figura 2.74 e Figura 2.75). Se houver necessidade de realizar um pré-furo para facilitar a introdução do revestimento, deverá ser prevista a utilização do tricône (broca de três asas) (Figura 2.76).



Figura 2.74 Circulação de água (NEVES, BIESUZ & VENTURA, 2008)



Figura 2.75 Circulação de água (NEVES, BIESUZ & VENTURA, 2008).

O diâmetro do tricône deverá ser ligeiramente menor que o diâmetro interno do tubo de revestimento, com uma diferença máxima de 12,5 mm (ABEF, 1999).



Figura 2.76 Broca de três asas tipo tricône. (TECTOOLS, 200-?; EG BARRETO, 2010 e ROCKSMITH, 2011).

De acordo com JOPPERT JÚNIOR (2007), a instalação do revestimento pode ser parcial. Nesse caso, a perfuração abaixo do tubo pode ocorrer com a utilização do tricône com o auxílio de circulação de água ou com elementos estabilizantes das paredes das perfurações.

Se o processo de perfuração atingir um matacão ou o topo rochoso (rocha branda), a partir deste ponto utiliza-se coroa, de metal duro, ou diamantada (Figura 2.77).

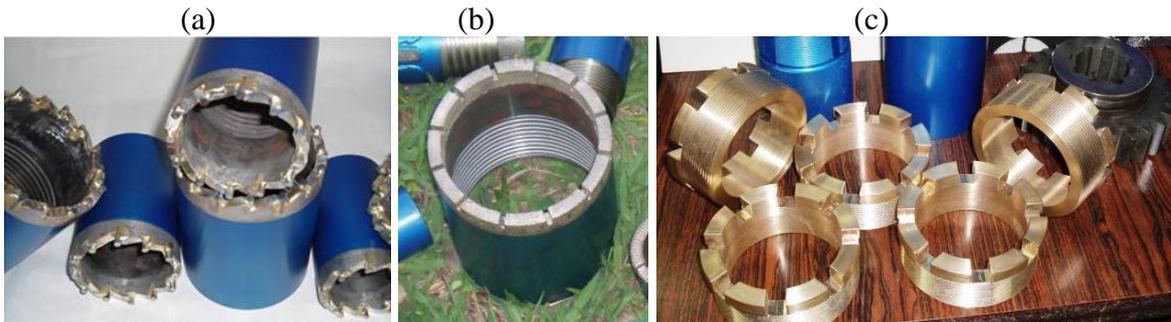


Figura 2.77 Sapata com ponta (a) em metal duro; (b) e (c) diamantada. (SIRLEI PERFURAÇÕES, 2010).

Como alternativa ao uso da coroa diamantada nas perfurações em rocha, pode ser utilizado martelo de fundo do tipo DTH (*down the hole*). O martelo de fundo é equipado com um *bit* de botão em sua extremidade inferior e geralmente é acionado por ar comprimido (Figura 2.78). A ferramenta é introduzida internamente ao tubo de revestimento e é acoplada às hastes de perfuração, imprimindo um movimento rotopercussivo às hastes (ABEF, 1999).

2.5.2.2 INSTALAÇÃO DA ARMADURA

Terminada a perfuração, continua-se a injetar água sem que a perfuração avance. Esse procedimento visa promover a limpeza do furo. Após essa limpeza a armadura é introduzida no fuste, internamente ao tubo de revestimento (Figura 2.79).

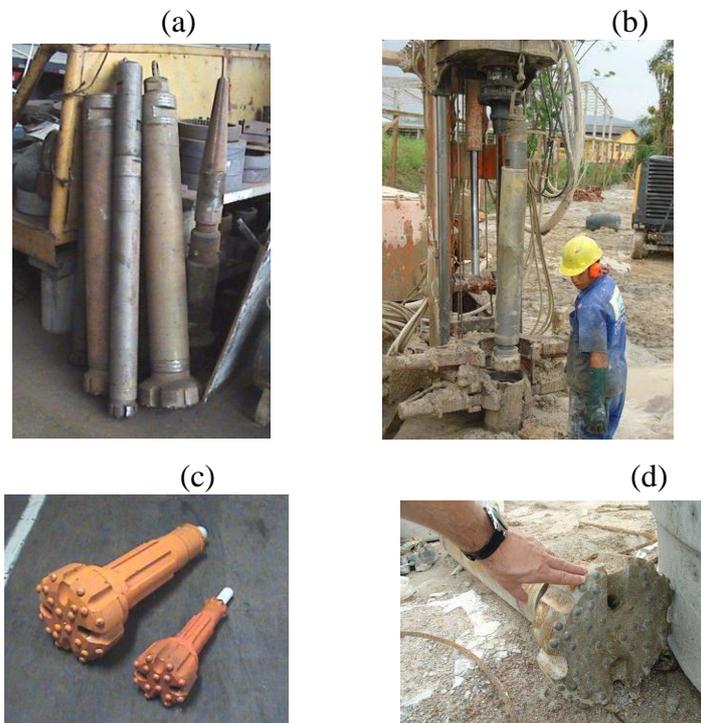


Figura 2.78 (a) martelos de fundo (E. G. BARRETO, 2010); (b) utilização do martelo de fundo bit de botão (LEITE; GIRARDI; SOUZA, 2007); (c) bits de botão (E. G. BARRETO, 2010) e (d) bit de botão (LEITE; GIRARDI; SOUZA, *op. cit.*).

Se o diâmetro da seção transversal da estaca for maior que 160 mm, é utilizada uma armadura de aço, normalmente CA-50, constituída por barras longitudinais e estribos helicoidais.

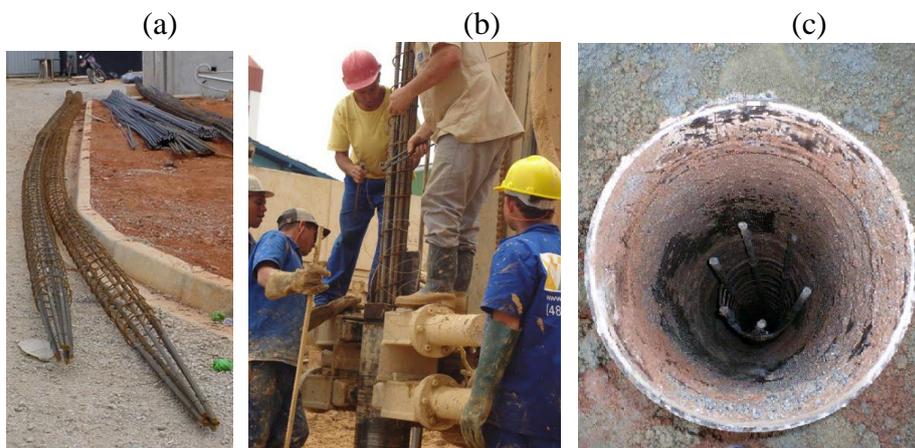


Figura 2.79 (a) armadura (EG BARRETO, 2007); (b) colocação da armadura (NEVES, BIESUZ & VENTURA, 2008) e (c) armadura colocada (LEITE, GIRARDI & SOUZA, 2007).

O diâmetro externo dos estribos deve ser definido de forma a garantir um cobrimento mínimo de 20 mm entre a face interna do revestimento e a face externa do estribo. Elementos espaçadores devem ser instalados para garantir o cobrimento da armadura da estaca.

2.5.2.3 INJEÇÃO DA ARGAMASSA

Após a instalação da armadura, deve haver espaço interno suficiente para a introdução do tubo de injeção no tubo de revestimento até o final da perfuração (Figura 2.80). De acordo com ALONSO (1996), o tubo de injeção do material de preenchimento do fuste é geralmente feito de PVC, com diâmetro da seção transversal entre 30 e 40 mm.



Figura 2.80 Introdução do tubo de injeção. (LEITE; GIRARDI; SOUZA, 2007).

O preenchimento do fuste é realizado com a utilização de argamassa fluida de cimento e areia. A argamassa é injetada por meio do tubo de injeção no fundo da escavação, por gravidade ou sob pressão, de baixo para cima (Figura 2.81).

O furo da escavação deve ser totalmente preenchido, permitindo-se que a argamassa injetada extravase pelo topo (Figura 2.82). Dessa maneira, a água da circulação e as impurezas remanescentes do processo de perfuração são expulsas do furo. O processo de injeção deve ser interrompido apenas quando a argamassa emergente sair limpa, ou seja, sem sinais de contaminação de lama ou detritos (ABEF, 1999).



Figura 2.81 Injeção da argamassa. (EG BARRETO, 2007).



Figura 2.82 Extravasamento da argamassa injetada. (LEITE, GIRARDI & SOUZA, 2007).

2.5.2.4 RETIRADA DO TUBO DE REVESTIMENTO

Ao completar o preenchimento da estaca com argamassa, o revestimento deve ser extraído por ação coaxial ao eixo da estaca. A força necessária para extrair o revestimento pode ser aplicada pela própria perfuratriz, quando o equipamento possuir capacidade para tal (Figura 2.83). Caso não se utilize perfuratriz, o revestimento pode ser extraído com a utilização de dois macacos hidráulicos verticais, apoiados no terreno, em posição diametralmente oposta. Esses macacos, com mesma geometria, são acionados por uma central hidráulica e reagem contra uma travessa metálica que é solidarizada ao revestimento (TAROZZO e GRANDIS, 2000).

Uma tampa metálica é rosqueada na extremidade superior do revestimento e ligada a um compressor de ar. Sobre a argamassa, aplicam-se golpes de ar comprimido a pressões de 0,05 a 0,40 MPa (JOPPERT, 2007). De acordo com a ABEF (1999), a aplicação de ar comprimido deve ser feita por meio de pressões de 0,3 a 0,5 MPa. Contudo, segundo TAROZZO & GRANDIS (2000), a injeção de ar comprimido vem sendo substituída pela injeção da argamassa já submetida à pressão, exercida pela própria bomba da argamassa. Os autores afirmam ainda que esse processo apresenta o mesmo resultado da injeção de ar caso executado cuidadosamente e da mesma maneira quando se utiliza ar comprimido.

A ABEF (1999) recomenda que a tampa metálica para aplicação de ar comprimido deve ser colocada a cada 4,0 m de tubos de revestimento extraídos do terreno, ou no mínimo três vezes por estaca: ponta inferior, metade do comprimento da estaca e a 2,0 m de profundidade a partir da superfície do terreno.

No caso de utilização de bomba de injeção de argamassa, injeta-se a argamassa sob pressão mínima de 0,3 MPa (ABEF, 1999). Assim, não haverá necessidade de aplicação de ar comprimido.

Quando a perfuratriz possui duas morsas, que ficam na parte inferior de sua torre, o tubo a ser desacoplado é preso à morsa superior enquanto que o tubo inferior é preso à outra morsa, de modo que a rosca dos tubos fique posicionada entre as duas morsas. Em seguida, a morsa superior, aplica o torque necessário para desprender o tubo.

Se a perfuratriz for dotada de apenas uma morsa, esta será utilizada para prender o tubo de baixo ao qual será retirado. O torque necessário para desprender o tubo é aplicado por ferramenta apropriada e alavanca ou corrente e alavanca (Figura 2.84).



Figura 2.83 Extração do tubo de revestimento. (NEVES, BIESUZ & VENTURA, 2008).



Figura 2.84 Desacoplamento do revestimento com uso de corrente. (EG BARRETO, 2007).

2.5.3 GENERALIDADES SOBRE OS EQUIPAMENTOS

2.5.3.1 CONSTITUIÇÃO

Os equipamentos utilizados na execução das estacas do tipo raiz serão definidos em função do tipo de material a ser perfurado.

- Estaca raiz em solos

- a) Perfuratriz rotativa hidráulica, mecânica ou a ar comprimido, acionada por motor movido à combustão interna, elétrico ou compressor pneumático.
 - b) Estrutura metálica, montada ou não sobre esteiras para deslocamento;
 - c) Unidade de força movida à combustão interna, eletricidade ou ar comprimido;
 - d) Conjunto misturador de argamassa;
 - e) Bomba de injeção de argamassa;
 - f) Compressor de ar¹, com vazão mínima de 22 l/min (5 pés cúbicos por minuto) e pressão máxima de 0,5 MPa (ABEF, 1999);
 - g) Bomba de água;
 - h) Macaco hidráulico para extração do revestimento;
 - i) Conjunto de acionamento hidráulico;
 - j) Reservatórios para acumulação de água;
 - k) Conjunto gerador de energia, eventualmente.
-
- Estaca raiz em solos e em rochas
 - a) Os mesmos listados para estaca raiz em solos;
 - b) Martelo de superfície;
 - c) Martelo de fundo tipo DTH;
 - d) Compressor de ar destinado à operação dos martelos.

As máquinas com transmissão mecânica possuem altura, largura e comprimento que variam de 2,00 m a 2,80 m, de 1,20 m a 1,35 m e 1,50 m a 2,25 m, respectivamente. O curso do cabeçote de perfuração varia de 1,00 m a 2,00 m. O peso e dimensões das máquinas são tais que permitem seu deslocamento à mão e em geral passam através das portas normais das diversas edificações (SODRÉ, 1994).

A potência dos motores movidos a eletricidade varia de 20 a 30 kW (30 a 40 CV). Segundo SODRÉ (1994), com este equipamento e utilização de coroas especiais de perfuração (diamantada ou com pastilhas de metal duro), não ocorrem problemas na perfuração através de alvenaria, rochas, concreto armado, matacões, etc.

Nas máquinas de acionamento hidráulico, a perfuratriz pode ser montada sobre trator de esteiras. A perfuratriz é equipada com um motor de combustão interna, a diesel, para sua locomoção, para o acionamento da central hidráulica e dos motores hidráulicos responsáveis

¹ Seu uso não é necessário em caso de utilização de bomba de injeção de argamassa. Essa bomba deverá aplicar a argamassa com pressão mínima de 0,3 MPa.

pela movimentação da plataforma e da cabeça de perfuração. A torre da máquina é inclinável, permitindo a execução de estacas inclinadas.

2.5.3.2 COMPARAÇÃO COM PROCESSOS EXECUTIVOS DE OUTRAS ESTACAS

A estaca do tipo raiz apresenta as seguintes vantagens em relação aos tipos tradicionais de estacas:

- Perfurar através de solo e rocha;
- Injeção da argamassa pela base para a superfície;
- Possibilidade de aplicação de golpes de ar comprimido sobre a argamassa;
- Possibilidade de injeção da argamassa sob pressão;
- Atuação em locais de difícil acesso e baixo pé-direito (mínimo de 2,00 m);
- Execução de estacas inclinadas;
- Pode ser executada abaixo do nível de água (NA) do terreno;
- Algumas perfuratrizes podem trabalhar em terrenos inclinados;
- Maior capacidade de carga em relação às estacas tradicionais de mesmo diâmetro em mesmo substrato.

São conhecidas as seguintes desvantagens:

- Utilização de grandes volumes de água para limpeza do fuste;
- Baixa produtividade;
- Necessidade de remoção do material escavado;
- Possui baixa resistência à flexão;
- Alto custo por metro linear de estaca;

2.5.3.3 APLICAÇÕES

As estacas raiz têm sido aplicadas, principalmente, nos seguintes casos:

- Nos centros urbanos, próximos de edifícios antigos, hospitais, escolas e outras edificações onde seria desaconselhável a utilização de equipamentos que produzam vibrações e ruídos excessivos;
- Em locais de difícil acesso onde equipamentos para execução de outros tipos de estaca não podem ser utilizados;
- Em obras de reforço de fundações de edifícios antigos ou que apresentam problemas de fundação;

- Em terrenos com solos resistentes, rochas ou matacões, onde os equipamentos dos demais tipos de fundação não conseguem perfurar.

2.5.4 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos destinados à execução de estaca raiz também possuem outras aplicações, como execução de colunas com a tecnologia *Jet Grouting*, microestacas, tirantes e estaca do tipo *hollow-auger*. O mercado internacional disponibiliza uma grande variedade de equipamentos. No mercado brasileiro podem ser citadas as empresas: CZM, BS INDÚSTRIA, FLUID POWER e CMV.

2.5.4.1 EQUIPAMENTOS Cló Zironi

Essas máquinas desenvolvidas pela empresa brasileira Cló Zironi (atual CZM) são destinadas à execução de estacas raiz, microestacas, tirantes e estacas escavadas tipo *hollow-auger*. Os equipamentos podem executar estacas com diâmetro máximo de 200 a 455 mm. Possuem potência instalada de 41 a 103 kW (55 a 140 CV), torque máximo aplicado pela mesa rotativa de 2,5 a 20 kNm e força de extração de 35 a 120 kN. As Figuras 2.85 e 2.86 apresentam duas perfuratrizes comercializadas pela Cló Zironi, atualmente com a razão social CZM Indústria de Equipamentos Ltda.



Figura 2.85 Perfuratriz CR140.
(CLÓ ZIRONI, 2006).



Figura 2.86 Perfuratriz CR160.
(CLÓ ZIRONI, 2006).

2.5.4.2 EQUIPAMENTOS CZM

A CZM, empresa brasileira, comercializa perfuratrizes para execução de estacas raiz, com

potências entre 54 e 108 kW (73 a 145 CV), capazes de aplicar torques máximos de 6,6 a 18,85 kNm. A Figura 2.87 apresenta o modelo MC140 na qual é possível observar o equipamento em posição de transporte e também seu painel de comandos hidráulicos. A Figura 2.88 mostra a perfuratriz MC180 com a utilização de martelo de fundo.



Figura 2.87 Perfuratriz MC140 em posição de transporte. (CZM, 200-?).



Figura 2.88 Perfuratriz MC180 em atividade com martelo de fundo. (CZM, 200-?).

2.5.4.3 EQUIPAMENTOS BS INDÚSTRIA

A empresa BS Indústria, de origem nacional, fabrica equipamentos destinados à execução de estacas raiz que também executam estacas *hollow-auger*. Os equipamentos disponibilizam potências entre 30 a 60 kW (40 a 80 CV). A mesa rotativa destas perfuratrizes pode aplicar um torque máximo de 2,6 a 45 kNm.

Segundo o fabricante, com o torque de 45 kNm aplicado pela perfuratriz BS 450 e uma torre de que permite um curso de 4,25 m do cabeçote rotativo, é possível chegar a 40 metros de profundidade da perfuração com o tubo de revestimento com diâmetro até 400 mm (Figura 2.89). As Figuras 2.89 e 2.90 mostram, respectivamente, os modelos BS450 e BS280 comercializados pela empresa.



Figura 2.89 Perfuratriz BS450.
(BS INDÚSTRIA, 2008).



Figura 2.90 Perfuratriz BS280.
(BS INDÚSTRIA, 2008).

2.5.4.4 EQUIPAMENTOS CMV

A empresa CMV, de origem italiana, produz equipamentos para execução de estacas raiz, jet grouting, microestacas e tirantes.

A máxima potência dos equipamentos varia de 46 a 141 kW (62,5 a 160 CV), a força de extração varia de 37,5 a 220 kN e *pull-down* de até 120 kN. Esses equipamentos podem realizar perfurações com diâmetros máximos que variam de 220 a 620 mm, aplicando um torque máximo pela mesa rotativa de 4,5 a 30 kNm.

A Figura 2.91 apresenta a perfuratriz MK 420, a de menor porte comercializada pela CMV. A perfuratriz MK 800C, mostrada na Figura 2.92, é composta por duas unidades: uma unidade de perfuração e uma unidade com motor hidráulico. O equipamento foi projetado com o objetivo de trabalhar em locais restritos, com dificuldade de acesso e baixo pé direito.



Figura 2.91 Perfuratriz MK 420. (CMV, 2008).



Figura 2.92 Perfuratriz MK 800C. (CMV, 2008).

Dentre os modelos de perfuratriz para estacas raiz, a de maior porte é a MK 2000, série D (Figura 2.93 e Figura 2.94) e série M (Figura 2.95). Trata-se de um equipamento autopropelido com uma torre que permite um curso do cabeçote rotativo de até 6,70 m.



Figura 2.93 Perfuratriz MK 2000D em execução de estaca raiz. (CMV, 2008).



Figura 2.94 Perfuratriz MK 2000D em execução de *Jet Grouting* (CMV, 2008).



Figura 2.95 Perfuratriz MK 2000M. (CMV, 2008).

2.5.4.5 EQUIPAMENTOS SOILMEC

Dentre os equipamentos fabricados pela empresa, tem-se aproximadamente uma dezena de perfuratrizes destinadas à execução de estacas raiz, microestacas, tirantes (inclusive para aplicações em túneis) e *jet grouting*. A máxima potência dos motores diesel desses equipamentos varia de 71 a 200 kW (96 a 272 cv), com força de extração máxima e *pull-down* de 40 a 120 kN. O torque máximo aplicado pelo cabeçote de rotação varia de 9,72 a 26,22 kN entre os equipamentos. As Figuras 2.96 a 2.99 apresentam dois dos equipamentos da Soilmec.



Figura 2.96 Perfuratriz PSM 8B.
(SOILMEC, 2008).



Figura 2.97 Perfuratriz PSM 8B.
(SOILMEC, 2008).



Figura 2.98 Perfuratriz SM5.
(SOILMEC, 2008)



Figura 2.99 Perfuratriz SM5.
(SOILMEC, 2008)

2.5.4.6 EQUIPAMENTOS CASAGRANDE

A Casagrande fabrica diversas perfuratrizes destinadas à execução de estacas raiz, microestacas e *jet grouting*. A potência instalada dessas máquinas varia de 90 a 165 kW (122 a 220 CV), o torque máximo aplicado pela mesa rotativa entre 8,2 e 165 kNm e a máxima força de extração entre 30 e 140 kN. A Figura 2.100 mostra o menor equipamento destinado a execução de estacas raiz, diâmetro máximo de perfuração de 254 mm. A Figura 2.101 apresenta o equipamento de maior porte fabricado pela Casagrande, que tem um cabeçote de perfuração com torque máximo de 55 kNm. A Figura 2.102 mostra a perfuratriz C4 em serviço, próximo à estrutura existente. A Figura 2.103 mostra a perfuratriz C8.



Figura 2.100 Perfuratriz M3 E. (CASAGRANDE, 2006).



Figura 2.101 Perfuratriz C14. (CASAGRANDE, 2006).



Figura 2.102 Perfuratriz C4. (CASAGRANDE, 2006).



Figura 2.103 Perfuratriz C8. (CASAGRANDE, 2006).

2.5.4.7 EQUIPAMENTOS TESCAR

Dentre as perfuratrizes destinadas à execução de estacas, a empresa Tescar, de origem italiana, também fabrica alguns modelos para escavação de estacas do tipo raiz. São, no geral, perfuratrizes de pequeno porte quando comparadas às de outros fabricantes. Alguns equipamentos são fabricados com a unidade de perfuração separada da unidade hidráulica

(Figura 2.104) e outros são comercializados em versões compactas (Figura 2.105 e Figura 2.106). A potência dos motores a diesel varia de 23 a 84 kW (35 a 115 CV). Nesses equipamentos, a mesa rotativa pode aplicar um torque máximo de 2,2 a 18 kNm e o guincho principal pode fornecer forças de extração máxima de 15 a 60 kN.



Figura 2.104 Perfuratriz TES20. (TESCAR, 200-?).



Figura 2.105 Perfuratriz TES20 *Compact*. (TESCAR, 200-?).



Figura 2.106 Perfuratriz TES40. (TESCAR, 2000).

2.5.4.8 EQUIPAMENTOS MC DRILL TECHNOLOGY

Esta empresa, de origem italiana, fabrica três equipamentos destinados à execução de estacas raiz, microestacas e *jet grouting*. A potência dos equipamentos é de 119 e 147 kW (162 e 200 CV). O torque máximo aplicado pela mesa rotativa é de 15 kNm. A força de extração máxima do guincho principal é de 70 e 100 kN. As Figuras de 107 a 109 mostram os três equipamentos produzidos pela empresa.



Figura 2.107 Perfuratriz MDT80B.
(MC DRILL TECHNOLOGY, 200-?).



Figura 2.108 Perfuratriz MDT 140B.
(MC DRILL TECHNOLOGY, 200-?).



Figura 2.109 Perfuratriz MDT 180B.
(MC DRILL TECHNOLOGY, 200-?).

2.6 CONTRIBUIÇÕES PARA A PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTACAS

A obtenção de resultados concordantes entre a previsão e o comportamento real de uma estaca ainda é um desafio para os engenheiros geotécnicos, embora muitos trabalhos tenham sido desenvolvidos nesse sentido.

A seguir são citados alguns trabalhos que tratam da questão do comportamento de elementos de fundações profundas.

POULOS & DAVIS (1968) propuseram um método de previsão de recalques de uma estaca de seção transversal circular, carregada axialmente. O método foi desenvolvido com base na equação de Mindlin e as hipóteses adotadas supõem, a linearidade entre as tensões e deformações, solo homogêneo e estaca incompressível.

VÉSIC (1969, 1975A) desenvolveu um método semi-empírico baseado na forma de distribuição do atrito lateral e do tipo de estaca. O recalque total é obtido somando-se o recalque devido ao encurtamento elástico da estaca, o recalque do solo devido à carga de ponta da estaca e o recalque devido às cargas de atrito ao longo do fuste.

AOKI e LOPES (1975) propuseram um método para a previsão de recalques e tensões em pontos no interior do maciço de solo para estacas e/ou tubulões, isolados ou em grupos, fazendo-se a discretização das cargas transmitidas aos elementos da fundação e determinando-se as tensões e recalques de um determinado ponto através da superposição dos efeitos. O método levou em conta as cargas de ponta e aquelas devido ao atrito lateral e utiliza a equação de Mindlin para a obtenção das tensões e dos deslocamentos.

DÉCOURT (1995) desenvolveu um método empírico de previsão da curva carga-recalque que pode ser aplicado para estacas escavadas e estacas de deslocamento.

ALBUQUERQUE (2001) estudou o comportamento de três tipos de estacas, executadas no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade de Campinas (UNICAMP). Foram instaladas e ensaiadas à compressão, nove estacas, sendo três estacas escavadas com trado mecânico (sem uso de lama bentonítica), três estacas hélice contínua e três estacas de deslocamento do tipo ômega. Todas as estacas foram executadas com comprimento de 12 m e os diâmetros nominais utilizados foram de 40 cm para as estacas escavadas e hélice contínua e de 36 cm para as estacas ômega. Foram feitas provas de carga estáticas dos tipos lentas e rápidas sendo que os deslocamentos máximos obtidos foram da ordem de 120 mm, ou seja, 30% dos diâmetros das estacas. As estacas foram instrumentadas ao longo da profundidade com extensômetros elétricos, situados da superfície do solo a 0,30 m (seção de referência), 5,0 m, 11,1 m e 11,7 m. ALBUQUERQUE relatou a dificuldade que teve em instrumentar as estacas do tipo hélice contínua e ômega, devido a seus processos executivos que exigem a instalação da instrumentação somente após a concretagem. Os dados fornecidos pela instrumentação permitiram constatar que a maior parte da carga aplicada no topo das estacas foi absorvida por atrito lateral. Nos ensaios lentos, as estacas escavadas forneceram valores médios de carga de ruptura da ordem de 682 kN; as estacas hélice contínua, de 885 kN e as estacas ômega, de 1428 kN. Em termos percentuais as resistências de ponta foram de 2% para as estacas escavadas, 7% para as estacas hélice contínua e de 14% para as estacas ômega. Os valores das cargas de ruptura obtidos nas provas de carga foram superiores aos obtidos através dos métodos de previsão empíricos e teóricos.

DÉCOURT (1993) verificou que o atrito lateral unitário para as estacas, hélice contínua e cravadas, é da mesma ordem de grandeza.

ANTUNES e CABRAL (1996) constataram que o comportamento da estaca hélice contínua está mais próximo da estaca cravada do que da estaca escavada, no entanto esses autores mostraram a preocupação no que se refere à resistência de ponta e à pequena quantidade de resultados de provas de carga.

PFEIFFER et al. (1993) constataram que o atrito lateral da estaca hélice contínua é bastante depende da velocidade de penetração da hélice e do tempo de execução da estaca.

Segundo BUSTAMANTE e GIANESELLI (1998), as estacas executadas por processo rotativo em que ocorre o deslocamento do solo, chamadas pelos autores *screw piles*, apresentam resistências por atrito lateral maiores que as estacas escavadas, exatamente devido ao processo executivo utilizado. Podem ser citadas as estacas dos tipos, Atlas, De Wall e Spire. Segundo esses autores a instalação desses tipos de estacas necessitam de equipamentos que disponibilizam potências acima de 450 cv, torques de 150 a 450 kNm combinados com forças axiais de compressão na composição de hastes que variam de 50 a 250 kN.

O processo executivo da estaca *screw pile*, que na norma NBR 6122:2010 é denominada hélice de deslocamento, é semelhante ao processo da estaca hélice contínua, diferenciando-se dessa pelo maior torque exigido na mesa rotativa, necessidade de empuxo axial (*pull-down*) e utilização de uma haste vazada, sem helicóide, que é montada sobre a ferramenta de deslocamento do solo.

Segundo ALBIERO (1990), a maioria dos engenheiros geotécnicos brasileiros utilizam para a previsão de capacidade de carga de elemento isolado de fundação, fórmulas empíricas baseadas nos resultados de ensaios *SPT*, sendo que as mais usadas são as de AOKI-VELLOSO (1975), DÉCOURT-QUARESMA (1978), PEDRO PAULO VELLOSO (1981) e MEYERHOF (1976).

ALONSO (1996) propôs um método de previsão da capacidade de carga por atrito lateral de estacas com base nos valores de torques medidos no ensaio *SPT-T*.

KAREZ e ROCHA (2000) propuseram um método baseado na análise de 38 provas de carga realizadas na região sul-sudeste do Brasil, utilizando resultados de sondagem a percussão (*SPT*).

VELLOSO e VORCARO (2000a) apresentaram um método probabilístico para a previsão de capacidade de carga da estaca hélice contínua. Os autores utilizaram um banco de dados de provas de carga.

VELLOSO e VORCARO (2000b) propuseram um método com as mesmas premissas do primeiro método desenvolvido pelos mesmos autores, para a previsão de capacidade de carga de estacas escavadas.

BUSTAMANTE e GIANESELLI (1998) apresentaram uma metodologia para a previsão das resistências de ponta e por atrito lateral de estaca ômega com base nos ensaios CPT, SPT e Pressiômetro de Ménard.

AOKI (1986) apresentaram casos de obras onde as capacidades de carga de estacas pré-fabricadas de concreto centrifugado foram controladas *in-situ* através de medidas de repique elástico obtido durante o final da cravação. Estes valores medidos foram comparados com as previsões e resultados de provas de carga estáticas e dinâmicas. Para o caso da obra de uma base para um tanque de álcool, na Petrobrás de Brasília, verificou-se que o repique elástico constituiu-se em medida confiável para o controle da capacidade de carga *in-situ*.

AOKI (1997) aplicou o conceito de energia complementar para a obtenção da capacidade de carga última de estaca cravada no ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente. O desenvolvimento da pesquisa teve início em AOKI (1989), com a proposição de um novo conceito de prova de carga dinâmica. Foram aplicados golpes de energia crescente, instrumentados pelo *PDA*, para o traçado da curva capacidade de carga mobilizada *versus* deslocamento dinâmico, semelhante à curva carga-recalque obtida em uma prova de carga estática. O objetivo foi estudar a evolução de repiques e negas com o aumento do nível de energia aplicada ao sistema. AOKI (1997) demonstrou que nem sempre é possível determinar a capacidade de carga última de uma estaca por meio de um único impacto e que a capacidade de carga última torna-se constante quando a energia complementar passa em um máximo.

Segundo AOKI (1997) a energia complementar (V_c) tende para um valor constante quando a energia de deformação total (V) e o recalque (S) tendem para o infinito o que significa dizer que a capacidade de reação do sistema tornou-se constante.

CINTRA e AOKI (2010) apresentaram um texto referente a parte das aulas da disciplina "Fundações" ministrada pelos dois autores durante 15 anos, no curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. O trabalho (livro) aborda itens fundamentais da engenharia de fundações tais como capacidade de carga, carga admissível, recalques e probabilidade de ruína.

ALBUQUERQUE (2001) apresenta os métodos mais conhecidos de previsão de capacidade de carga de estacas.

2.7 ENSAIOS DE CAMPO

2.7.1 SPT – *STANDARD PENETRATION TEST*

Segundo BELINCANTA (1998) não há como desenvolver projetos de fundações em geral sem investigações de campo e cita o ensaio SPT como um ensaio corrente em nosso país para a obtenção de parâmetros necessários a tais projetos.

BELINCANTA (1998) foi o pioneiro no Brasil nas medidas de eficiência do *SPT*. Esse autor avaliou os fatores intervenientes no ensaio tais como, o tipo do martelo, o dispositivo para queda livre (quando existente), o uso de roldana móvel, o tamanho da cabeça de bater, o estado de conservação da composição das hastes e o uso ou não do coxim de madeira. Além dos fatores intervenientes no ensaio, o autor avaliou os métodos variantes que foram divididos em procedimentos. O primeiro consiste no uso de martelo cilíndrico com coxim de madeira, operado manualmente com corda de sisal e roldana fixa. Nesse caso a perfuração é feita com trado helicoidal até o nível d'água e abaixo do N.A. com circulação de água. Essa metodologia era recomendada pela NBR 6484:1980. O segundo se diferencia do primeiro quanto ao acionamento do martelo que se faz com cabo de aço manual, auxiliado por uma roldana fixa e o terceiro procedimento consiste em executar a sondagem com avanço da perfuração pela cravação sucessiva do próprio amostrador.

Embora o autor tenha tido dificuldades nas medidas e nos cálculos da energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, pode-se observar a grande influência nos resultados de resistências à penetração do amostrador *SPT* em função dos fatores intervenientes considerados.

Segundo FLETCHER (1965) e BROMS & FLODIM (1988), foi Charles R. Gow quem introduziu o processo retirada de amostras em posições de interesse, através da cravação de um tubo de diâmetro nominal de 25,4 mm (1") com martelo de 50 kg de massa. Dessa forma os autores melhoraram o processo de obtenção de amostras em sondagem de simples reconhecimento que, até então, era feito pelo recolhimento de detritos oriundos da perfuração com circulação de água. FLETCHER (1965) estabelece 1902 como o ano do início dos processos dinâmicos de cravação para obtenção, portanto, sem a circulação de água.

Segundo MOHR (1966) o martelo de 63,5 kg surgiu na década de 1920. Esse peso era aproximadamente igual à média dos pesos dos martelos utilizados na região de Boston, sendo que na época, era permitido nos Estados Unidos que tais martelos fossem levantados manualmente com auxílio de corda e roldana fixa até a altura de queda de 762 mm por dois ajudantes.

No desenho apresentado por MOHR (1966) pode-se constatar que o martelo utilizado no início dos ensaios *SPT* era prismático e de concreto. O coxim era de madeira dura e dotado de pino guia.

Segundo BELINCANTA (1998) a técnica de cravação do amostrador se firma como ensaio no início dos anos trinta, quando FLETCHER e MOHR padronizaram o martelo de 63,5 kg, altura de queda de 762 mm e o resultado do ensaio como sendo o número de golpes necessários à cravação do amostrador no solo por 305 mm.

TERZAGHI e PECK (1948) descreveram o procedimento de execução da sondagem de simples reconhecimento com perfuração por circulação de água, utilizando-se revestimento de 63,5 mm de diâmetro, hastes de 25,4 mm e amostrador do tipo Raymond de 52 mm e 35 mm de diâmetro externo e interno, respectivamente. Segundo esses autores, a forma mais simples de se obter informações sobre o grau de compacidade do solo *in situ* seria contar o número de golpes do martelo de 63,5 kg, caindo de uma altura de 762 mm, necessários para cravar 305 mm o amostrador do tipo Raymond de 51 mm de diâmetro externo, sendo que o amostrador deveria ser cravado 152 mm, antes do início da contagem dos golpes. A esse procedimento os autores acima deram o nome de *SPT – Standard Penetration Test*.

A tentativa de norma D1586-63T da ASTM, definiu a resistência à penetração como sendo o número de golpes necessários à cravação do amostrador no solo das duas últimas parcelas de 152 mm após uma penetração inicial de 152 mm à qual é chamada de assentamento. Em 1967 essa norma passou a ser definitiva.

As fases mais importantes da história nacional e internacional do SPT são apresentadas por BELINCANTA (1998).

Segundo QUARESMA (1974) a padronização do equipamento e do procedimento de ensaio não é suficiente para a padronização de resultados de sondagens a percussão, sendo obrigatório que a empresa tenha uma boa estrutura para o preparo de sondadores.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em fevereiro de 2001 publicou a nova versão da NBR 6484, com validade a partir de 30 de março de 2001, que substituiu a NBR 6484:1980 e cancelou a NBR 7250:1982 – Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos.

Segundo CAVALCANTE (2002) o professor DIRCEU de ALENCAR VELLOSO comentou em uma de suas aulas da disciplina de Fundações, na Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, em 1998, que de nada adiantaria a utilização dos melhores recursos de microeletrônica e dos sofisticados programas para o cálculo de capacidade de carga e de recalques das fundações, se os dados de entrada fossem obtidos de maneira grosseira e sem nenhum controle. CAVALCANTE (2002) fez um estudo teórico-experimental de vários aspectos associados à transferência de energia no *SPT*, enfatizando o efeito do comprimento da composição de hastes. Os resultados dos ensaios mostraram que a eficiência da energia

transmitida à extremidade superior da composição de hastes (cabeça de bater) independe do seu comprimento e da resistência do solo. CAVALCANTE (2002) observou ainda que houve diferença entre a energia medida no topo das hastes e aquela que atinge o amostrador.

A questão da energia que atinge o amostrador é marcada pelos trabalhos de PALACIOS (1977), SCHMERTMAN (1976, 1978, 1979) e SCHMERTMAN & PALACIOS (1979). Em seguida aparecem os trabalhos de KOVACS (1979, 1980, 1981 e 1994), KOVACS & SALOMONE (1982 e 1984) e KOVACS et al. (1977 e 1978).

SKEMPTON (1986) propôs a utilização de um fator de correção do valor de N_{spt} em função do comprimento da composição de hastes. O fator proposto por SKEMPTON (1986) foi de 0,75 para comprimento de haste entre 3 e 4 m; 0,85 para comprimento de haste entre 4 e 6 m; 0,95 para comprimento de haste entre 6 e 10 m e 1,00 para comprimento de haste maior que 10 m.

MATSUMOTO & MATSUBARA (1982), DÉCOURT (1989) e AOKI e CINTRA (2000) acharam desnecessária a correção nos valores de N_{spt} devido ao suposto efeito do comprimento da composição de hastes.

Segundo TEIXEIRA (1993) o trabalho de TEIXEIRA (1974) serviu de apoio para a elaboração da primeira norma brasileira oficial (MB 1211:1979).

DÉCOURT e QUARESMA FILHO (1994) apresentaram uma aplicação prática da utilização da medida do torque no ensaio *SPT* (*SPT-T*).

AOKI e CINTRA (2000) interpretaram a transferência de energia devido a um golpe do martelo do ensaio *SPT* à luz do princípio da conservação de energia de Hamilton. O princípio de Hamilton diz que a variação da energia cinética e potencial mais a variação do trabalho realizado pelas forças não conservativas, considerados durante um intervalo de tempo (t_1 a t_2) deve ser igual a zero (CLOUGH e PENZIEN, 1993). Matematicamente essa afirmação pode ser expressa por:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(E_{ts} - V)dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc})dt = 0 \quad (2.1)$$

em que:

E_{ts} = energia cinética total do sistema;

V = energia potencial do sistema, incluindo a energia de deformação e potencial de qualquer força externa conservativa;

W_{nc} = trabalho realizado pelas forças não conservativas atuantes no sistema, incluindo amortecimento e quaisquer forças externas arbitrarias atuantes;

δ = representa uma variação ocorrida durante o intervalo de tempo (t_2-t_1).

Durante o evento do golpe a energia potencial de posição é transformada em trabalho efetuado por forças não conservativas e em energia elástica. Considerando que esta situação corresponde aos extremos do evento, AOKI e CINTRA (2000) propõem que a eficiência do *SPT* seja determinada por:

$$\eta_s = \frac{W_p}{U} \cdot 100 \quad (2.2)$$

em que:

W_p = parcela do trabalho final gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante a penetração;

U = energia potencial normalizada do *SPT* (478 J).

Vale ressaltar que a parcela de trabalho W_{nc} é igual à parcela W_p .

Conforme explicou Seixas Neves (2004), durante o evento do golpe, uma pequena parte da energia potencial de deformação (V) se transforma em energia potencial elástica (V_{es}) devido à deformação elástica do solo e do amostrador; sendo que a diferença se transforma em trabalho (W_p) realizado pelas forças resistentes não conservativas geradas durante a penetração do amostrador.

Dessa forma, a parcela de trabalho (W_p) pode ser expressa por:

$$W_p = V - V_{es} \quad (2.3)$$

em que:

V = energia potencial de deformação;

V_{es} = energia potencial elástica devido à deformação elástica do solo e do amostrador.

SEIXAS NEVES (2004) apresentou uma metodologia para a determinação da eficiência do *SPT* baseada no Princípio de HAMILTON e na realização de prova de carga estática sobre o amostrador. Segundo SEIXAS NEVES (2004) a prática utilizada na obtenção da eficiência do ensaio *SPT* é aquela em que se instrumenta o conjunto de hastes com acelerômetros e medidores de deformação. Esses instrumentos fornecem leituras de velocidade e de força resultantes da passagem da onda de impacto do martelo, sendo que com os resultados obtidos é possível calcular a energia cinética transferida à haste. SEIXAS NEVES (2004) destacou que na prática da engenharia brasileira esses ensaios não são realizados devido a inviabilidade econômica, daí a ideia de se desenvolver uma metodologia, de baixo custo, para a

determinação da eficiência do ensaio SPT, com base no Princípio de HAMILTON e na realização de prova de carga estática sobre o amostrador.

ODEBRECHT, E (2003) apresentou um estudo detalhado da monitoração de energia durante a fase de cravação do amostrador no ensaio *SPT* e identificou os fatores que influenciaram nas medidas obtidas. O autor, além de desenvolver um equipamento para a aquisição dos sinais de força e de aceleração, implementou um programa com base na técnica de diferenças finitas, que faz uma simulação numérica do ensaio, inclusive o balanço da diferentes energias ao longo do processo. A pesquisa permitiu a proposição de uma nova abordagem de interpretação fundamentada no trabalho efetivamente consumido na cravação do amostrador no solo.

AOKI et al. (2007), mostraram como obter a eficiência do impacto do golpe no *SPT* a partir de uma prova de carga estática realizada no amostrador padrão.

No ensaio dinâmico, a máxima resistência desenvolvida durante o golpe do martelo depende do deslocamento (componente estática), velocidade (componente de amortecimento) e aceleração (componente inercial). No momento correspondente ao final do ensaio dinâmico, os dados experimentais mostraram que a energia potencial elástica pode ser desprezada e, como consequência, o trabalho realizado é praticamente igual à energia potencial armazenada no sistema. Da mesma forma, em uma prova de carga estática no amostrador logo após o ensaio dinâmico, a energia potencial elástica também é insignificante. Como consequência, o trabalho realizado é quase igual à energia potencial armazenada no sistema. Assim, em ambos os testes, a penetração máxima do amostrador no solo é permanente. Além disso, verificou-se que a energia potencial armazenada no ensaio dinâmico é praticamente igual à energia potencial armazenada no ensaio estático, para o mesmo valor de penetração do amostrador. Dessa forma, a eficiência do ensaio pode ser obtida dividindo-se a energia potencial do sistema pela energia potencial nominal do SPT (478 J).

LUKIANCHUKI (2012) apresentou interpretações dos resultados do ensaio *SPT* a partir das quantidades de energia envolvidas durante a queda do martelo. Foi desenvolvida uma instrumentação que permitiu registrar esses sinais de força normal e aceleração. Foram realizados ensaios com instrumentação instalada tanto no topo quanto na base da composição de hastes, sendo que esse arranjo permitiu estimar as quantidades de energia disponíveis no topo e na base da composição de hastes. Assim, a autora da tese conseguiu determinar a eficiência dos equipamentos *SPT* com base na quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador e também a resistência dinâmica mobilizada no sistema *solo-amostrador*. Os resultados experimentais foram comparados com resultados obtidos através de métodos

teóricos, baseados no Princípio de HAMILTON, para a determinação da resistência estática e dinâmica do solo.

2.7.2 CPT e CPTU - *CONE PENETRATION TEST E PIEZONCONE PENETRATION TEST*

O ensaio consiste na cravação de uma ponteira cônica com 60° de ápice a velocidade constante de 2 cm/s. A área da seção transversal do cone, normalmente utilizado, é de 10 cm^2 , podendo atingir 15 cm^2 para equipamentos de maior capacidade de carga. A cravação é feita com o auxílio de um equipamento hidráulico e hastes metálicas. Tanto os cones como as hastes são padronizados.

Os equipamentos podem ser classificados em três categorias.

- a) Cone mecânico em que as leituras das forças necessárias para se cravar a ponta cônica, as quais estão diretamente relacionadas com qc e aquelas necessárias para vencer o atrito lateral, que estão diretamente relacionadas com fs , são feitas na superfície;
- b) Cone elétrico em que as células de carga permitem a obtenção dos valores de qc e de fs diretamente da ponteira;
- c) Piezocone que permite a obtenção das pressões neutras u , geradas durante a fase de cravação do cone, além dos valores de qc e de fs .

Para o CPT (elétrico), a aquisição de dados de resistências, de ponta (qc) e por atrito lateral (fs) ocorre a cada centímetro, e para o *CPTu*, a cada centímetro o sistema efetua leituras de, resistência de ponta (qc), de resistência por atrito lateral (fs) e de pressão neutra (u).

As sobrepressões neutras são lidas através de pedra porosa situada na base do cone, saturada com o auxílio de bomba a vácuo e óleo de silicone. Durante o ensaio, podem ser realizados ensaios de dissipação da pressão neutra.

Segundo PENNA (2013), além dos dados lidos em tempo real durante o ensaio (qc , fs e u), as seguintes propriedades podem ser obtidas através de correlações:

- Estratigrafia;
- Perfil geotécnico;
- Coeficiente de adensamento (Ch e Cv);
- Densidade relativa (Dr);
- Resistência não drenada (Su);
- Ângulo de atrito efetivo de areias (ϕ);

- História de tensões (tensão de pré-adensamento, *OCR*);
- Coeficiente de permeabilidade (*K*).

Segundo QUARESMA et al. (1996) o ensaio de cone holandês, também conhecido como ensaio de penetração estática (ou quase-estática), ensaio de cone mecânico ou simplesmente ensaio de cone, teve seu desenvolvimento iniciado na década de 1930, no Laboratório de Mecânica dos Solos de Delft, na Holanda. Dos dois equipamentos desenvolvidos, o primeiro (BARENTSEN, 1936) tinha a finalidade de obter dados sobre a consistência dos depósitos aluviais existentes na parte oeste da Holanda, para utilização em projetos de estradas e o segundo tinha o objetivo de obter dados para o projeto de fundação por estacas. A classificação estratigráfica dos solos juntou-se aos dois primeiros objetivos, a partir do trabalho de clássico de BEGMANN (1965). Os dois equipamentos consistiam de um conjunto de hastes tendo na extremidade inferior um cone com ângulo de vértice de 60° e área da seção transversal da base de 10 cm^2 . A cravação da ponteira era feita a uma velocidade de 1 cm/s , de forma alternada, apenas o cone ou todo o conjunto, sendo que primeiro se registrava a resistência de ponta e depois a resistência total (ponta somada ao atrito lateral). Os autores do ensaio destacavam as principais vantagens do ensaio como sendo a rapidez da execução, a confiabilidade dos resultados, o baixo custo e o fato de que se obtinham numerosos resultados ao longo da profundidade ensaiada.

De RUITER (1971) referiu-se a dois tipos de cone elétrico, sendo que o primeiro conseguia medir apenas a resistência de ponta enquanto que o segundo era capaz de medir, além da resistência de ponta, a resistência por atrito lateral. Esse último ficou conhecido como cone de atrito.

No Brasil destacaram-se os resultados dos primeiros ensaios realizados, com cone elétrico, por BOGOSSIAN e MATOS (1979).

Importantes trabalhos envolvendo o cone elétrico foram desenvolvidos por, ROCHA FILHO (1979); ROCHA FILHO e ALENCAR (1985), ROCHA FILHO (1987); DANZIGER (1990); SCHNAID (1990); COUTINHO e OLIVEIRA (1993); BRUGGER et al. (1994); ROCHA FILHO e SALES (1994); SOARES et al. (1994); ALMEIDAS (1996); ROCHA FILHO e CARVALHO (1998); SOARES et al. (1997).

Segundo SCHNAID (2000), as primeiras referências ao ensaio de penetração de cone remontam à década de 1930 na Holanda (BARENTSEN, 1936) sendo que, atualmente, os ensaios de cone e piezocone são qualificados internacionalmente como uma das mais importantes ferramentas de prospecção geotécnica.

Segundo SCHNAID (2000) no Brasil, o ensaio de cone começou a ser empregado no final da década de 1950, mas não de forma rotineira, sendo que na década de 1990 observou-se um crescente interesse comercial pelo ensaio, motivado pelas pesquisas realizadas em diversas universidades brasileiras. Conforme citado por SCHNAID (2000), trabalhos detalhados do estado do conhecimento desses ensaios podem ser encontrados em MEIGHT (1987) e LUNE et al. (1997).

2.7.3 ENSAIO DE PALHETA

O ensaio de palheta (*Vane Test*) é empregado na determinação da resistência ao cisalhamento não – drenada (S_u), de depósitos de argilas moles.

Segundo QUARESMA et al. (1996) JOHN OLSSON (FLODIN e BROMS, 1981) desenvolveu o primeiro equipamento de palheta com o objetivo de determinar o coeficiente de reação horizontal do solo para o projeto de estacas longas de uma ponte construída em Estocolmo no período de 1917-1926. No entanto foi a partir de 1940 que o interesse no equipamento de palheta foi reavivado na Europa Setentrional.

Em 1948, na Segunda Conferência Internacional de Roterdam o equipamento moderno de palheta foi apresentado por LYMAN CARLSSON (Cadling), sendo que uma versão mais avançada do equipamento foi descrita por LYMAN CARLSSON e ODENSTADT em 1950. O ensaio de palheta é o mais utilizado para a determinação da resistência não drenada S_u de solos moles. O procedimento do ensaio está descrito abaixo.

O ensaio consiste na rotação, a velocidade constante, de uma palheta cruciforme em profundidades predefinidas. A medida do torque (T) versus rotação (n) permite a determinação dos valores de S_u do material do solo natural e amolgado.

Para altura (H) igual ao dobro do diâmetro da palheta, solo isotrópico e condição não-drenada com S_u constante no entorno da palheta, pode-se demonstrar a equação abaixo.

$$S_u = \frac{0,86.T}{\pi.D^3} \quad (2.4)$$

No Brasil o ensaio de palheta “in situ” foi padronizado pela NBR 1095 – Ensaio de Palheta *in situ* e nos Estados Unidos pela ASTM D 2573-08 – *Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil*.

A NBR 1095 padronizou a velocidade de rotação da palheta em 60 rpm e o tempo de espera entre a cravação e a rotação da mesma em um minuto.

A medição do torque é feita, em geral, através de um dispositivo mecânico (ORTIGÃO e COLLET, 1986). Equipamentos de palheta com de célula de torque instalada próxima à palheta têm sido desenvolvidos (WISEL, 1973).

Com relação à distribuição de tensões no entorno da palheta, os estudos de WROTH (1984), baseados, principalmente, nos trabalhos de DONALD et al. (1977), MENZIES & MERRIFIELD (1980) e DONALD et al. (1977) permitiram concluir que a distribuição das tensões cisalhantes nos planos horizontais (topo e base da palheta) pode ser representada pela expressão abaixo.

$$\frac{\tau_H}{\tau_{mH}} = \left(\frac{x}{R}\right)^{nc} \quad (2.5)$$

em que:

τ_H = Tensão de corte na superfície horizontal a uma distância radial “x” do centro do círculo de raio “R”;

τ_{mH} = Tensão de corte máxima no perímetro da palheta, ou seja, a uma distância radial “R” do eixo da palheta;

nc = Fator que define a configuração da distribuição de tensões na superfície horizontal.

Para a expressão (2.5) quando $n=0$ trata-se de distribuição retangular de tensões e quando $n=1$ a distribuição de tensões será triangular.

Considerando uma superfície de ruptura cilíndrica com diâmetro D e altura H ; assumida a distribuição de tensões nas superfícies vertical e horizontal; adotando-se a razão de anisotropia como sendo $b=S_{uv}/S_{uh}$ onde S_{uv} é a resistência não-drenada na superfície vertical e S_{uH} a resistência não- drenada nas superfícies horizontais (topo e base) pode-se obter a expressão abaixo, demonstrada por Schnaid (2000).

$$S_{uH} = \frac{n+3}{D+Hb(n+3)} \cdot \frac{2T}{\pi D^2} \quad (2.6)$$

SCHNAID (2000) apresentou uma tabela (Tabela 2.17) desenvolvida por LUND, SOARES & SCHNAID (1996), através da qual podem ser obtidas as tensões de cisalhamento máximas nas superfícies horizontais da palheta.

Nota-se na tabela 2.1 que a norma brasileira NBR 1095 ao adotar a equação (2.4) para o cálculo de S_u , considerou: a altura da palheta igual duas vezes o seu diâmetro, solo isotrópico e distribuição uniforme de tensões.

Tabela 2.1 Interpretação do Ensaio de Palheta para diversas hipóteses. Lund, Soares & Schnaid (1996).

Dimensão da palheta H/D	Isotropia/Anisotropia	Distribuição de Tensões Superficiais Horizontais	Equação
H = D	Isotrópico (b=1)	Uniforme (n=0)	$Su = 1,50 \frac{T}{\pi D^3}$
		Parabólica (n=0,5)	$Su = 1,56 \frac{T}{\pi D^3}$
		Triangular (n=1)	$Su = 1,60 \frac{T}{\pi D^3}$
	Anisotrópico (b≠1)	Uniforme (n=0)	$Su = \frac{6}{(3b + 1)} \frac{T}{\pi D^3}$
		Parabólica (n=0,5)	$Su = \frac{14}{(7b + 2)} \frac{T}{\pi D^3}$
		Triangular (n=1)	$Su = \frac{8}{(4b + 1)} \frac{T}{\pi D^3}$
H = 2D	Isotrópico (b=1)	Uniforme (n=0)	$Su = 0,86 \frac{T}{\pi D^3}$
		Parabólica (n=0,5)	$Su = 0,88 \frac{T}{\pi D^3}$
		Triangular (n=1)	$Su = 0,89 \frac{T}{\pi D^3}$
	Anisotrópico (b≠1)	Uniforme (n=0)	$Su = \frac{6}{(6b + 1)} \frac{T}{\pi D^3}$
		Parabólica (n=0,5)	$Su = \frac{7}{(7b + 1)} \frac{T}{\pi D^3}$
		Triangular (n=1)	$Su = \frac{8}{(8b + 1)} \frac{T}{\pi D^3}$

Conforme citado por SCHNAID (2000), os trabalhos de, WROTH (1984), KONRAD & LAW (1987), MAYNE (1987), CROOKS et al. (1988) MAYNE & MITCHEL (1988), MAYNE & BACHUS (1988), SANDVEN et al. (1988), SULLY et al. (1988) mostram a importância da utilização adicional do ensaio de palheta na avaliação do perfil de OCR.

2.7.4 ENSAIO PRESSIOMÉTRICO

Segundo SCHNAID (2000) o francês LUIS MÉNARD foi o primeiro a utilizar, em 1955, o termo pressiômetro e afirma que o pressiômetro é o único equipamento que fornece uma medida do comportamento tensão-deformação do solo *in-situ*.

Segundo MAIR & WOOD (1987) existiam três tipos de técnicas de instalação de pressiômetros.

a) Pressiômetro em perfurações

A sonda era inserida dentro de um furo de sondagem já escavado. O equipamento era dotado de três células independentes, sendo uma célula de medição e duas células de guarda. Uma célula central, de medição, era preenchida com água enquanto as duas células de guarda, que ficava uma logo acima e a outra logo abaixo da célula central, eram preenchidas com gás comprimido.

A expansão radial das células que ocorria mediante o incremento de pressões de mesma magnitude fazia com que fossem aplicadas tensões nas paredes da cavidade do solo. Para cada incremento de pressão eram registradas as leituras do nível de um volumímetro aos 15, 30 e 60 s, sendo que após 60 s, um novo incremento de pressão era aplicado. Dessa forma obtinha-se uma curva pressiométrica onde o volume injetado ao final de 60 s era plotado em função da pressão aplicada.

A expansão da membrana podia ser interpretada a partir da teoria de expansão de cavidade. O pressiômetro tipo MÉNARD ainda é o mais conhecido dentre aqueles que utilizam pré-furos para a realização do ensaio.

Na UFRGS foi desenvolvido um equipamento que eliminou o sistema de pressão externa e a bureta. Os medidores de volume e de pressão foram substituídos por um medidor de deslocamento (*LVDT*) e um medidor de pressão, respectivamente.

b) Pressiômetro autoperfurante (*SBPM*)

Segundo SCHNAID (2000), esse equipamento era muito mais sofisticado que o pressiômetro que utiliza pré-furo.

O desenvolvimento do pressiômetro autoperfurante trouxe a atenção da comunidade geotécnica internacional para a possibilidade da determinação de relações tensão-deformação *in situ* (WROTH e HUGHES, 1972 e BAGUELIN et. al, 1972).

Segundo SCHNAID (2000) a técnica de autoperfuração minimizava os efeitos de perturbação do solo ao redor da sonda que é gerada pela execução do pré-furo. Um tubo de parede fina e uma haste central (no interior do tubo) eram cravados no solo por rotação. A haste tinha uma

sapata cortante em sua extremidade inferior, que em conjunto com a injeção de água propiciava o corte e o transporte do solo para a superfície do terreno.

O monitoramento da expansão de cavidade era feito por três braços com sensores elétricos de deformação espaçados radialmente em 120° e posicionados no plano médio da sonda, o que permita a obtenção de três curvas Pressão – Deformação (uma curva para cada braço).

Segundo Quaresma et al. (1996) os resultados obtidos com e sem os tubos de revestimento foram muito diferentes e aconselharam a utilização do processo com utilização desses tubos somente em último caso.

Segundo SCHNAID (2000) o pressiómetro autoperfurante era inserido no solo em condições ideais para estudos que usam a teoria de expansão de cavidade.

Tratava-se de um ensaio mais caro do que aquele que utilizava um pré-furo.

c) Pressiómetro cravado

Nesse caso o pressiómetro era cravado no terreno com a aplicação de forças axiais. Destacava-se a técnica do cone - pressiómetro (*CPMT*) na qual o pressiómetro era montado acima da ponteira cônica.

Para todos os tipos de pressiómetros, os registros eram enviados em tempo real para um computador e os resultados eram apresentados em tempo real.

Obtinha-se um gráfico em que, para cada incremento de pressão, no eixo das ordenadas aparecia a pressão aplicada e no eixo das abscissas tinha-se o volume injetado. Dessa forma obtinha-se a curva Pressão – Volume injetado (ensaio tipo MÉNARD) ou Pressão – Deformação (ensaio com pressiómetro autoperfurante).

No começo do ensaio a pressão horizontal externa é maior que a pressão interna ao pressiómetro e, portanto, não ocorre deformação do solo. Quando a membrana ficar submetida a uma pressão tal que comece a deslocar o solo tem-se a tensão horizontal *in situ* (σ_h). Esse é o único ensaio que fornece a tensão horizontal no solo.

Quando se deseja obter o módulo de deformabilidade do solo, interrompe-se o ensaio e faz-se um ciclo de carga e descarga. O módulo de deformabilidade do solo é obtido com precisão através da inclinação da curva.

Para valores de pressão que provocam a ruptura do solo podem ser obtidos os parâmetros de resistência tais como ângulo de atrito para as areias, e coesão ou resistência ao cisalhamento não-drenada, para as argilas.

2.7.5 ENSAIO DILATOMÉTRICO

O professor e pesquisador SILVANO MARCHETTI, foi o inventor do ensaio *DMT* e o construtor do equipamento.

Segundo PENNA (2013) o ensaio dilatométrico consiste em cravar uma lâmina plana posicionada no final de uma série de hastes. A cada 20 cm a cravação é interrompida para que uma membrana circular, de aço, localizada em um dos lados da lâmina possa ser expandida horizontalmente contra o solo. A expansão da membrana se dá com a introdução de gás nitrogênio, sendo que dessa expansão são registradas, em manômetro de precisão, duas leituras: a primeira quando a dilatação da membrana "vence" o esforço de compressão do terreno, e a segunda quando esta deforma o solo de 1,10 mm.

Uma terceira leitura de pressão é feita quando a membrana retorna ao deslocamento correspondente à primeira leitura.

Segundo SCHNAID (2000) o equipamento que realiza o ensaio dilatométrico consiste, além da do sistema de cravação, em uma lâmina dilatométrica, uma unidade de controle de pressões que é dotada de um sinal acústico, um cabo elétrico/pneumático, um sistema de calibração e uma unidade de pressão. A Figura 2.110 apresenta uma vista do equipamento para a realização do ensaio.

Conforme recomendação das ASTM D6635:2007 - *Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer*, a penetração da lâmina dilatométrica no solo deve ser feita na vertical e a uma velocidade que pode variar no intervalo de 2 a 4 m/s (MARCHETTI, 1980).



Figura 2.110 Vista do equipamento para a realização de ensaios dilatométricos. Marchetti (2010).

Conforme detalhado por SCHNAID (2000), a cada 20 cm, quando a cravação da lâmina é interrompida procede-se imediatamente à expansão da membrana, registrando-se:

A = pressão necessária para que ocorra um deslocamento horizontal do centro da membrana de 0,05 mm ($\pm 0,02$ mm);

B = pressão de gás no interior do diafragma para um deslocamento radial da membrana de 1,10 mm ($\pm 0,03$ mm);

C = pressão interna no diafragma durante a despressurização do sistema, quando a membrana retorna ao deslocamento correspondente à pressão A.

As pressões A, B e C são registradas por um sistema eletromecânico, sendo uma válvula com acionamento por mola, permite o aumento das pressões no interior da lâmina, o que obriga o diafragma a se deslocar horizontalmente no interior do solo. A pressão de gás é registrada para cada um dos três estágios do ensaio. No primeiro estágio ocorre a interrupção de um sinal acústico, gerado por um circuito elétrico, devido ao deslocamento da membrana em relação à lamina que elimina o contato entre as duas partes. O segundo estágio termina quando o deslocamento do centro da membrana atinge 1,10 mm havendo o restabelecimento do sinal acústico, sendo que nesse momento é feita a leitura da pressão correspondente.

Para a obtenção das pressões que serão correlacionadas com parâmetros geotécnicos, são feitas algumas correções devido a possíveis imprecisões no sistema de medição e à rigidez da membrana. A seguir são apresentadas as expressões que originam as pressões corrigidas.

$$P_0 = 1,05(A - Z_m - \Delta A) - 0,05(B - Z_m - \Delta B) \quad (2.7)$$

$$P_1 = B - Z_m - \Delta B \quad (2.8)$$

$$P_2 = C - Z_m + \Delta A \quad (2.9)$$

em que:

Z_m = desvio de zero do manômetro;

ΔA = pressão de gás relativa à leitura A, em calibração ao ar (correção devido à rigidez da membrana);

ΔB = pressão de gás relativa à leitura B, em calibração ao ar (correção devido à rigidez da membrana).

A pressão P_0 é associada à tensão horizontal in situ, a diferença entre P_1 e P_0 é correlacionada ao módulo de Young e a pressão P_2 é relacionada ao excesso de poro-pressão gerado pela penetração da lâmina dilatométrica. A Figura 2.111 apresenta uma ilustração do dilatômetro.

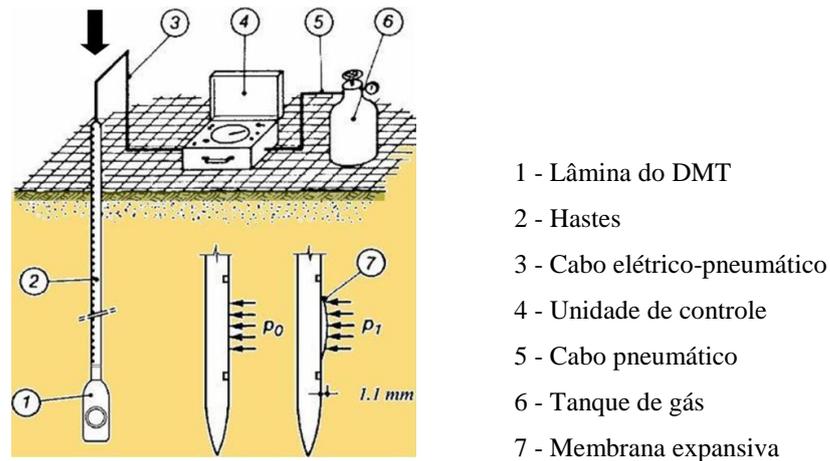


Figura 2.111 Ilustração do dilatômetro. (Marchetti, 2010).

A Figura 2.112 apresenta duas vistas da lâmina dilatométrica.

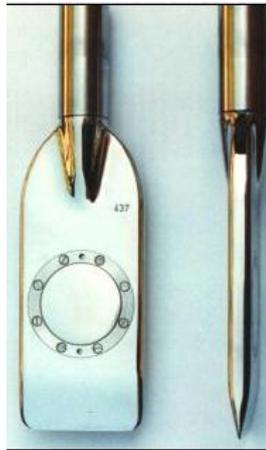


Figura 2.112 Vistas da lâmina dilatométrica. Marchetti (2010).

Segundo MARCHETTI (2010) a principal aplicação do *DMT* é estimar recalques e módulos de Elasticidade (E), tanto nas areias quanto nas argilas, e a resistência não drenada ao cisalhamento, nas argilas. Outras aplicações incluem controle de compactação, determinação de superfícies de rupturas em encostas, potencial de liquefação e estimativa de parâmetros para solução de problemas geotécnicos diversos. Ainda segundo MARCHETTI (2010), muitas vezes o ensaio *DMT* é solicitado pelos engenheiros quando são necessárias previsões precisas de recalques de fundações ou quando tem que se tomar uma decisão com relação a se adotar uma solução em fundação rasa ou profunda.

Segundo PENNA (2013), os dados dos ensaios *DMT* recolhidos em campo e que são processados por software específico, segundo métodos de MARCHETTI e SCHMERTMANN fornecem parâmetros tais como:

- Coeficiente de empuxo em repouso (k_0);
- Ângulo de atrito interno em areias (ϕ);
- Classificação granulométrica;

- Razão de sobre adensamento (OCR).

Relatos mais detalhados dos procedimentos de ensaio, determinação dos índices dilatométricos bem como a interpretação dos resultados do ensaio podem ser encontrados em LADD et al. (1977), MARCHETTI (1980, 1997), MARCHETTI & CRAPPS (1981), SCHMERTMANN (1982), MAYNE & KULHAWY (1982), ROBERTSON & CAMPANELLA (1983), SCHMERTMANN (1983), CAMPANELLA & ROBERTSON (1983, 1991), HAYES (1986), SCHMERTMANN (1986), SOARES et al. (1986), LUTENEGGER & TIMIAN (1986), LUTENEGGER (1988), LACASSI & LUNNE (1988), ROBERTSON et al (1988), BOGOSSIAN et al. (1988), BOGOSSIAN et al. (1989), LUNNE et al. (1990), ORTIGÃO (1993), SMITH (1993), ORTIGÃO (1993), PEREIRA (1997), CLARKE & WROTH (1988), PEREIRA & Coutinho (1998), PAULA et al. (1998), SCHNAID (2000).

2.8 ESTUDO DOS HELICOIDES

2.8.1 ASPECTOS GERAIS

Um trado helicoidal é basicamente constituído de uma chapa que envolve um tubo central normalmente oco. Essa chapa forma um helicóide com passo que normalmente depende do diâmetro e da aplicação desejada. O corte do solo é feito por dentes de geometria plana ou cônica, dependendo das condições do solo, que são montados na extremidade inferior do trado.

A norma brasileira de fundações (NBR 6122:2010) define as estacas do tipo hélice em dois grupos: hélice contínua e hélice de deslocamento. Na estaca hélice contínua o trado é formado por um tubo central vazado sobre o qual é soldado um helicóide com diâmetro e passo constantes. Na estaca hélice de deslocamento a ferramenta utilizada é um trado curto em que o passo da hélice e o diâmetro externo do tubo central não são constantes. Segundo SLATTER (2000), esse tipo de trado, normalmente, é dividido em quatro zonas conforme descrito abaixo.

a) Zona de corte e desconfinamento

Nessa região, situada na parte inferior do trado, o solo é cortado e transportado para cima através das hélices.

b) Zona de densificação

É formada por uma região do trado em que a haste vazada, normalmente, tem seu diâmetro externo aumentado no sentido ascendente. A geometria cônica do tubo central induz forças horizontais no solo de sorte a deslocá-lo horizontalmente. O maior percentual da energia consumida durante a execução da estaca ocorre nessa região (SLATTER, 2000).

c) Zona de estabilização

Trata-se de uma região com diâmetro constante na qual o objetivo é estabilizar o solo deslocado.

d) Zona de Pós – Densificação

Nessa região existe um helicóide, com um a dois passos, com inclinação contrária à inclinação da hélice situada na região inferior. Esse arranjo faz com que o solo eventualmente solto, sobre o trado, também sofra o processo de densificação, durante as fases de inserção e de extração da hélice.

No volume 2 desta tese, o APÊNDICE J, desenhos esquemáticos mostram as zonas mencionadas por SLATTER (2000), para a estaca ômega, estaca V e as zonas definidas pelo autor desta tese para o instrumento desenvolvido para o ensaio *FDT*.

Segundo THORBURN et al. (1993) para que ocorra a penetração do trado no solo, devem ocorrer, o corte o transporte e o deslocamento desse solo. As pontas instaladas na extremidade inferior do trado fatiam o solo criando um vazio que possibilita o avanço da hélice. A função da hélice é transportar o solo já desestruturado. Ao mesmo tempo o tubo central da hélice que é inserido no furo, cria um potencial de deslocamento lateral do solo.

Segundo SLATTER (2000), helicóides são instalados no solo através da combinação de força axial e de torque. Durante o processo de instalação do helicóide pode ocorrer tanto o confinamento quanto o desconfinamento do solo. Quando o transporte vertical do solo é dificultado ou até mesmo impedido, ocorrem deslocamentos sob a ponta e na direção radial do helicóide. Por outro lado, quando o transporte do solo é facilitado, por exemplo, devido ao movimento de rotação combinado com baixa velocidade de penetração ou até mesmo sem que ocorra o avanço do helicóide, ocorre um desconfinamento do solo.

PERKO (2000) concluiu que as medidas de torque obtidas durante a instalação de uma estaca helicoidal, embora sejam indicadoras da resistência ao cisalhamento do solo, são de difícil correlação com a coesão e o atrito do solo. PERKO (2000) adotou um modelo de equivalência de energia produzida pelas forças aplicadas na estaca helicoidal e o torque requerido.

TSHUA (2007) fez uma analogia com o parafuso de força. Ensaio realizados em centrífuga com o modelo reduzido, em areia, resultaram na constatação de que o valor médio

da razão entre os valores da parcela de capacidade de carga à tração relativa às hélices, medidos e calculados pelo modelo proposto, foi igual a 0,98 com coeficiente de variação de 15,7%. Segundo Silva (2010) os ensaios realizados por TSHUA (2010) constituem uma forte indicação de que também para as estacas hélice existe uma relação entre o torque de instalação do helicóide e a capacidade de carga do elemento isolado de fundação.

COSTA et al. (2008) analisaram a relação existente entre o torque na hélice e o N_{spt} , para diversos solos. Para cada metro os autores utilizaram a média das pressões medidas nos motores hidráulicos da mesa rotativa e consideraram que essa pressão média era proporcional ao torque médio no mesmo trecho.

2.8.2 MODELOS TEÓRICOS DE TRANSPORTE DE MATERIAL

Diversas teorias relacionadas às estacas que utilizam helicóide como ferramenta de execução da estaca (trado ou hélice) estão fortemente ligadas ao princípio do parafuso de ARQUIMEDES. O matemático grego, ARQUIMEDES, foi o primeiro a pensar em uma chapa desenvolvida em torno de um eixo de tal forma que essa chapa formasse um ângulo com a horizontal, considerando o eixo na vertical. Dessa forma Arquimedes inventou o componente mecânico que conhecemos pelo nome parafuso. Arquimedes colocou seu parafuso dentro de um tubo cilíndrico com a extremidade mais baixa imersa na água que quando rotacionado transportou a água para um nível mais elevado.

Desenvolvimentos posteriores e até os dias atuais esse invento é comumente utilizado no transporte de materiais leves como, por exemplo, os cereais. Essas hélices, normalmente, têm diâmetros e passos constantes ao longo do comprimento.

Usando o parafuso ou bomba de ARQUIMEDES desconsiderando o atrito entre o material transportado e a chapa e o tubo da hélice, e considerando que o deslocamento do material ocorra apenas na direção longitudinal pode-se escrever a expressão:

$$v = n_i \cdot p \quad (2.10)$$

em que:

v = velocidade de transporte do material;

n_i = velocidade de rotação da hélice;

p = passo da hélice.

A seção transversal perpendicular ao eixo da hélice pode ser expressa por:

$$A = \frac{\pi(d^2 - d_0^2)}{4} \quad (2.11)$$

em que:

A = área livre da hélice para transporte;

d = diâmetro externo da hélice;

d_0 = diâmetro do tubo central da hélice.

O volume de material transportado num intervalo de tempo pode ser expressa por:

$$Q = \frac{\pi(d^2 - d_0^2)}{4} (n_i \cdot p \cdot \Delta t) \quad (2.12)$$

em que:

Q = vazão de material;

Δt = intervalo de tempo considerado.

Segundo SLATTER (2000) existe uma similaridade entre o parafuso de ARQUIMEDES e a estaca hélice contínua. Podem ser mencionados como similares, o diâmetro do tubo central constante, o diâmetro da hélice constante e o passo da hélice constante. No entanto há também um número significativo de diferenças no comportamento do parafuso de ARQUIMEDES e na hélice contínua tais como, no parafuso de ARQUIMEDES um eventual deslocamento do material (compactação) não é considerado; o parafuso de ARQUIMEDES opera completamente encapsulado em um tubo enquanto que a hélice contínua opera em contato com o solo circundante cujo atrito entre esses dois materiais deve ser considerado; na estaca hélice contínua as tensões radiais são consideráveis enquanto que no parafuso de ARQUIMEDES tais tensões são praticamente desprezíveis; as paredes do furo da estaca hélice contínua podem se tornar instáveis e, portanto, as estacas hélice contínua podem transportar materiais ao longo de todo o seu comprimento ao passo que no parafuso de ARQUIMEDES o transporte ocorre apenas de uma extremidade à outra. Ao assumir que não existe atrito entre o material transportado e componentes do helicóide é uma simplificação exagerada na opinião de SLATTER (2000), mas essa é uma simplificação menor quando se tenta analisar trados com configurações mais complexas como, por exemplo, as hélices de deslocamento (*screw piles*).

MASSARCH & TANCRE (1998) apresentaram uma metodologia para prever as características de transporte e de deslocamento das estacas parafuso (*screw pile*), que segundo a NBR 6122:2010 são denominadas estacas hélice de deslocamento.

A abordagem adotada pelos autores foi baseada quase que totalmente no princípio do parafuso de ARQUIMEDES e, portanto, foi assumido que o material transportado era não-coesivo e que não existiria atrito entre o solo e a hélice.

MASSARSCH propôs que o volume de solo deslocado pelo trado (V_d) podia ser calculado pela expressão:

$$V_d = \frac{\pi d_0^2}{4} v_i \cdot \Delta t \quad (2.13)$$

em que:

V_d = Volume de solo deslocado;

d_0 = diâmetro do tubo central do trado;

v_i = velocidade de avanço do trado;

Δt = variação de tempo considerada.

MASSARSCH & TANCRE (1998) consideraram ainda que o volume de solo cortado pelo trado podia ser calculado pela expressão:

$$V_c = \frac{\pi d^2}{4} v_i \cdot \Delta t - V_d \quad (2.14)$$

Com base nas equações propostas os autores concluíram que para evitar o desconfinamento do solo a velocidade de avanço do trado deveria ser expressa pela equação abaixo.

$$v_i = n_i \cdot p \quad (2.15)$$

em que:

n_i = velocidade de rotação;

p = passo da hélice.

O significado físico das expressões 2.13, 2.14 e 2.15 é que o volume deslocado é igual ao volume dos materiais do trado e que nenhum material seria transportado à superfície do solo.

A conclusão acima foi posteriormente considerada como incorreta por VIGGIANI (1993).

VIGGIANI (1993) faz uma análise das características de transporte e de deslocamento do solo na estaca hélice contínua. De forma similar a MASSARSCH & TANCRE (1988) VIGGIANI adotou uma abordagem amplamente baseada no princípio do parafuso de ARQUIMEDES. VIGGIANI assumiu que o material transportado era não-coesivo e que não havia atrito entre

o solo e o trado. VIGGIANI também considerou para a introdução da hélice a mesma equação proposta por MASSARSCH & TANCRE (1988), ou seja:

$$V_d = \frac{\pi d_0^2}{4} v_i \cdot \Delta t \quad (2.16)$$

VIGGIANI (1993) chamou a variável V_d de volume deslocado.

No entanto uma nova equação que calcula o volume de material que chega à superfície do solo foi proposta por VIGGIANI.

$$V_r = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_0^2) (n_i \cdot p - v_i) \Delta t \quad (2.17)$$

Na equação 2.17 pode-se verificar que se $n_i \cdot p = v_i$, nenhum material será transportado à superfície do terreno.

VIGGIANI (1993) analisou com maior profundidade as equações 2.16 e 2.17 e concluiu que havia um valor mínimo para a velocidade (v_i) de sorte que não ocorresse o desconfinamento do solo circundante e propôs a seguinte expressão.

$$v_{i(\min)} \geq n_i \cdot p \left(1 - \frac{d_0^2}{d^2}\right) \quad (2.18)$$

Na verdade VIGGIANI (1993) considerou que poderia não haver deslocamento do solo durante o processo de escavação e que poderia ocorrer o transporte de algum material até a superfície do terreno sem que houvesse desconfinamento do solo circundante.

Apresenta-se abaixo a dedução da expressão (2.16), desenvolvida pelo autor da presente tese. Durante a escavação de uma estaca o volume cortado (V_c) deve ser, no mínimo, igual à soma do volume removido (V_r) com o volume deslocado (V_d) e com o volume de solo que fica alojado entre as paredes da perfuração e o tubo central da hélice. Esse parágrafo do texto pode ser representado pela expressão abaixo.

$$V_c \geq V_r + V_d + \frac{\pi}{4} (d^2 - d_0^2) \Delta t \quad (2.19)$$

O volume cortado pelas ferramentas da ponteira do trado pode ser expresso pela equação abaixo.

$$V_c = \frac{\pi}{4} d^2 v_i \Delta t \quad (2.20)$$

Na expressão 2.19 fazendo $V_d = 0$, ou seja, assumindo que o volume deslocado pode ser nulo tem-se:

$$V_c \geq V_r + 0 + \frac{\pi}{4} (d^2 - d_0^2) \Delta t \quad (2.21)$$

ou seja,

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{4} d^2 v_i \Delta t &\geq \frac{\pi}{4} (d^2 - d_0^2) (n_i \cdot p - v_i) \Delta t + 0 + \frac{\pi}{4} (d^2 - d_0^2) v_i \Delta t \\ d^2 v_i &\geq (d^2 - d_0^2) (n_i \cdot p - v_i) + (d^2 - d_0^2) v_i \\ d^2 v_i &\geq (d^2 - d_0^2) n_i \cdot p - v_i (d^2 - d_0^2) + (d^2 - d_0^2) v_i \\ d^2 v_i &\geq (d^2 - d_0^2) n_i \cdot p \\ v_i &\geq \frac{n_i \cdot p (d^2 - d_0^2)}{d^2} \\ v_i &\geq n_i \cdot p \left(1 - \frac{d_0^2}{d^2}\right) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Através da equação 2.22 pode-se verificar que:

- a) Se $d_0 = d$ obtém-se $v_i = 0$
- b) Se $d_0 = 0$ obtém-se $v_i = n_i \cdot p$

É evidente que d_0 não pode ser igual a zero, ou seja, não é possível que a hélice não disponha de um tubo central, mas deve-se entender o sentido físico do problema, ou seja, é possível que algum material seja transportado para a superfície do terreno sem que ocorra desconfinamento do solo circundante à escavação.

SLATTER (2000) relata em sua tese que é possível que a hélice seja instalada com velocidade de avanço menor que $v_i = n_i \cdot p$ sem que ocorra o desconfinamento do solo circundante. Conforme demonstrado acima fica evidente que a relação d/d_0 também influencia na taxa de penetração permitida.

SLATTER (2000) também relata que ainda que o trabalho de VIGGIANI (1993) utiliza o princípio do parafuso de ARQUIMEDES introduzindo a modificação que trata da consideração do volume de solo deslocado, ele ainda apresenta duas deficiências importantes.

A primeira é desconsideração do atrito do solo que é transportado para cima com as chapas da hélice e do atrito da hélice com as paredes do furo, e a segunda é a que como o modelo é baseado no princípio do parafuso de ARQUIMEDES, as tensões radiais sobre o trado e outros efeitos que o material transportado pode apresentar, não foram considerados.

SLATTER (2000) relata ainda que VIGGIANI (1993) não considerou o volume das hélices introduzido no solo e que o modelo se adapta apenas para o sistema *CFA (Continuous Flight Auger)* por assumir que a geometria do trado é constante.

GUTYAR (1956) propôs um método para análise da taxa de transporte e potência requeridos de um parafuso transportador vertical. O trabalho de GUTYAR foi baseado na análise das forças que atuam em uma partícula localizada na parte superior da borda da hélice. Ele então assumiu que a velocidade dessa partícula era representativa da velocidade de todas as partículas contidas no helicóide. Em sua análise das forças atuando na partícula, GUTYAR fez as seguintes suposições:

- O material transportado pelas hélices pode ser representado como uma massa pontual localizada na borda da hélice;
- A massa pontual está em contato com a superfície da hélice e com a parede do furo;
- Existe atrito entre a partícula e a parede do furo;
- Existe atrito entre a partícula e a superfície da hélice;
- O transporte do material ocorre de maneira livre e sem coesão.

Com base no movimento da partícula e nas forças que atuam sobre a mesma GUTYAR conseguiu escrever a seguinte equação.

$$\mu_w r \left(w - \frac{2\pi v_0}{p} \right)^2 \left[\frac{1}{\tan(\alpha + \phi_f)} - \frac{v_0}{r w - \frac{v_0}{\tan \alpha}} \right] - g \sqrt{1 + \frac{v_0^2}{\left(r w - \frac{v_0}{\tan \alpha} \right)^2}} = 0 \quad (2.23)$$

em que:

r = raio da hélice;

μ_w = coeficiente de atrito entre a hélice e a parede do furo;

w = velocidade angular da hélice;

v_0 = componente vertical da velocidade da partícula;

p = passo da hélice;

α = ângulo de inclinação da hélice;

ϕ_f = ângulo de atrito entre o solo e a superfície da chapa da hélice;

g = aceleração da gravidade.

Segundo SLATTER (2000) o modelo de GUTYAR é o que mais se assemelha ao comportamento da estaca hélice (estaca parafuso), entretanto, o modelo ainda tem limitações que são descritas a seguir. O efeito da introdução do trado e sua capacidade de deslocamento do solo não foram considerados. O material ao longo do helicóide é submetido a tensões radiais que não foram consideradas. SLATTER (2000) sugere que o modelo de GUTYAR parece ser apropriado para ser usado como base para o desenvolvimento de um novo modelo teórico para prever as características de transporte e deslocamento do solo durante a execução de uma estaca hélice.

GUTYAR (1956) propôs, também, um método para prever as forças e potências envolvidas nos transportadores verticais helicoidais.

GUTYAR estabeleceu que a potência “ N ” requerida para elevar o material a uma altura “ H ” podia ser expressa por:

$$N = \frac{1000 \cdot Q_{1h} \cdot H}{3600 \cdot 75} = \frac{Q \cdot H}{270} \text{ (hp)} \quad (2.24)$$

em que:

Q_{1h} = volume de material elevado até a altura “ H ” em uma hora (m^3);

H = altura elevada (m);

Uma análise superficial da equação 2.24 (acima) pode levar o leitor a pensar que Guytar não considerou em sua formulação a densidade do material. No entanto uma análise um pouco mais profunda permite concluir que GUTYAR usou a densidade da água, conforme mostrado em seguida.

A densidade de um material pode ser representada pela expressão abaixo.

$$\gamma = \frac{m}{V} \quad (2.25)$$

em que:

m = massa;

V = volume.

A partir da expressão (2.25) pode-se escrever:

$$m = \gamma.V$$

A vazão de um determinado material pode ser representada pela expressão abaixo.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.26)$$

Por outro lado, o trabalho realizado para elevar um peso P a uma altura H pode ser representado pela expressão:

$$W = m.g.H \quad (2.27)$$

De (2.25) e (2.27) obtém-se:

$$W = \gamma.V.g.H \quad (2.28)$$

Se o trabalho " W " for realizado num tempo " t " a potência dissipada pode ser expressa por:

$$N = \frac{\gamma.V.g.H}{t} \quad (2.29)$$

De (2.26) e (2.29) pode-se escrever a expressão:

$$N = \gamma.Q.g.H \quad (2.30)$$

Na equação (2.30) usando o sistema internacional de unidades a potência será expressa em watt (W) ou Joule/s (J/s) ou ainda Newton vezes metro/s (Nm/s), se a vazão (Q) for expressa em metros cúbicos por segundo (m^3/s).

Como GUTYAR considerou que " Q " é o volume elevado em uma hora e adotando a densidade da água igual a 1000 kg/m^3 pode escrever a equação (2.30) da forma abaixo.

$$N = \frac{1000Q_{1h}.g.H}{3600}$$

Adotando a aceleração da gravidade (g) igual a 10 m/s^2 pode escrever:

$$N = \frac{10000Q_{1h}.H}{3600} (W) \quad (2.31)$$

Na expressão acima para " Q " em m^3/s e " H " em m obtém-se a potência (N) em *Watt*.

Como 1 hp é aproximadamente igual a 746 W a expressão (2.31) pode ser escrita da seguinte forma.

$$N = \frac{10000 \cdot Q_{lh} \cdot H}{3600 \cdot 746} = \frac{1000 \cdot Q_{lh} \cdot H}{3600 \cdot 75} = \frac{Q_{lh} \cdot H}{270} \text{ (hp)} \quad (2.32)$$

e:

$$N = \frac{Q_{lh} \cdot H}{270} \text{ (hp)} \quad (2.33)$$

Para o cálculo da potência necessária para vencer o atrito devido ao deslizamento do material na hélice GUTYAR propôs as seguintes expressões:

$$N_f = \frac{R \cdot \mu_f \cdot v_c}{75} \quad (2.34)$$

$$N_f = 47 \frac{(d^2 - d_0^2) H \cdot p \cdot n_i \cdot \gamma \cdot \mu_f \cos \beta \cdot \cos \phi_w (1 - \frac{n_k}{n_i})}{270 \cdot \cos(\alpha + \beta + \phi_w) \operatorname{sen} \alpha_c} \text{ (hp)} \quad (2.35)$$

em que:

R = reação normal da chapa da hélice na partícula considerada;

μ_f = coeficiente de atrito entre o material e a superfície da hélice;

d = diâmetro da hélice;

d_0 = diâmetro do tubo central da hélice;

v_c = velocidade da partícula sobre a linha média da hélice;

H = altura de elevação do material;

p = passo da hélice;

γ = densidade do material a ser elevado;

β = ângulo que define a direção do vetor velocidade da partícula em relação à horizontal;

n = rotação da hélice;

n_k = rotação mínima para que o material não deslize para baixo;

ϕ_w = ângulo de atrito entre o material transportado e a parede do tubo de encapsulamento da hélice;

α = ângulo de inclinação da hélice;

α_c = ângulo de inclinação da hélice em sua linha média.

Para a potência necessária para vencer o atrito entre o material transportado e o "casing", ou seja, o tubo que envolve externamente a hélice, GUTYAR propôs a seguinte equação.

$$N_w = \frac{\gamma \cdot w^2}{g} \frac{(d^2 - d_0^2) \pi \cdot d \cdot H \cdot p \cdot \mu_w}{36000} \left(\frac{n_k}{n_i} \right)^2 \left(1 - \frac{n_k}{n} \right) \sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{n_i}{n_k} - 1 \right) \tan^2 \alpha}} (hp) \quad (2.36)$$

A potência total para a elevação da massa, foi definida por GUTYAR como sendo a soma das equações 2.33, 2.35 e 2.36, ou seja, a soma das potências necessárias para, elevar o material, vencer o atrito entre o material e a hélice e vencer o atrito entre o material e o tubo circundante à hélice.

VIGGIANI (1993) propôs um método para prever as forças requeridas para a instalação de hélice contínua (CFA). VIGGIANI assumiu, que a penetração do trado se dá por uma força axial (Q) fornecida pela perfuratriz, que existe uma resistência de ponta (P_p) e uma força axial (F_a) gerada pela rotação da hélice. VIGGIANI assumiu que a força axial (F_a) é responsável pelo cisalhamento do solo circundante ao trado. Os torques requeridos para gerar a força axial (F_a) e para superar as forças de atrito que surgem devido ao contato entre o solo e a hélice foram considerados. O mesmo autor considerou um helicóide de passo constante com uma inclinação α com a horizontal, R é a força normal atuante na hélice, ϕ_f é o ângulo de atrito entre o solo e a chapa da hélice e H é a força horizontal que surge da aplicação do torque M . Os esforços foram considerados concentrados na linha média da chapa da hélice. Para que o trado penetre no solo, VIGGIANI sugeriu a expressão abaixo.

$$Q + F_a > P_p \quad (2.37)$$

E apresentou as seguintes expressões.

$$H = \frac{2T}{d + d_0} \quad (2.38)$$

em que:

T = torque requerido;

d = diâmetro da hélice;

d_0 = diâmetro do tubo central da hélice.

$$\tan \alpha = \frac{2p}{\pi(d + d_0)} \quad (2.39)$$

em que:

p = passo da hélice.

$$F_a = \frac{2T}{(d + d_0)} \frac{\pi d - p \tan \phi}{\pi d \tan \phi_f - p} \quad (2.40)$$

$$T \geq (P_p - Q) \frac{d + d_0}{2} \frac{(\pi d \tan \phi_f - p)}{(\pi d - p \tan \phi_f)} \quad (2.41)$$

A maior limitação do modelo de VIGGIANI, principalmente para a aplicação em hélice de deslocamento, é a desconsideração das tensões radiais atuantes na chapa e no tubo central da hélice. Experimentos feitos por SLATTER (2000), em estacas hélice de deslocamento, apresentaram resultados que, em alguns casos, a proporção entre o torque requerido para vencer os esforços gerados por essas tensões representaram 90% do torque total utilizado para a instalação da hélice.

Van IMPE (1994) propôs uma expressão para o cálculo da energia por unidade de volume, para a instalação de uma estaca Atlas.

$$E_s = \frac{Q.v_i + n_i.T_i}{\Omega.v_i} \text{ (kJ / m}^3\text{)} \quad (2.42)$$

em que:

E_s = energia específica de instalação da hélice (kJ/m³);

Q = força axial de instalação (kN);

v_i = velocidade de instalação (m/min);

n_i = velocidade de rotação durante a instalação (rpm);

T_i = torque de instalação (kNm);

Ω = área da seção transversal do trado (m²).

BOTTIAU et al. (1998) propuseram um método que usa parâmetros de energia de instalação e cria valores fictícios de *CPT* ao longo da profundidade. A estimativa da capacidade de carga do elemento de fundação é feita com base nesses valores.

A técnica requer que primeiramente que seja feito um ensaio *CPT* ao lado da primeira estaca construída de modo a calibrar o modelo. BOTTIAU afirma que a energia específica

necessária para a instalação do *CPT*, no que se refere à sua ponta, pode ser calculada pela expressão abaixo.

$$E_c = q_c \frac{A_c \cdot v_c}{A_c \cdot v_c} \quad (2.43)$$

o que simplesmente significa que:

$$E_c = q_c \text{ (em kJ/m}^3 \text{ ou kNm/m}^3\text{)}$$

em que:

A_c = área da seção transversal do cone;

v_c = velocidade de instalação do cone (20 mm/s = 72 m/h).

A energia específica para a instalação da hélice é calculada usando a expressão (2.42) desenvolvida por Van Impe (1994).

Para cada camada são calculados os valores médios de E_c e de E_s e obtida a relação E_c/E_s .

Durante a execução das demais estacas da obra, valores fictícios de *CPT* são obtidos a partir da seguinte expressão abaixo.

$$CPT = E_s \frac{E_c}{E_s} \quad (2.44)$$

em que:

CPT = resistência fictícia do CPT;

E_s = energia média obtida através da equação (2.42) proposta por Van Impe (1994);

E_c/E_s = relação obtida, para cada camada, no ensaio realizado na primeira estaca executada na obra.

Segundo SLATTER (2000) a comparação que BOTTIAU (1998) faz entre E_s e E_c é questionável pelo fato de que a energia de perfuração considera o trabalho requerido para superar as forças de atrito que atuam no trado devido à aplicação do torque, em contraste com a energia requerida para instalar o cone que considera apenas o trabalho requerido para vencer a resistência de ponta do solo.

Na opinião de SLATTER (2000) o problema requer uma relação direta entre a energia de instalação da hélice e a capacidade de carga da estaca.

2.8.3 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA HÉLICE

GHALY & HANNA (1991) observaram que o desempenho das estacas metálicas helicoidais é dependente de diversos fatores, entre os quais, o diâmetro da hélice, o passo da hélice, o diâmetro do tubo central da hélice, a espessura da chapa da hélice, a rugosidade da hélice, a geometria dos elementos cortantes da hélice e da geometria da ponta do tubo central da hélice.

SLATTER (2000) estudou o comportamento de estacas hélice de deslocamento (*screw pile*) em areias. Em particular a relação entre, o transporte de solo, o deslocamento do solo, as tensões radiais e as forças de instalação. SLATTER apresentou um modelo teórico de previsão do transporte e do deslocamento do solo e do torque de instalação de trados com diversas geometrias. O desempenho do modelo foi verificado através da comparação com testes realizados em modelos na escala 1:4. Foram feitos ensaios em três diferentes tipos de hélices de deslocamento e foram observadas as características de transporte e de deslocamento do solo através da instalação das hélices, em areias tingidas, posteriormente exumadas. Uma segunda série de ensaios foi feita para comparar os parâmetros de instalação (torque, velocidade de penetração e velocidade de rotação) e tensões radiais atuantes na hélice durante a instalação.

Um novo modelo de previsão de transporte do solo, deslocamento e torque de instalação foi desenvolvido por SLATTER (2000) a partir do modelo de GUTYAR. Na opinião de SLATTER os transportadores helicoidais verticais são os que mais se assemelham às estacas hélice (*screw pile*), no entanto ele aponta algumas questões que precisam ser abordadas de forma a desenvolver um modelo que possa ser aplicado de forma mais adequada. Com base nessa opinião SLATTER modificou a teoria de GUTYAR (1956) levando em conta os seguintes fatores aplicados especificamente às estacas hélice.

- As estacas hélice são introduzidas no terreno como o resultado da aplicação de rotação (torque) e de força axial, desenvolvendo forças no material sobre a ponta da hélice e influenciando nas características de transporte;
- A introdução do trado no terreno normalmente requer deslocamento do solo;
- As hélices de deslocamento normalmente tem o tubo central com área da seção transversal variável para cada passo da hélice, o que obriga que o cálculo do volume de solo deslocado seja feito separadamente (para cada seção);
- As hélices de deslocamento comumente possuem passos variáveis ao longo da hélice, o que influi na capacidade de transporte de cada hélice;
- As estacas hélice não têm as bordas isoladas do terreno por algum revestimento;
- As estacas hélice são introduzidas no terreno sob a ação de tensões radiais;

- As tensões radiais são afetadas durante a introdução da hélice. Elas aumentam se o solo é deslocado ou diminuem se o solo é transportado de forma mais livre;
- Forças de atrito são geradas como resultado do contato das partes do trado com o solo;
- A estabilidade da parede do furo irá afetar as tensões radiais na interface trado/massa de solo.

2.8.4 INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE INSTALAÇÃO

Segundo Van IMPE (2004) o alívio de tensões durante a execução de estaca hélice contínua é inevitável quando o trado tem que atravessar uma ou mais camadas de solo resistente. A necessidade da diminuição da velocidade de avanço da hélice faz com que ocorra o transporte ascendente de solo, resultando em desconfinamentos, muitas vezes importantes.

A pressão de injeção de concreto constitui-se num fator importante para o desempenho de uma estaca hélice. Esse fato pode ser constatado em Van IMPE (1998), KORMANN et al. (2000), SLATTER (2000), ANJOS (2006), ARAÚJO et al. (2009), BAXTER (2009), O'NEILL & REESE (1999).

Segundo ALMEIDA NETO (2002) a ferramenta e o equipamento, utilizados na execução de estacas hélice contínua, podem influenciar seu desempenho.

SILVA (2011) afirma que a utilização de equipamento que disponibiliza baixo torque de instalação da hélice pode resultar no desconfinamento do fuste da estaca ou até mesmo subsidência, pelo fato da estaca ser perfurada com elevada rotação e baixa velocidade de avanço, o que resulta em grande quantidade de solo transportado para a superfície. O desconfinamento pode ocorrer porque o volume de solo transportado menos o empolamento pode ser superior ao volume da ferramenta.

A influência da pressão de injeção no comportamento da estaca é um fato comprovado por Van IMPE (1998), KORMANN et al. (2000), SLATTER (2000), ANJOS (2006), BAXTER (2009) e ARAÚJO et al. (2009).

2.8.5 RELAÇÕES ENTRE CAPACIDADE DE CARGA, TORQUE E ENERGIA DE INSTALAÇÃO DE ESTACAS

São relatados no presente item diversos estudos que concluem sobre correlações existentes entre a capacidade de carga do elemento isolado de fundação e o torque ou a energia demandada na instalação de um helicóide no solo, até a profundidade desejada.

Segundo PERKO et al. (2000) a capacidade de carga de uma estaca metálica helicoidal pode ser determinada por meio de correlações com o torque de instalação, inclusive, PERKO et al. (2000) citam esse item como uma das vantagens dessa estaca em relação a outros tipos de fundação profunda.

CLEMENCE et al. (1994) determinaram através de ensaios realizados pela empresa A.B.CHANCE COMPANY, que a capacidade de carga à tração podia ser estimada a partir do valor médio do torque de instalação da estaca metálica helicoidal, correspondente à penetração final igual a três vezes o diâmetro da maior hélice da estaca.

GHALY et al. (1991b) desenvolveram uma relação teórica entre o torque de instalação e a capacidade de carga a tração de uma ancoragem em hélice instalada em areia. Os autores realizaram ensaios em cinco modelos reduzidos com diferentes geometrias com o objetivo de verificar o método desenvolvido. Segundo GHALY et al. (1991b) as forças desenvolvidas no sistema se devem à penetração impedida da hélice que é igual à capacidade de carga à tração da estaca helicoidal. Os autores chegaram na equação escrita abaixo.

$$T = F_v \cdot \tan(\psi + \lambda) \left[\frac{d^3 - d_0^3}{3(d^2 - d_0^2)} \right] \quad (2.45)$$

em que:

T = torque necessário ao avanço da hélice

F_v = força vertical atuante na hélice

ψ = ângulo de inclinação da hélice medido no círculo correspondente à superfície onde as forças se equilibram

λ = ângulo de atrito na interface hélice - areia

d = diâmetro externo da hélice

d_0 = diâmetro interno da hélice

Os resultados dos ensaios apresentaram, em relação ao modelo teórico, boa concordância para as ancoragens rasas e discrepância mais elevada para as ancoragens profundas.

O desenvolvimento matemático completo que obtêm a equação 2.45 pode ser visto em TSHUA (2007).

GHALY e HANNA (1991) obtiveram torques de instalação de estacas metálicas helicoidais em areia através de estudos teóricos e também experimentais. Foram realizados ensaios em cinco modelos de estacas com diferentes geometrias. Para areia seca os autores chegaram à seguinte expressão.

$$\left[\frac{Q_u}{\gamma_{ar} A_{sh} H_i} \right] = 2 \left[\frac{T_i}{\gamma_{ar} A_{sh} H_i p} \right]^{1.1} \quad (2.46)$$

em que:

Q_u = capacidade de carga

γ_{ar} = peso específico da areia

A_{sh} = área da superfície da hélice

H_i = profundidade de instalação

T_i = torque de instalação

p = passo da hélice

TSHUA (2007) faz uma apresentação mais detalhada do trabalho de Ghaly e Hanna (1991).

PERKO (2000) se baseia no princípio da conservação da energia para desenvolver um modelo teórico que relaciona a energia necessária para a instalação da estaca metálica helicoidal, na profundidade de interesse, para pequenos deslocamentos (PERKO et al. 2000 recomenda $d = 2,5$ cm), com a capacidade de carga da estaca.

PERKO (2000) obteve a expressão abaixo.

$$Q = \frac{12d_{eh}(2\pi T + F_{si}p) \left[r_0^2 + \sum_m (R_m^2 - r_0^2) \right]}{3 \left[2r_0^3 p + \sum_{m1} (R_n^2 - r_0^2) t_n^2 \right] + 16\pi\alpha \left[3r_0^3 \lambda_{he} + \sum_m (R_m^3 - r_0^3) t_m \right]} \quad (2.47)$$

em que:

d_{eh} = deslocamento da estaca helicoidal

T = torque de instalação

F_{si} = força exercida no sentido da instalação

p = passo da hélice

r_0 = raio do tubo central da hélice

m = número total de lâminas helicoidais da estaca

$m1$ = número de lâminas helicoidais que atravessam trajetórias independentes

R_m = raio da lâmina "m"

R_n = raio da lâmina "n"

t_m = espessura da chapa da hélice "m"

t_n = espessura da chapa da hélice "n"

α = razão entre o cisalhamento lateral e a resistência à penetração

λ_{he} = comprimento efetivo da haste da estaca

TSHUA (2007) desenvolveu um modelo teórico que relaciona o torque de instalação de uma estaca metálica helicoidal com a capacidade de carga à tração, em solo arenoso.

O modelo considerou que o torque de instalação é igual ao momento resistente à instalação das hélices, mais o momento resistente à instalação da haste (tubo central da hélice); e a capacidade de carga à tração da estaca é igual à soma da resistência por atrito lateral do tubo central da hélice com as capacidades de carga relativas às hélices.

As equações 2.48 e 2.49 expressam o texto acima.

$$T_i = T_h + T_s \quad (2.48)$$

em que:

T_i = torque de instalação

T_h = momento resistente à instalação das hélices

T_s = momento resistente à instalação do tubo central da estaca helicoidal

O momento resistente à instalação nas hélices (T_h) pode ser expresso por:

$$T_h = \sum_{i=1}^{n_h} T_{hi} \quad (2.49)$$

em que:

T_{hi} = momento resistente à instalação atuante na hélice "i"

i = índice de 1 a n_h

n_h = número de hélices

Segundo TSHUA (2007) a capacidade de carga à tração (Q_u) pode ser calculada pela expressão abaixo.

$$Q_u = Q_s + Q_h \quad (2.50)$$

em que:

Q_u = capacidade de carga à tração

Q_s = resistência por atrito lateral do tubo

Q_h = parcela da capacidade de carga à tração relativa às hélices

A parcela de capacidade de carga à tração relativa às hélices (Q_h) pode ser expressa por:

$$Q_h = \sum_{i=1}^{n_h} Q_{hi} \quad (2.51)$$

em que:

Q_{hi} = parcela de capacidade de carga relativa à hélice "i"

i = índice de 1 a n_h

n_h = número de hélices

TSHUA (2007) relacionou Q_s com T_s através da expressão:

$$Q_s = \frac{2T_s}{d_0} \quad (2.52)$$

em que:

d_0 = diâmetro externo do tubo da hélice

Para a capacidade de carga à tração relativa às hélices TSHUA (2007) fez uma analogia entre a estaca metálica helicoidal e o parafuso de força descrito por FAIRES (1943). Dessa analogia resultou a expressão:

$$Q_h = \frac{2T_h}{d_c \operatorname{tg}(\theta + \delta_r)} \quad (2.53)$$

em que:

θ = ângulo da linha correspondente à superfície da hélice com a horizontal

δ_r = ângulo de atrito residual na interface entre a hélice e a areia envolvente

d_c = diâmetro do círculo medido na superfície da hélice, onde as forças resistentes são concentradas durante a instalação.

Como resultado o modelo teórico proposto por TSHUA (2007) pôde ser expresso pela equação:

$$Q_u = \frac{2T_s}{d_0} + \frac{2T_h}{d_c \operatorname{tg}(\theta + \delta_r)} \quad (2.54)$$

O torque total de instalação pôde ser expresso pela expressão (2.55) abaixo.

$$T = \frac{Q_s d_0}{2} + \frac{Q_h d_c \tan(\theta + \delta_r)}{2} \quad (2.55)$$

ARAÚJO et al. (2009) analisaram os resultados de seis provas de carga estáticas em estacas do tipo hélice contínua. As análises concluíram que a pressão de injeção pode influenciar na capacidade de carga e que existe uma correlação entre o torque acumulado e a capacidade de carga do elemento isolado de fundação.

SILVA e CAMAPUM de CARVALHO (2010) desenvolveram uma metodologia denominada *SCCAP* que visava fornecer condições para que os requisitos de projeto em termos de capacidade de carga fossem atendidos. A metodologia, que utiliza um tratamento estatístico, foi desenvolvida com base na hipótese de que a capacidade de carga do elemento isolado de fundação está diretamente relacionada com o trabalho despendido para a perfuração da estaca.

As rotinas propostas pela metodologia foram introduzidas em um *software* que controla o sistema de monitoramento da execução da estaca. Segundo os autores, destacam-se os itens abaixo.

- A velocidade crítica de avanço da escavação, sugerida por VIGGIANI (1989) é controlada em tempo real;
- A medida do trabalho realizado durante a escavação da estaca é feita em tempo real;
- É feito um tratamento estatístico da amostra pré-estabelecida representativa da população (estaqueamento) obtendo-se medidas de tendência central e os momentos da amostra;
- Durante a execução de cada estaca os resultados obtidos (trabalho) orientam o operador e o engenheiro de fundação da obra sobre a necessidade ou não de se aumentar o comprimento da estaca;
- A velocidade máxima de extração da hélice é sinalizada de sorte a garantir o diâmetro desejado da estaca, incluindo-se o super consumo desejado;
- Durante a execução do estaqueamento é possível constatar regiões onde, provavelmente, as características geotécnicas apresentam-se discrepantes.

SILVA (2011) apresentou a metodologia *SCCAP*, desenvolvida para o controle da execução de um conjunto de estacas do tipo hélice contínua. O trabalho foi desenvolvido com base no princípio de conservação de energia, mais especificamente no princípio de HAMILTON.

SILVA (2011) comprovou que a energia necessária para escavar uma estaca está relacionada à capacidade de carga da estaca desde que o processo de escavação esteja sistematizado. Foram utilizadas sondagens de campo, provas de carga e dados de monitoramento coletados durante a execução de estaqueamentos de obras localizadas na Capital do Brasil. Provas de carga estáticas executadas em diversos sítios formaram a base para a validação da metodologia CAMAPUM de CARVALHO et al. (2008 e 2010) utilizada nas avaliações de comportamento das estacas ensaiadas.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DA PERFURATRIZ MULTIFUNCIONAL

3.1 CONCEPÇÃO

A perfuratriz foi desenvolvida com o objetivo de satisfazer, pelo menos, os seguintes requisitos:

- Ter capacidade de executar diversos tipos de estacas com o objetivo de minimizar a descontinuidade de operação do equipamento, inclusive em épocas de recessão econômica;
- Executar estacas do tipo hélice contínua monitorada com diâmetros de 250 mm, 300, 350, 400, 500 e 600 mm e com profundidades de até 18,00 m;
- Executar estacas do tipo hélice segmentada monitorada com diâmetros de 250 mm, 300, 350, 400 e 500 mm e com profundidades de até 22,00 m;
- Executar estacas escavadas, em solos não saturados, com diâmetros de 250 mm, 300, 400, 500, 600 e 700 mm e com profundidades de até 18,00 m;
- Executar estacas escavadas, em solos não saturados, com diâmetros de 250 mm, 300, 400, 500 e 600 mm e com profundidades de até 22,00 m;
- Executar estacas do tipo raiz com diâmetros nominais de 120 mm, 150, 200, 310 e 410 mm e com profundidades de até 30 m;
- Executar estacas do tipo *hollow-auger* com diâmetros de 250, 300, 350, 400 e 500 mm e com profundidades de até 22,00 m;
- Apresentar especificações técnicas tais como torque da mesa rotativa, força de extração da hélice, rotações, pressão de trabalho do sistema hidráulico, entre outras, compatíveis com aquelas dos equipamentos nacionais e; ou importados, dentro da variação de diâmetros e profundidades executados por esses equipamentos;
- Combinar a execução de estaca do tipo hélice contínua com a do tipo hélice segmentada, resultando em equipamento mais baixo que aqueles que executam estacas do tipo hélice contínua;
- Utilizar componentes nacionais, sempre que possível, com o objetivo de diminuir custos e facilitar a manutenção e reposição de tais componentes;

- Especificar componentes importados, quando não for possível e; ou conveniente utilizar componentes nacionais, mas que tenham aplicação em equipamentos nacionais tais como: bombas de concreto, equipamentos de terraplanagem, guindastes, entre outros; com o objetivo de diminuir custos e tornar menos complexa a manutenção e reposição desses componentes;
- Utilizar sistema de monitoramento eletrônico de fabricação nacional, também com o objetivo de diminuir custos e facilitar a manutenção e reposição de peças;
- Ter como resultado um equipamento com custo de aquisição menor que os existentes, dentro da mesma categoria, e que execute estacas com qualidade e produtividade semelhantes ou maiores;

3.2 PERFURATRIZ MONTADA

A perfuratriz permite, basicamente, duas possibilidades de montagem:

- a) Para execução de estacas dos tipos: hélice contínua, hélice segmentada, escavada e *hollow – auger*.

Nesse caso o equipamento é montado com dois segmentos de torre e sua altura é de 23,19 m com a torre na vertical (posição de trabalho). A mesa rotativa utilizada disponibiliza torque máximo compatível com as necessidades para execução de estacas do tipo hélice contínua e velocidades de rotação variáveis de 12 a 22 rpm. Uma morsa simples (com dois cilindros hidráulicos) é utilizada para fixação da hélice segmentada ou do trado *hollow-auger*.

- b) Para a execução de estacas do tipo raiz.

Nesse caso a perfuratriz fica com 13,00 m de altura, com a torre na vertical, já que um único segmento de torre é utilizado. Duas morsas são utilizadas para facilitar a fixação, montagem e desmontagem dos tubos de revestimento. Um cilindro de empuxo axial é utilizado para aplicar forças de compressão nas hastes de perfuração na fase de perfuração e forças de tração na fase de injeção e extração dos tubos de revestimento. A mesa rotativa disponibiliza torques bem menores que na situação anterior, porém compatíveis com os torques requeridos para a execução de estacas raiz, sendo que a velocidade de rotação é variável de 20 a 150 rpm.

A Figura 3.1 apresenta um desenho de conjunto e a Figura 3.2 mostra duas vistas em duas dimensões da perfuratriz para o caso de execução de estacas que utilizam trados.

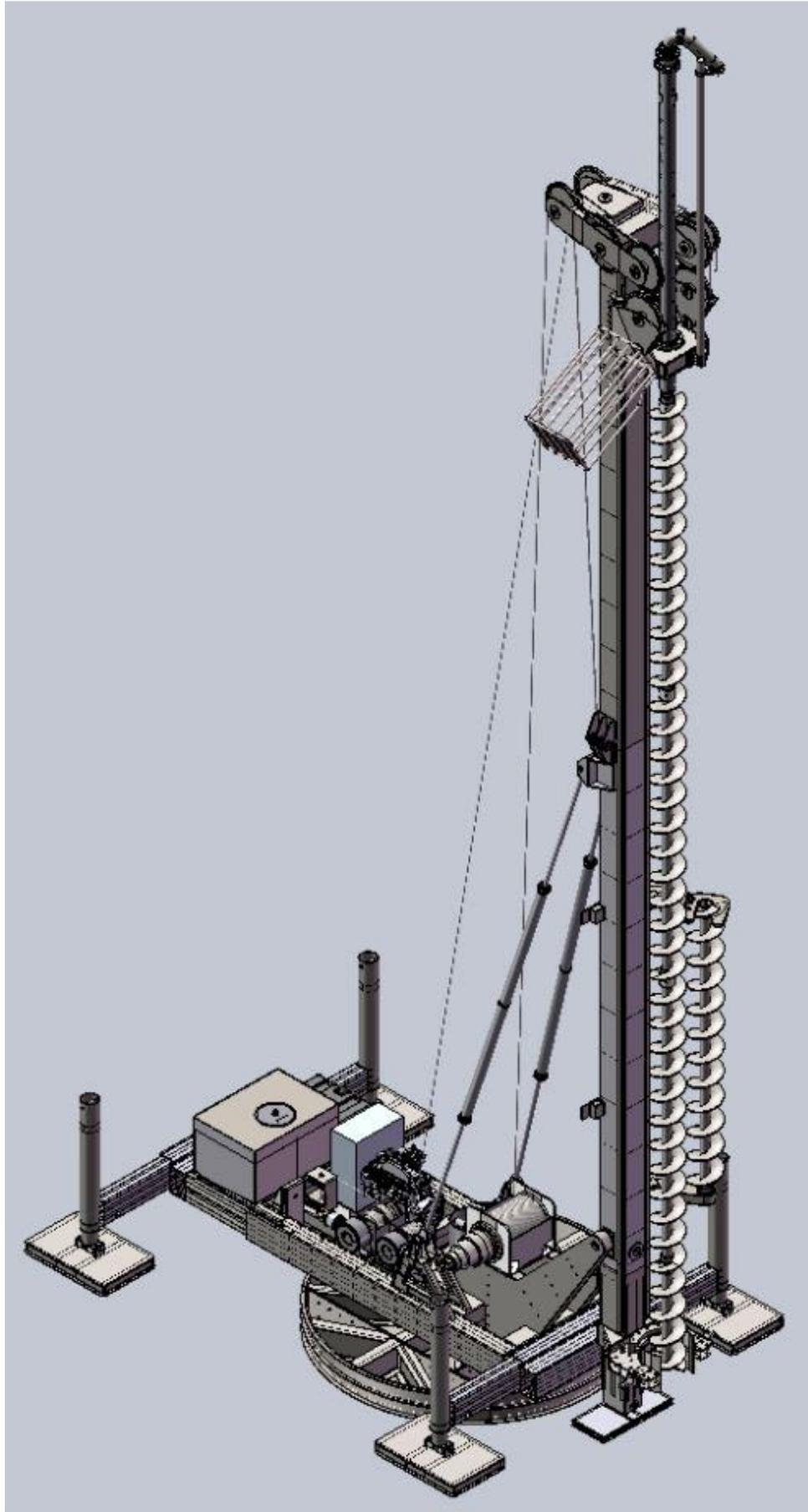


Figura 3.1 Perfuratriz montada para execução dos tipos de estacas que utilizam trados helicoidais.

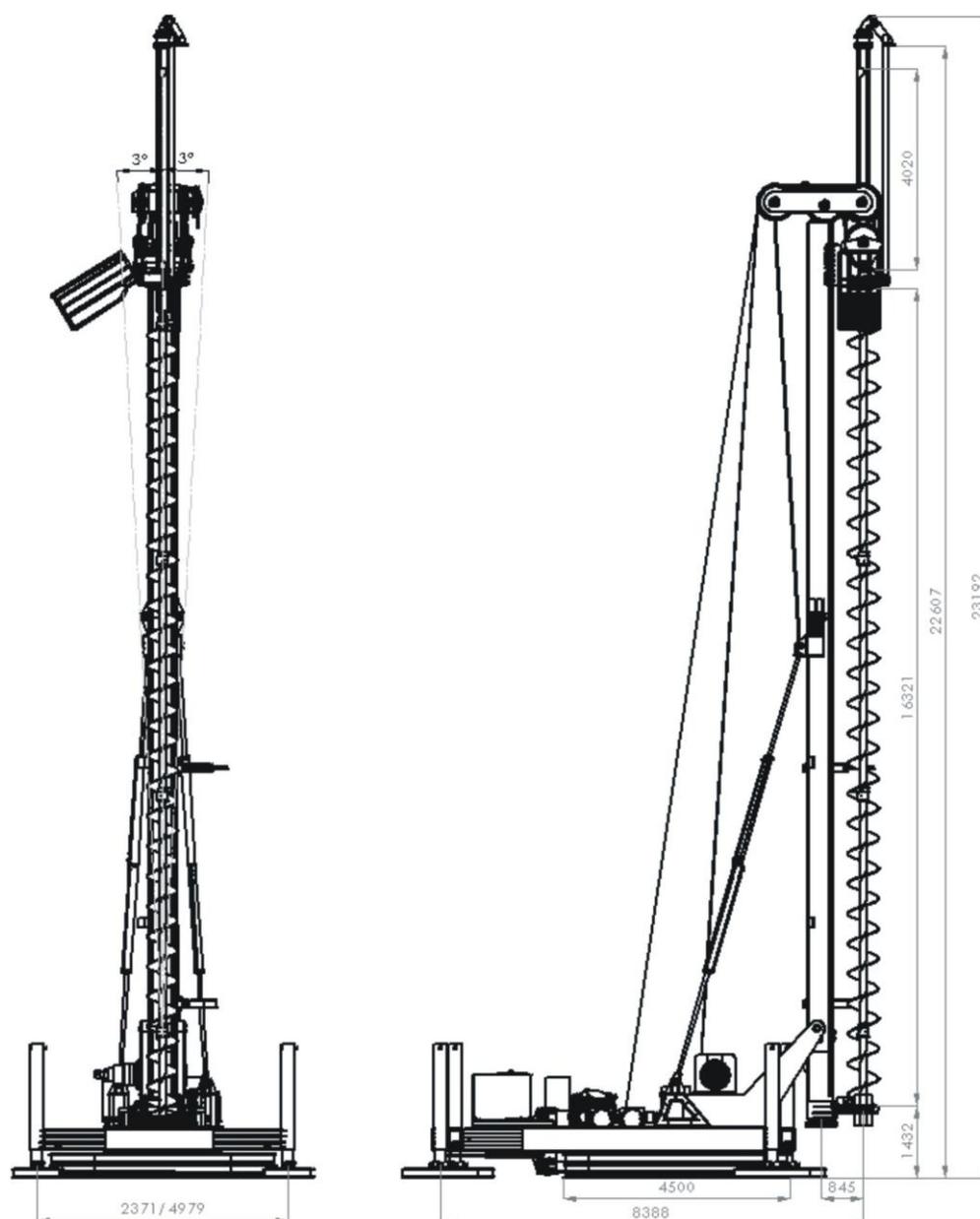


Figura 3.2 Vistas frontal e lateral da perfuratriz montada para execução de estacas que utilizam helicóides.

A Figura 3.3 mostra um desenho de conjunto da perfuratriz montada com os acessórios para a execução de estacas do tipo raiz.

Os chassis, externo e interno (Figura 3.4 e Figura 3.5) são ligados entre si através de dois cilindros hidráulicos denominados cilindros de translação que quando acionados provocam o movimento de um chassi em relação ao outro (GENNARO, 1997). O sistema de nivelamento e elevação (sistema de patolamento) trabalha em conjunto com o chassi interno; e é constituído por quatro conjuntos iguais sendo que cada conjunto é formado por um

cilindro hidráulico de elevação que trabalha na vertical, um cilindro hidráulico de expansão que trabalha na horizontal, uma estrutura metálica e uma placa (patola).

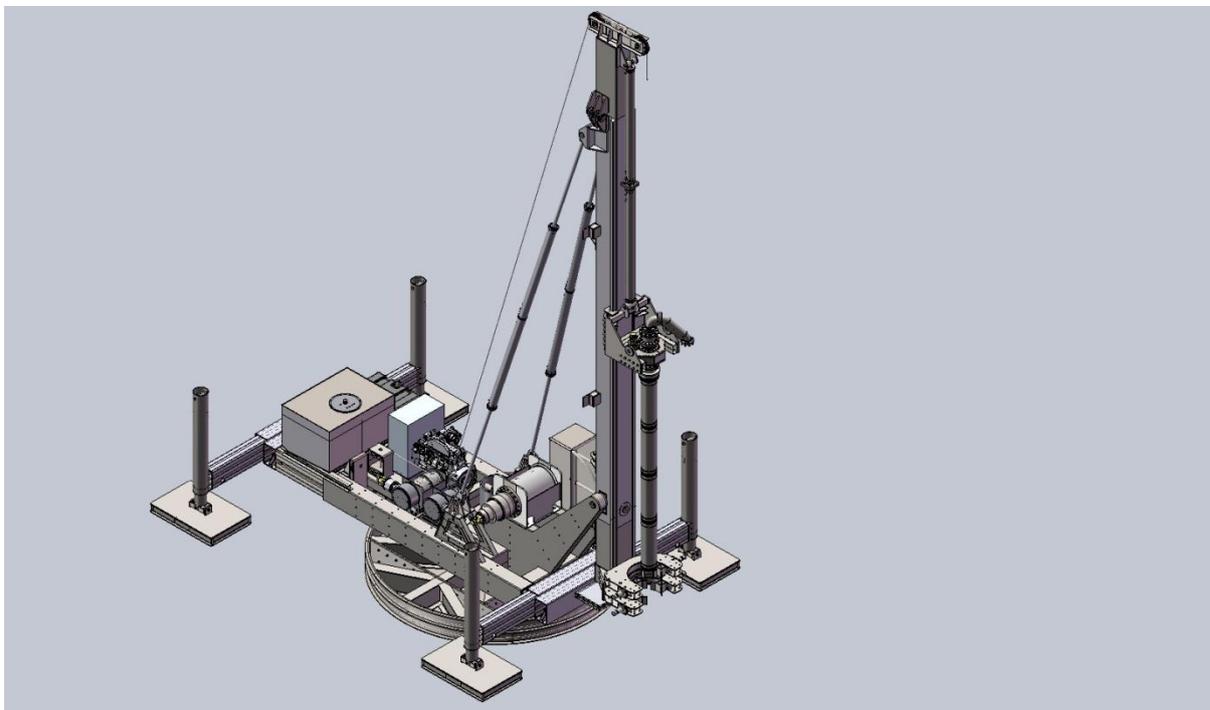


Figura 3.3 Perfuratriz montada para execução de estacas do tipo raiz.

Comprimindo-se as placas existentes nas extremidades dos cilindros de patolamento, contra o terreno, de sorte que a perfuratriz fique apoiada totalmente nesse sistema de apoio, ou seja, de forma que a placa do conjunto central de elevação fique posicionada acima da superfície do solo, e portanto, com liberdade de movimento, o chassi externo pode ser deslocado estendendo-se ou recolhendo-se as hastes dos cilindros de translação.

A placa de apoio ou placa do conjunto central de elevação (Figura 3.4) pode ser comprimida contra o solo estendendo-se a haste do cilindro hidráulico que faz parte desse conjunto. Nesse caso o conjunto de nivelamento ficará posicionado acima da superfície do solo e a perfuratriz ficará apoiada na placa. Nessa condição o chassi interno ficará apoiado no chassi externo podendo sofrer movimentos de translação na direção do comprimento da perfuratriz e a mesma poderá girar em torno do eixo do conjunto central de elevação.

As Figuras 3.4 e 3.5 mostram, respectivamente, o chassi interno posicionado a esquerda e a direita do chassi externo.

Para que a escavação da estaca possa ser iniciada a perfuratriz deve ser posicionada com a torre na vertical; com o eixo da hélice coincidindo com o centro da estaca e com o

equipamento apoiado no solo através das quatro patolas do sistema de nivelamento e autocarregamento, da placa do conjunto de elevação central e da patola da torre.

A Figura 3.6 mostra uma vista em planta do conjunto da perfuratriz.

O carregamento da perfuratriz é feito aumentando-se a distância entre centros das placas de elevação, através dos quatro cilindros expansores (horizontais) de sorte que a distância livre entre as placas fique maior que a largura da carreta, e elevando-se o equipamento através dos quatro cilindros de elevação vertical. A Figura 3.7 mostra um desenho da perfuratriz apoiada no solo através dos quatro cilindros de elevação vertical e em condições de receber a prancha de carregamento sob a estrutura do equipamento. A Figura 3.8 mostra um desenho da perfuratriz apoiada no solo e com a prancha de carregamento posicionada sob a estrutura do equipamento. A Figura 3.9 mostra a perfuratriz apoiada na prancha da carreta e em condições de ser fixada à mesma por meio de cabos de aço e catracas adequadas para que o transporte do equipamento possa ser efetivado.

Os principais desenhos dos conjuntos que formam a perfuratriz bem como o relato da função de cada conjunto são apresentados no volume 2 da presente tese, no APÊNDICE A.

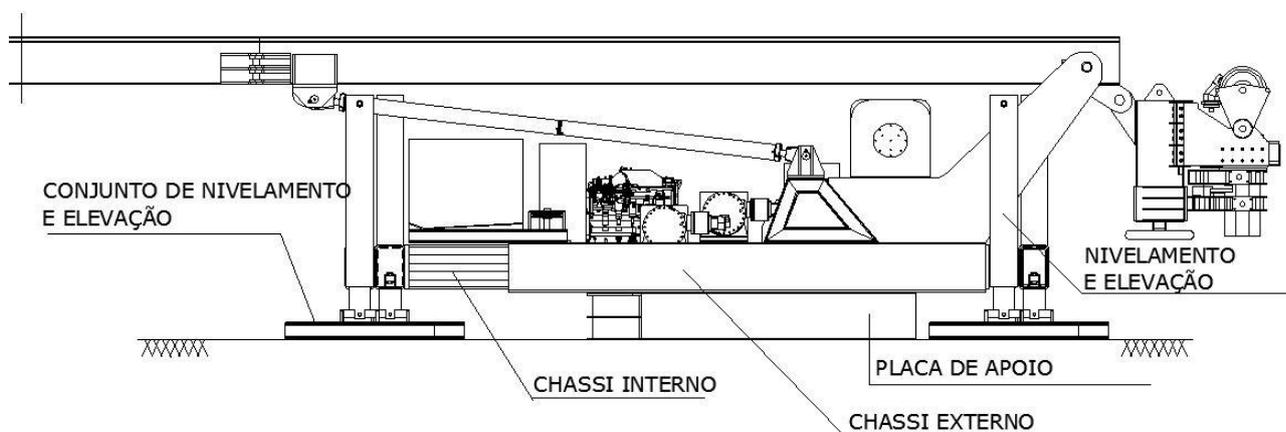


Figura 3.4 Chassi interno posicionado à esquerda do chassi externo.

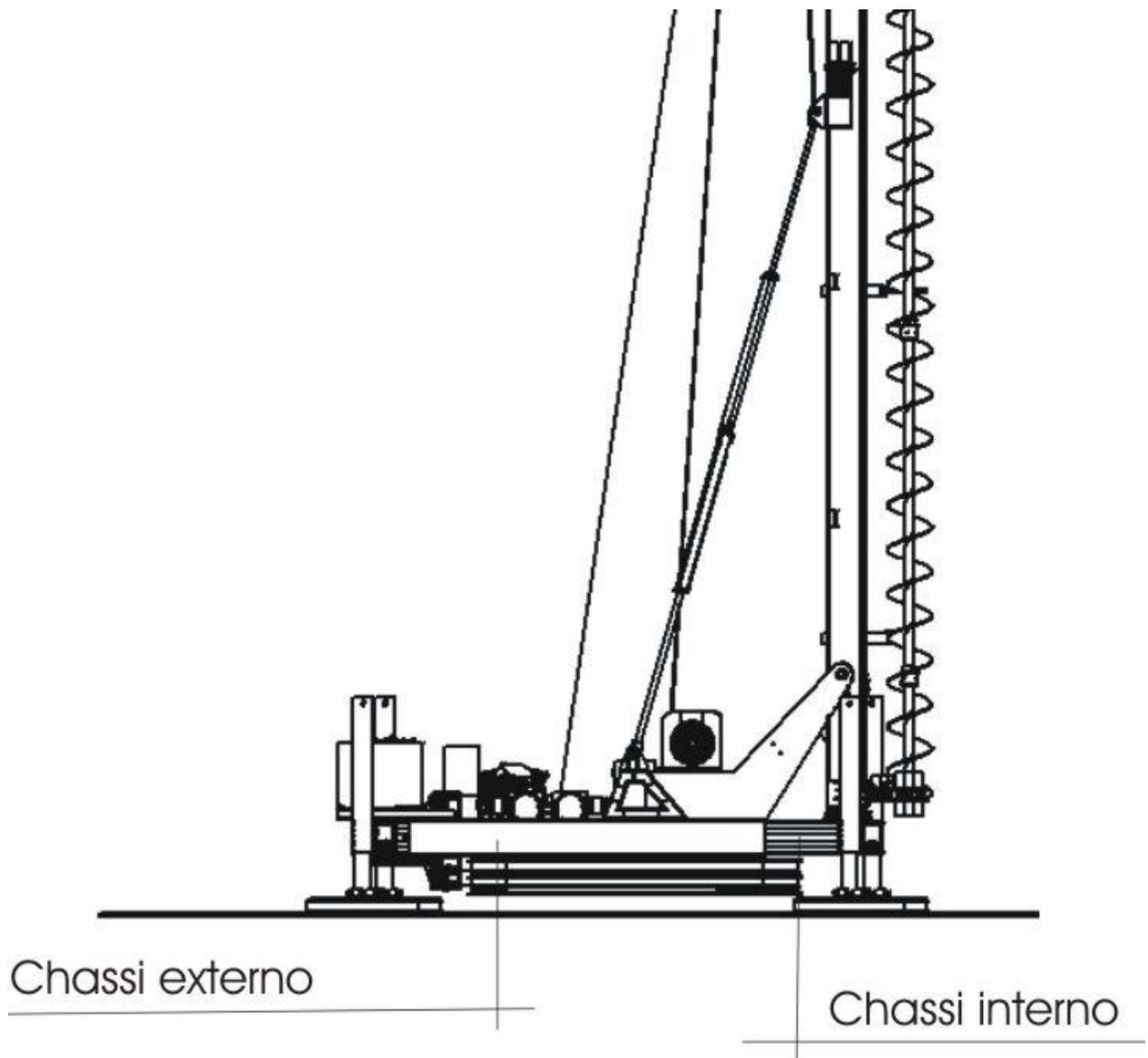


Figura 3.5 Chassi interno posicionado à direita do chassi externo.

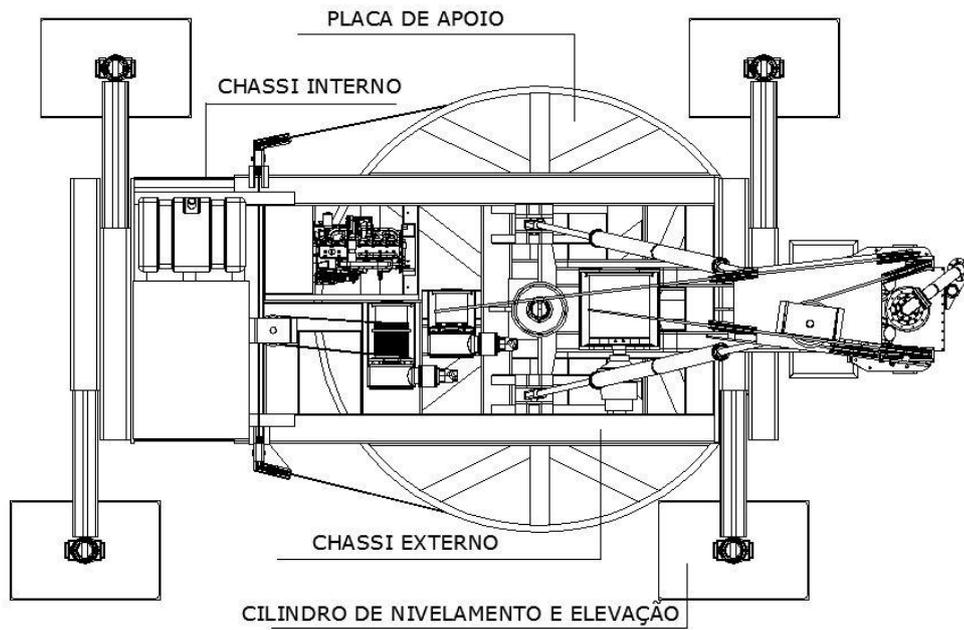


Figura 3.6 Desenho de conjunto da perfuratriz. Vista em planta.

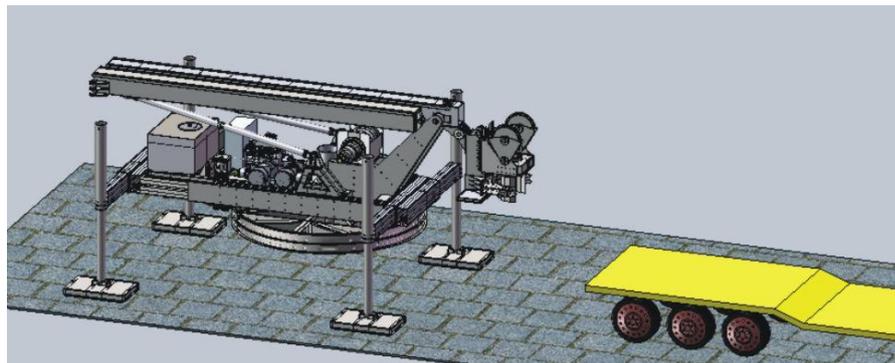


Figura 3.7 Perfuratriz apoiada no solo e em posição adequada para receber a prancha de carregamento sob sua estrutura.

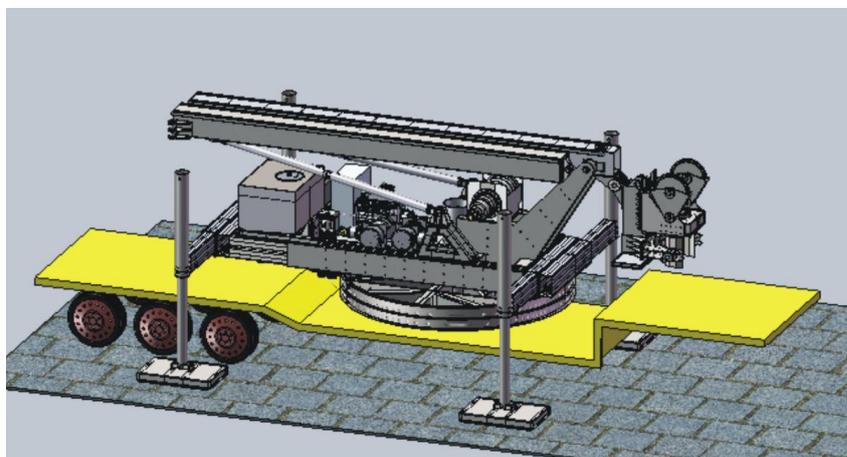


Figura 3.8 Perfuratriz apoiada no solo e com a prancha de carregamento posicionada sob sua estrutura.

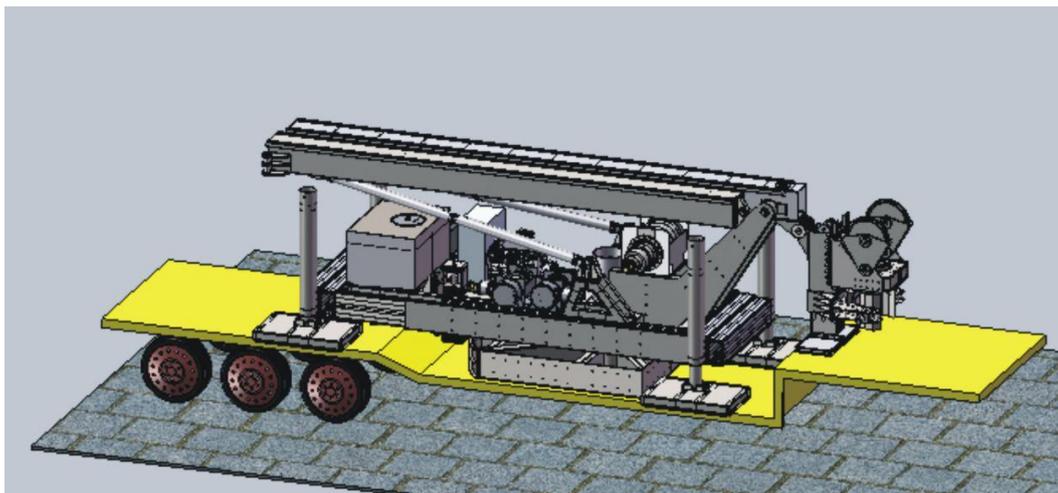


Figura 3.9 Perfuratriz apoiada na prancha de carregamento.

3.3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

A Tabela 3.1 apresenta as especificações técnicas do equipamento desenvolvido.

3.4 DIMENSIONAMENTO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DA PERFURATRIZ

3.4.1 POTÊNCIA NECESSÁRIA

Para a mesa rotativa e guinchos foram adotados os seguintes componentes:

- Motor a diesel marca CUMMINS, modelo 6CTA-8.3-P que fornece até 220 hp a 2100 rpm e até 234 hp a 2200 rpm. (CUMMINS, 2009);
- Bomba hidráulica marca REXROTH, modelo A11V0 95 (bomba 1) de pistões axiais de vazão variável, com volumétrico máximo de $95 \text{ cm}^3/\text{rotação}$ para pressão máxima contínua de trabalho de 35 MPa (350 bar) e velocidade máxima de rotação de 2350 rpm, para alimentação dos motores hidráulicos da mesa rotativa (BOSCH REXROTH, 2009a);
- Bomba hidráulica marca REXROTH, modelo A11V0 95 (bomba 2) de pistões axiais de vazão variável, com deslocamento volumétrico máximo de $95 \text{ cm}^3/\text{rotação}$ para pressão máxima contínua de trabalho de 35 MPa (350 bar) e velocidade máxima de rotação de 2350 rpm, para alimentação dos motores hidráulicos do guincho principal ou para somar vazão nos motores hidráulicos da mesa rotativa;
- Bomba hidráulica (bomba 3) de engrenagens, de vazão fixa, com deslocamento volumétrico de $20 \text{ cm}^3/\text{volta}$ e pressão máxima de trabalho de 17 MPa (170 bar), para acionamento dos cilindros de patolamento, cilindros de movimentação da torre,

cilindros de translação dos chassis, cilindros do conjunto de elevação, cilindros da morsa, cilindros de acionamento do suporte do trado segmentado e cilindro de empuxo axial da mesa rotativa para o caso de execução de estacas raiz. (BOSCH REXROTH, 2009b).

As vazões teóricas das bombas serão:

Bomba 1:

$$Q_{b1} = d_{v1} \cdot n_{md} \quad (3.1a)$$

Bomba 2:

$$Q_{b2} = d_{v2} \cdot n_{md} \quad (3.1b)$$

Bomba 3:

$$Q_{b3} = d_{v3} \cdot n_{md} \quad (3.1c)$$

em que:

Q_{b1} , Q_{b2} e Q_{b3} = vazões das bombas B1, B2 e B3 (cm^3/min);

d_{v1} , d_{v2} e d_{v3} = deslocamentos volumétricos das bombas B1, B2 e B3 ($cm^3/rotação$);

n_{md} = velocidade de rotação do motor a diesel (rpm).

$$Q_{b1} = 95 \cdot 2100 = 199500 \text{ cm}^3/min = 199,5 \text{ l/min};$$

$$Q_{b2} = 95 \cdot 2100 = 199500 \text{ cm}^3/min = 199,50 \text{ l/min};$$

$$Q_{b3} = 20 \cdot 2100 = 42000 \text{ cm}^3/min = 42 \text{ l/min};$$

A expressão para o cálculo da potência consumida está indicada abaixo.

$$P_{kW} = \frac{p \cdot Q}{45,6 \cdot \eta_g} \cdot 0,7457kW \quad (3.2)$$

em que:

P_{kW} = potência (kW)

p = pressão (MPa)

η_g = eficiência global do

sistema hidráulico

Na prática de projeto móbil é comum usar $\eta_g = 0,85$

Supondo que a bomba 1 (B_1) que alimenta os motores hidráulicos da mesa rotativa esteja trabalhando na pressão de 30 MPa e que as demais bombas estejam funcionando em vazio e com perda de pressão no sistema hidráulico igual a $1,5 \text{ MPa}$, a potência consumida será:

$$P_{kw} = \frac{30 \cdot 199,5}{45,6 \cdot 0,85} \cdot 0,7457 + \frac{1,5 \cdot 199,5}{45,6 \cdot 0,85} \cdot 0,7457 + \frac{1,5 \cdot 42}{45,6 \cdot 0,85} \cdot 0,7457 = 122,1 \text{ kW} \quad (3.2a)$$

A potência em (hp) pode ser expressa por:

$$P_{hp} = \frac{P_{kw}}{0,7457} \text{ (hp)} \quad (3.3)$$

$$P_{hp} = \frac{122,1}{0,7457} = 163,8 \cong 164 \text{ hp} \quad (3.3a)$$

Supondo que as bombas B_1 e B_2 alimentam os motores do cabeçote rotativo e considerando a vazão máxima de cada bomba, tem-se:

$$P_{kw} = \frac{30 \cdot 199,5}{45,6 \cdot 0,85} \cdot 0,7457 + \frac{30 \cdot 199,5}{45,6 \cdot 0,85} \cdot 0,7457 + \frac{1,5 \cdot 42}{45,6 \cdot 0,85} \cdot 0,7457 = 231,49 \text{ kW} \quad (3.4)$$

$$P_{hp} \cong 310,4 \text{ hp} \quad (3.4a)$$

Adotando 10% para acionamentos parasitários obtém-se:

$$P_{hp} \cong 342 \text{ hp} \quad (3.4b)$$

Observa-se que a operação simultânea com duas bombas de vazão e pressão elevadas exigirá um motor com potência bem maior que 285 hp que é a potência que pode ser disponibilizada pelo motor inicialmente adotado.

Aceitando-se trabalhar com pressões da ordem de 20 MPa quando se desejar utilizar simultaneamente as duas bombas tem-se:

$$P_{kw} = \frac{20 \cdot 199,5}{45,6 \cdot 0,85} \cdot 0,7457 + \frac{20 \cdot 199,5}{45,6 \cdot 0,85} \cdot 0,7457 + \frac{1,5 \cdot 42}{45,6 \cdot 0,85} \cdot 0,7457 = 154,7 \text{ kW} \quad (3.4c)$$

$$P_{hp} \cong 207 \text{ hp} \quad (3.4d)$$

Adotando-se 10% para perdas parasitárias obtém-se:

$$P_{hp} \cong 228 \text{ hp} \quad (3.4e)$$

Para pressões próximas de 20 MPa (200 bar) pode-se especificar o motor CUMMINS modelo 6CT 8.3 C que fornece 220 hp a 2100 rpm . (COMINDUS, 2009). Para pressões entre 20 e 30 MPa, as vazões deverão ser combinadas de sorte a não exceder a potência disponível.

3.4.2 MESA ROTATIVA

A partir dos elementos de projeto especificados abaixo obtêm-se os torques e rotações na hélice.

- dois motores hidráulicos REXROTH modelo A2FM 107, com deslocamento volumétrico de $106,7 \text{ cm}^3/\text{rotação}$ (BOSCH REXROTH, 2009c);
- dois redutores BREVINI modelo ED 2155 com redução igual a 23,4 ($i=23,4$);
- uma caixa redutora com dois pinhões de dentes helicoidais, modulo 10 ($m=10$), 17 dentes e uma coroa com 61 dentes.

3.4.2.1 TORQUE NO MOTOR HIDRÁULICO

O motor A2FM 107 disponibiliza o torque de 680 Nm a 400 bar .

Para pressão de 300 bar o valor aproximado do torque do motor hidráulico será:

$$T_{mh} = 680 \cdot \frac{300}{400} = 510 \text{ Nm} \quad (3.5)$$

3.4.2.2 TORQUE NO EIXO DE SAÍDA DO REDUTOR INTERMEDIÁRIO

Acoplando-se cada motor hidráulico a um redutor BREVINI, modelo ED 2155 (reductor

1) com redução efetiva igual a 23,4 obtém-se o seguinte torque no eixo de saída do reductor:

$$T_{red1} = 510 \cdot 23,4 = 11934 \text{ Nm} = 11,93 \text{ kNm} \quad (3.6)$$

3.4.2.3 TORQUE NA HÉLICE PARA PRESSÃO DE TRABALHO DE 30 MPa (300 bar)

Como foram adotados dois motores hidráulicos e dois redutores ED 2155 o torque na saída da mesa rotativa será:

$$T_{hel.} = 2 \cdot 11,93 \cdot \frac{Z_c}{Z_p} = 2 \cdot 11,93 \cdot \frac{61}{17} = 85,6 \cong 86 \text{ kNm} \quad (3.7)$$

Sendo que : $\frac{Z_c}{Z_p} = i_{red2} = 3,588$ é a relação de transmissão da caixa redutora.

3.4.2.4 VELOCIDADES DE ROTAÇÃO

As velocidades de rotação para o caso de utilização de uma bomba serão:

$$\text{a) dos motores hidráulicos: } n_{mh} = \frac{199500}{2 \cdot 106,7} \cong 935 \text{ rpm} \quad (3.8)$$

$$\text{b) dos redutores ED 2155: } n_{red1} = \frac{935}{23,4} \cong 40 \text{ rpm} \quad (3.9)$$

$$\text{c) do redutor 2 e da hélice: } n_{red2} = n_i = \frac{40}{3,588} \cong 11 \text{ rpm} \quad (3.10)$$

Para o caso de utilização de duas bombas de vazão variável com o deslocamento volumétrico máximo, as rotações calculadas através das equações (3.8) e (3.9) irão dobrar.

3.4.2.5 TORQUES NA HÉLICE PARA PRESSÕES DE TRABALHO DE 20 MPa E DE 25MPa E ALIMENTAÇÃO DO CABEÇOTE ROTATIVO COM DUAS BOMBAS

Para pressão de 20 MPa (200 bar) obtém-se aproximadamente o seguinte torque:

$$T_{mh} = 680 \cdot \frac{200}{400} = 340 \text{ Nm} \quad (3.11)$$

A redução total é calculada por:

$$i_g = i_{rp} \cdot i_{cr} = 23,4 \cdot 3,588 = 83,9592 \cong 83,96 \quad (3.12)$$

em que i_{rp} e i_{cr} são, respectivamente, as reduções dos redutores planetários (dois redutores) e da caixa redutora.

O torque na hélice resultará em:

$$T_{hel} = 340 \cdot 83,96 \cong 57 \text{ kNm} \quad (3.13)$$

Para pressão de 25 MPa (250 bar) o torque na hélice será de aproximadamente:

$$T_{hel} = 57 \cdot \frac{250}{200} = 71 \text{ kNm} \quad (3.14)$$

Os fabricantes de equipamentos destinados à execução de fundações, normalmente, fornecem os valores teóricos dos parâmetros relacionados ao desempenho de seus equipamentos. A NBR 6122:2010 apresenta, na Tabela F3, os diâmetros e comprimentos de estacas hélice contínua que podem ser executadas, em função do torque da mesa rotativa e da

força de extração do guincho, sem, no entanto, mencionar se esses valores são efetivos ou nominais. Provavelmente a norma refere-se aos valores de torques e arranques fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos já que nenhuma exigência é feita no sentido de ser medidos os valores efetivos dessas grandezas. Portanto, optou-se neste capítulo, pelos cálculos dos valores de torques sem consideração das eficiências dos diversos elementos de projeto tais como motores hidráulicos, redutores, etc.

3.4.2.6 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

As velocidades de rotação para o caso de utilização de duas bombas serão:

$$\text{a) dos motores hidráulicos: } n_{mh} = \frac{199500 + 199500}{2 \cdot 106,7} = 1870 \text{ rpm} \quad (3.15)$$

$$\text{b) dos redutores ED 2155: } n_{red1} = \frac{1870}{23,4} = 80 \text{ rpm} \quad (3.16)$$

$$\text{c) do redutor 2 e da hélice: } n_{red2} = n_i = \frac{80}{3,588} = 22 \text{ rpm} \quad (3.17)$$

3.4.3 GUINCHO PRINCIPAL

Adotou-se:

- bomba de vazão variável REXROTH A11V0 95 (Bomba 2);
- dois motores hidráulico marca EATON série 10000 com deslocamento volumétrico de $665 \text{ cm}^3/\text{rotação}$ (EATON, 1994);
- caixa redutora com dois pinhões de dentes helicoidais com 7 dentes e uma coroa com 48 dentes.
- Tambor com diâmetro externo do tubo igual a 508 mm;
- Cabo de aço de 22 mm.

3.4.3.1 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO MOTOR HIDRÁULICO

$$n_{mh} = \frac{Q_{b2}}{q_{mh} \cdot dv_{mh}} \quad (3.18)$$

onde:

n_{mh} = velocidade de rotação do motor hidráulico (rpm)

Q_{b2} = vazão da bomba 2 (cm^3/min)

q_{mh} = quantidade de motores hidráulicos

dv_{mh} = deslocamento volumétrico do motor ($cm^3/volta$)

$$n_{mh} = \frac{199500}{2 \cdot 665} \cong 150 \text{ rpm} \quad (3.18a)$$

O valor obtido através da equação (3.18) é aproximado e pode ser chamado de valor nominal, já que a velocidade real dependerá, também, da pressão de trabalho e da vazão real no motor hidráulico. Na tabela de desempenho do motor EATON série 10000, com deslocamento volumétrico nominal de $665 \text{ cm}^3/\text{rot.}$ (EATON, 1994) pode-se constatar que, para a vazão de 91 l/min e pressão de 205 bar , a rotação do motor será igual a 122 rpm . Considerando a vazão máxima da bomba 2 igual a $199,5 \text{ l/min}$ e o guincho operando com dois motores hidráulicos, pode-se obter a rotação mais próxima da realidade, através da equação (3.20).

$$n_{mh} = \frac{199,5}{91} \cdot 122 \cong 134 \text{ rpm} \quad (3.20)$$

3.4.3.2 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO TAMBOR

$$n_{tg} = \frac{n_{mh}}{i_{cr}} \quad (3.21)$$

onde:

n_{tg} = velocidade de rotação do tambor do guincho (rpm)

n_{mh} = velocidade de rotação do motor hidráulico (rpm)

i_{cr} = relação de transmissão do redutor do guincho

$$n_{tg} = \frac{134}{6,8571} = 19,54 \cong 19 \text{ rpm} \quad (3.22)$$

3.4.3.3 VELOCIDADE DO CABO

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_{tg} \cdot n_{tg}}{1000} \quad (3.23)$$

onde:

v_c = velocidade do cabo (m/min)

D = diâmetro do tambor do guincho mais o diâmetro do cabo (mm)

n_{tg} = velocidade de rotação do tambor do guincho (rpm)

$$v_c = \frac{\pi \cdot (508 + 22)}{1000} \cdot 19 \cong 32 \text{ m/min} \quad (3.24)$$

3.4.3.4 VELOCIDADE MÁXIMA DE EXTRAÇÃO DA HÉLICE

Como será utilizado um sistema de moitão que, teoricamente, multiplicará a força de extração por quatro e reduzirá a velocidade de extração na mesma proporção, pode-se escrever a seguinte equação para a velocidade de extração da hélice.

$$v_{ext.} = \frac{v_c}{4} = \frac{32}{4} = 8 \text{ m/min} \quad (3.25)$$

Como a bomba que atenderá o guincho terá vazão variável, a velocidade poderá ser regulada de sorte a haver compatibilidade da velocidade de extração com a vazão de concreto fornecida pela bomba de concreto.

3.4.3.5 FORÇA DE EXTRAÇÃO DA HÉLICE

O motor escolhido disponibiliza 2060 Nm a 205 bar. Como o torque no eixo de saída do guincho é igual ao produto da força no cabo pelo raio do tambor, tem-se:

$$F_{cg} = \frac{T_g}{R} \quad (3.26)$$

onde:

F_{cg} = força no cabo

T_g = torque do guincho

R = raio considerado para o tambor

O torque do guincho pode ser obtido pela expressão:

$$T_g = T_{mh} \cdot q_{mh} \cdot i_{cr} = 2060 \cdot 2.6,87 = 28250 \text{ Nm} \quad (3.27)$$

A força no cabo será:

$$F_{cg} = \frac{28250}{0,265} \cong 106606N \quad (3.26a)$$

Considerando o sistema de moitão com 4 cabos, a força de extração da hélice será:

$$F_{ext} = 106600 \cdot 4 \cong 426427N$$

$$F_{ext} \cong 426 \text{ kN}$$

3.4.4 GUINCHO AUXILIAR

Adotando-se:

- bomba de vazão fixa, Parker, modelo P31 com engrenagens de 25,4 mm as vazões nominais serão de : 42 l/min a 1500 rpm, 53 l/min a 1800 rpm e 62 l/min a 2100 rpm ;
- um motor hidráulico marca EATON série 6000 com deslocamento volumétrico de 490 cm³/rotação (EATON, 1994);
- uma caixa redutora com dois pinhões de dentes helicoidais de 7 dentes e uma coroa com 48 dentes;
- Tambor com diâmetro externo do tubo igual a 273 mm;
- Cabo de aço de 16 mm.

3.4.4.1 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO MOTOR HIDRÁULICO

Reescrevendo a equação (3.18) para a bomba 3 tem-se:

$$n_{mh} = \frac{Q_{b3}}{q_{mh} \cdot dv_{mh}}$$

$$n_{mh} = \frac{42000}{1 \cdot 490} = 85,7 \cong 85 \text{ rpm}$$

3.4.4.2 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO TAMBOR

Utilizando a equação (3.21) tem-se:

$$n_{tg} = \frac{85}{6,8571} = 12 \text{ rpm}$$

3.4.4.3 VELOCIDADE MÁXIMA DO CABO

Aplicando-se a equação (3.23) tem-se:

$$v_c = \frac{\pi \cdot (273 + 16)}{1000} \cdot 12 \cong 11 \text{ m/min}$$

3.4.4.4 FORÇA NO CABO

O motor escolhido disponibiliza 1445 Nm a 205 bar. Utilizando as equações (3.26) e (3.27) tem-se:

$$T_g = 1445 \cdot 1 \cdot 6,857 = 9908 \text{ Nm}$$
$$F_{cg} = \frac{9908}{0,1445} = 68567 \text{ N} = 68,5 \text{ kN}$$

Tabela 3.1 – Perfuratriz Multifuncional.

DESCRIÇÃO	UNID.	TIPO DE ESTACA				
		Hélice Contínua	Hélice Segmentada	<i>Hollow-Auger</i>	Escavada	Raiz
Motor		CUMMINS Pu-285-1800-03				
Potência	kW	164	164	164	164	164
	hp	220	220	220	220	220
Regime de rotação	rpm	2100	2100	2100	2100	2100
Pressão máxima de trabalho	MPa	30	30	30	30	30
Torque máximo na mesa rotativa	kNm	85	85	85	85	12
Força no cabo do guincho principal	kN	100	100	100	100	****
Força máxima de extração do trado	kN	400	400	400	400	200
Força no cabo do guincho auxiliar	kN	45	45	45	45	45
Velocidades de rotação da hélice	rpm	11 a 22	11 a 22	11 a 22	11 a 22	10 a 150
Diâmetro máximo de perfuração	mm	600	600	500	700	400
Profundidade máxima de perfuração sem haste extensora	m	13	13	13	13	40
Utilização de haste extensora (prolonga)		SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO
Profundidade máxima de perfuração com haste	m	18	22	22	22	***

Tabela 3.1 – Continuação

DESCRIÇÃO	UNID.	TIPO DE ESTACA				
		Hélice Contínua	Hélice Segmentada	<i>Hollow-Auger</i>	Escavada	Raiz
Vazão da segunda bomba principal	l/min	168	168	168	168	168
Vazão das bombas auxiliares	l/min	50	50	50	50	50
Capacidade do reservatório de óleo hidráulico	l	1600	1600	1600	1600	1600
Capacidade do reservatório de combustível	l	400	400	400	400	400
Sistema de monitoração eletrônica da execução da estaca		TOTAL	TOTAL	TOTAL	PARCIAL	NÃO
Sistema de apoio no solo		PLACAS	PLACAS	PLACAS	PLACAS	PLACAS
Sistema de tração		TRANSLAÇÃO	TRANSLAÇÃO	TRANSLAÇÃO	TRANSLAÇÃO	TRANSLAÇÃO
Largura na posição de trabalho	mm	5980	5980	5980	5980	5980
Comprimento na posição de trabalho	mm	9660	9660	9660	9660	9720
Altura na posição de trabalho	mm	23192	23192		23192	13030
Largura na posição de transporte	mm	3000	3000	3000	3000	3000
Comprimento na posição de transporte	mm	10425	10425	10425	10425	
Altura na posição de transporte	mm	3340	3005	3100	****	****
Nível de ruído	db	****	****	****	****	****
Limpador de trado		NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Peso máximo em operação	kN	50445	50445	48308	50445	43108

4 DESENVOLVIMENTO DE UM ENSAIO DE CAMPO EXECUTADO POR PERFURATRIZ MONITORADA ELETRONICAMENTE.

4.1 INTRODUÇÃO

Os processos executivos das estacas, hélice contínua e hélice de deslocamento tornaram-se rotinas relativamente fáceis nas obras de fundações. Embora existam vantagens nítidas da estaca hélice contínua em relação, por exemplo, à estaca cravada, há uma vantagem também notável da estaca cravada em relação à estaca hélice contínua no que se refere à previsão do controle do desempenho do elemento isolado de fundação. Durante o processo de cravação de uma estaca é fácil controlar a *nega* e o *repique* quando a estaca já foi cravada um determinado comprimento e sua ponta encontra-se numa posição de interesse, sendo que os valores obtidos estão ligados com a capacidade de carga do elemento isolado de fundação. No caso da estaca hélice contínua a previsão de seu desempenho é feita, na maioria dos casos, com base apenas nos resultados dos ensaios de *SPT* ou *SPT-T*.

Este trabalho apresenta um novo ensaio de campo que poderá resultar numa forma inovadora de se prever o desempenho das estacas que utilizam ferramentas de escavação ou de deslocamento do solo, por rotação e força axial descendente, em seu processo executivo. Para a designação do ensaio optou-se pela sigla *FDT* que corresponde às iniciais de *Full Displacement Test*. Esse nome foi escolhido por lembrar a designação conhecida internacionalmente como *Full Displacement Pile* dada às estacas executadas por rotação de uma hélice especial de forma que não ocorra o transporte do solo à superfície do terreno.

O ensaio denominado *FDT* utiliza um instrumento padronizado que é montado na perfuratriz em conjunto com uma composição de hastes. O instrumento é inserido no solo por rotação e força axial. Utiliza os parâmetros fornecidos pelo sistema de monitoramento eletrônico existente no equipamento de execução de estaca hélice contínua e/ou hélice segmentada e/ou hélice de deslocamento, para a obtenção da potência desenvolvida no processo de perfuração que, subtraindo-se as perdas no sistema, é igualada à potência necessária para vencer as resistências oferecidas pelo solo para que ocorra o avanço vertical do instrumento. Padronizando-se as velocidades de avanço e de rotação do instrumento, o assunto passa a ser tratado em termos de conservação de energia, que; conforme mencionado por SILVA & CAMAPUM de CARVALHO, 2010, é especialmente valioso por se tratar de

um sistema com muitas variáveis no qual o entendimento detalhado do sistema de forças é um problema de difícil solução. As velocidades de avanço e de rotação foram padronizadas, respectivamente, em 20 m/h e 15 rpm. Dada a dificuldade de se manter essas velocidades constantes e pelo fato de se ter observado que determinadas variações nessas velocidades não causavam diferenças significativas nos resultados, adotou-se (20 ± 5) m/h para a velocidade de avanço e (15 ± 5) m/h para a velocidade de rotação.

Na presente tese, o tratamento matemático dado à questão, embora utilize algumas simplificações como será detalhado mais adiante, respeita o princípio de HAMILTON o qual parte do conceito da energia conservativa, ou seja, a energia não pode ser criada ou destruída, mas apenas transformada. O APÊNDICE M apresenta esquemas do instrumento de ensaio *FDT*, com os principais esforços atuantes.

AOKI (1997) definiu o conceito de energia complementar a partir da análise da curva carga – recalque, obtida em uma prova de carga estática, com base no princípio de Hamilton. Também com base no princípio de HAMILTON, ODEBRECHT (2003) demonstrou que após o golpe do martelo no ensaio *SPT*, no momento em que todas as energias cinéticas e elásticas já foram transformadas, a variação da energia potencial do sistema martelo-haste é igual à variação do trabalho efetuado por forças não conservativas, ou seja, o trabalho efetivamente realizado pode ser calculado através da penetração do amostrador no solo, o que leva à possibilidade de se obter a força dinâmica que atua no momento da cravação do amostrador.

A expressão (2.42) proposta por Van IMPE (1994) para obter a energia necessária à escavação de uma estaca Atlas, dando a ideia de que a energia de instalação pode ser um dos parâmetros utilizados para controlar a capacidade de carga dessa estaca, foi obtida respeitando-se a lei de conservação de energia.

4.2 CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO E DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Após o desenvolvimento de dois instrumentos adotou-se como instrumento padrão uma hélice de deslocamento com diâmetro de 150 mm e comprimento útil (de ensaio) de 1000 mm.

A Figura 4.1 apresenta uma vista do instrumento padrão com suas dimensões principais. A Figura 4.2 mostra três seções transversais do instrumento. A Figura 4.3 apresenta um desenho da lâmina cortante que constitui-se na ponta do instrumento e a Figura 4.4 mostra uma imagem do instrumento padrão em uso.

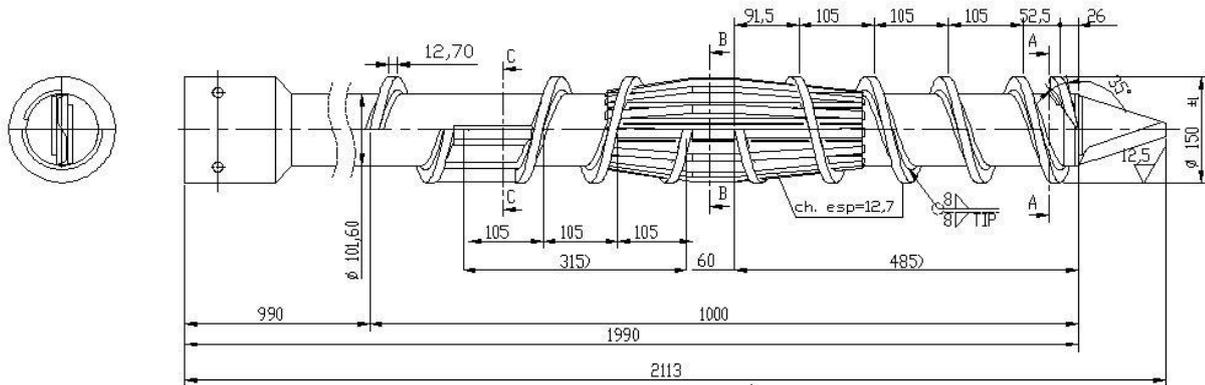


Figura 4.1 Vista geral do instrumento padrão.

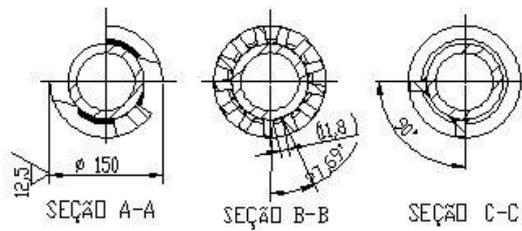


Figura 4.2 Seções transversais do instrumento.

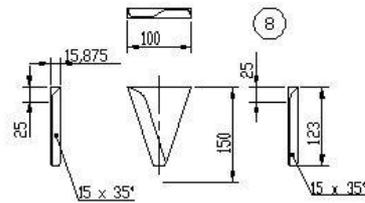


Figura 4.3 Lâmina cortante (ponta).



Figura 4.4 Imagem do instrumento padrão em uso.

A padronização de um trado de deslocamento como instrumento se deu pelos seguintes motivos:

- Durante o ensaio, a partir de um metro de profundidade, a área lateral de contato com o solo permanece constante;
- O fato dos espaços vazios do instrumento serem totalmente preenchidos pelo solo que é desestruturado pela sua ponta, facilita a determinação das resistências, ao longo da profundidade, por atrito lateral do instrumento mais solo com o solo circundante ao instrumento;
- A hélice de deslocamento, por ser curta, oferece facilidade de controle da sua geometria, podendo realmente ser considerada como um instrumento;
- Apresenta menor custo, quando comparado com um trado contínuo.

A ideia inicial do ensaio era obter valores de resistências por atrito lateral e de ponta em um instrumento padronizado instalado em uma perfuratriz equipada com sistema de monitoramento eletrônico de execução da estaca. Os estudos foram feitos com base no princípio universal da conservação da energia. A partir de um modelo teórico foram obtidas duas equações, sendo uma para o cálculo da resistência por atrito lateral (f_s) e a outra para a obtenção da resistência de ponta (q_c) no ensaio. Como ocorre no ensaio de cone, esperava-se que os valores de resistências obtidos pudessem ser correlacionados com as resistências por atrito lateral e de ponta de diversos tipos de estaca, principalmente com as estacas dos tipos, hélice contínua, hélice segmentada, escavada e hélice de deslocamento.

Inicialmente foi desenvolvido um instrumento que apresentava em sua extremidade inferior duas ponteiros cortantes nas laterais sendo que a sua região central foi projetada com uma chapa lisa (sem ponta) para que resistências de ponta significativas pudessem ser mobilizadas durante a penetração do instrumento no solo (Figura 4.5).



Figura 4.5 Imagem do primeiro instrumento desenvolvido.

O primeiro instrumento foi construído com diâmetro de 250 mm e comprimento útil (comprimento de ensaio) de 1,50 m.

Em seguida são descritos as etapas do ensaio que tinha o objetivo de se obter as resistências por atrito lateral e de ponta.

- a. O computador da perfuratriz é configurado para o ensaio mas permanece na posição de “pausa”;
- b. O instrumento é posicionado na vertical;
- c. A ponta do instrumento (face inferior da chapa plana da ponta) é posicionada na superfície do solo que corresponde à cota da boca do furo de ensaio;
- d. O computador da perfuratriz é ajustado para iniciar o monitoramento da execução do furo;
- e. A mesa rotativa é acionada e a composição é liberada para que ocorra a penetração do instrumento no solo. Nessa etapa estão sendo monitoradas as pressões nos motores hidráulicos da mesa rotativa, a rotação da hélice e a velocidade de perfuração;
- f. O avanço vertical é paralisado com um metro de profundidade para que possa ser registrada a queda de pressão nos motores hidráulicos da mesa rotativa, queda esta que será fundamental para a obtenção da resistência de ponta nessa posição de interesse;
- g. Após aproximadamente cinco segundos o avanço é retomado e o ensaio prossegue até dois metros de profundidade em cuja posição o avanço é novamente paralisado;
- h. Os procedimentos de continuação e parada do avanço vertical do instrumento são repetidos até a cota final do ensaio ou até a posição na qual não se consiga mais avançar o instrumento (impenetrável).

Os primeiros ensaios realizados não tiveram sucesso devido às limitações de torque, de força de penetração e de força de extração da perfuratriz disponível. O segundo instrumento foi construído com diâmetro de 250 mm e comprimento útil de 1,00 m. Os ensaios realizados com esse instrumento não tiveram sucesso, também devido às limitações de torque e de forças de penetração e de extração disponibilizados pela perfuratriz.

Finalmente foi desenvolvido um instrumento com diâmetro de 150 mm e comprimento de ensaio igual a 1000 mm, cuja ponta apresenta uma geometria que proporciona grande facilidade de penetração no solo e consequente desestruturação do mesmo. Com base nesse fato, a “pequena” resistência de ponta foi incorporada nos cálculos, e tudo foi considerado como atrito lateral entre o instrumento mais o solo envolvido no mesmo e o solo circundante ao furo.

4.3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

4.3.1 CONSIDERAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DE PONTA E POR ATRITO LATERAL

O modelo adotado para o desenvolvimento teórico considera, inicialmente, as parcelas de potência devidas a:

- Peso próprio da composição (trado + hastes + mesa rotativa);
- Força de empuxo axial para baixo (*pull-down*);
- Peso próprio do solo envolvido na hélice;
- Força de atrito entre os componentes do helicóide e o solo;
- Força de atrito lateral devida à translação da hélice;
- Força de atrito da mesa rotativa com os trilhos da torre da perfuratriz;
- Força devida à resistência de ponta do solo.

São adotadas as seguintes simplificações.

- As forças de atrito entre os componentes do helicóide e o solo, e o atrito lateral devido à rotação do trado, foram consideradas como uma única força atuando na interface do instrumento com o maciço de solo;
- O atrito lateral unitário por rotação do instrumento na interface *instrumento-macício de solo* foi considerado uniforme ao longo do comprimento do instrumento;
- O atrito lateral unitário por translação do instrumento na interface *instrumento-macício de solo* foi considerado uniforme ao longo do comprimento do instrumento.
- O atrito lateral unitário por rotação do instrumento, muito próximo da posição na qual a velocidade de translação é igual a zero foi considerado igual ao atrito lateral por rotação na posição na qual o movimento de translação é paralisado (velocidade de translação igual a zero).

Para o instrumento com movimentos de rotação em torno de seu eixo e de translação vertical; e para a sua ponta numa posição muito próxima de uma determinada posição “*i*”, adotada como a posição de parada do avanço vertical do instrumento, existirá atrito lateral entre o solo natural e o sistema formado pelo instrumento mais o solo envolvido no mesmo, que daqui em diante será denominado simplesmente “instrumento”.

O desenvolvimento teórico será feito considerando que a potência desenvolvida no topo do instrumento é igual à soma das potências devidas às forças reativas.

Para uma determinada posição “ i ” da ponta do instrumento, podem ser escritas diversas equações.

A potência disponibilizada pela mesa rotativa na entrada da mesma pode ser expressa por:

$$N_A(i) = p_A(i) \cdot Q_A(i) \quad (4.1)$$

em que:

$N_A(i)$ = potência disponibilizada na entrada da mesa rotativa;

$p_A(i)$ = pressão do sistema hidráulico na entrada dos motores hidráulicos da mesa rotativa;

$Q_A(i)$ = vazão de óleo na entrada dos motores hidráulicos da mesa rotativa.

A potência disponibilizada pela mesa rotativa na saída da mesma (topo das hastes de perfuração) pode ser expressa por:

$$N_A(i) = \eta_{mr} p_A(i) \cdot Q_A(i) \quad (4.2)$$

em que:

η_{mr} = eficiência da mesa rotativa.

O somatório das forças verticais secundárias que atuam no instrumento pode ser expresso por:

$$F_s(i) = F_{pp}(i) + F_{pull}(i) + F_{solo}(i) + F_{fluid}(i) \quad (4.3)$$

em que:

$F_s(i)$ = soma das forças verticais secundárias;

$F_{pp}(i)$ = peso próprio da mesa rotativa mais composição de hastes;

$F_{pull}(i)$ = força axial de empuxo axial (*pull-down*);

$F_{solo}(i)$ = peso próprio do solo envolvido na hélice;

$F_{fluid}(i)$ = peso próprio de eventual fluido estabilizante;

A potência disponibilizada pelas forças verticais secundárias no topo do instrumento pode ser expressa por:

$$N_s(i) = F_s(i) \cdot v(i) \quad (4.4)$$

em que:

$v(i)$ = velocidade de avanço vertical do instrumento.

A potência devida às forças reativas pode se expressa pela soma das diversas expressões apresentadas abaixo.

Potência devida ao atrito por rotação:

$$N_{LR}(i) = F_{LR}(i) \cdot \pi \cdot d_i \cdot n_i(i) \quad (4.5)$$

em que:

$F_{LR}(i)$ = força devida ao atrito por rotação;

d_i = diâmetro externo do instrumento;

$n_i(i)$ = velocidade de rotação do instrumento.

A potência devida ao atrito por translação vertical será:

$$N_{LT}(i) = F_{LT}(i) \cdot v_i(i) \quad (4.6)$$

em que:

$F_{LT}(i)$ = força devida ao atrito por translação;

$v_i(i)$ = velocidade de avanço vertical do instrumento.

A potência devida ao atrito da mesa rotativa com os trilhos guias da torre pode ser expressa por:

$$N_{AMR}(i) = F_{AMR}(i) \cdot v_i(i) \quad (4.7)$$

em que:

$F_{AMR}(i)$ = força devida ao atrito da mesa rotativa com os trilhos da torre.

A potência devida à força de reação da ponta do instrumento pode ser expressa por:

$$N_P(i) = F_P(i) \cdot v_i(i) \quad (4.8)$$

A potência devida aos esforços de reação pode ser expressa por:

$$N_R(i) = N_{LR}(i) + N_{LT}(i) + N_{AMR}(i) + N_P(i) \quad (4.9)$$

Com base no princípio universal da conservação de energia, desprezando-se as parcelas de energia dissipadas por calor e som, pode-se escrever:

$$N_A(i) + N_S(i) = N_R(i) \quad (4.9)$$

$$\eta_{mr} P_A(i) \cdot Q_A(i) + F_S(i) \cdot v_i(i) = F_{LR}(i) \cdot \pi \cdot d_i \cdot n_i(i) + F_{LT}(i) \cdot v_i(i) + F_{AMR}(i) \cdot v_i(i) + F_P(i) \cdot v_i(i) \quad (4.10)$$

Se apenas o avanço vertical for paralisado, haverá uma queda na pressão hidráulica com consequente diminuição da potência necessária para que o sistema continue operando. Com relação à vazão é possível mantê-la, mantendo-se a rotação do instrumento constante. Para essa condição pode-se escrever:

$$\eta_{mr} p_B(i) \cdot Q_A(i) = F_{LR}(i) \cdot \pi \cdot d \cdot n_i(i) \quad (4.11)$$

em que:

$p_B(i)$ = pressão no sistema hidráulico para o instrumento com velocidade de rotação mantida e velocidade de translação (avanço) igual a zero.

Para essa condição o atrito lateral por rotação pode ser obtido pela relação entre a força lateral por rotação e a área lateral. Assim, a resistência de atrito lateral por rotação pode ser expressa por:

$$f_S(i) = \frac{\eta_{mr} p_B(i) \cdot Q_A(i)}{\pi \cdot d \cdot n_i(i)} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d \cdot l_i} \quad (4.12a)$$

$$f_S(i) = \frac{\eta_{mr} p_B(i) \cdot Q_A(i)}{\pi^2 \cdot d^2 \cdot l_i \cdot n_i(i)} \quad (4.12b)$$

em que:

l_i = comprimento de ensaio do instrumento.

Das as equações (4.10) e (4.11) obtém-se:

$$\eta_{mr} p_A(i) \cdot Q_A(i) + F_S(i) \cdot v_i(i) - \eta_{mr} p_B(i) \cdot Q_A(i) = F_{LT}(i) \cdot v_i(i) + F_{AMR}(i) \cdot v_i(i) + F_P(i) \cdot v_i(i) \quad (4.13)$$

A força resultante das forças de atrito da mesa rotativa com os trilhos da torre pode ser calculada pela expressão abaixo.

$$F_{AMR}(i) = \frac{2\mu_{mt} M_i(i)}{l_c} \quad (4.14)$$

em que:

μ_{mt} = coeficiente de atrito entre o material de deslizamento da mesa rotativa e o material do perfil guia da torre da perfuratriz;

$M_i(i)$ = torque no eixo de saída da mesa rotativa, para a ponta do instrumento na posição “i”.

l_c = distância entre os centros de aplicação das cargas normais geradas pelo torque na mesa rotativa.

Assim pode-se escrever:

$$\eta_{mr} \cdot Q_A(i) [p_A(i) - p_B(i)] = v_i(i) \left[F_{LT}(i) + 2\mu_{mt} \frac{M_i(i)}{l_c} + F_P(i) - F_S(i) \right]$$

$$\left[\frac{1}{v_i(i)} \right] \eta_{mr} \cdot Q_A(i) [p_A(i) - p_B(i)] = \left[F_{LT}(i) + 2\mu_{mt} \frac{M_i(i)}{l_c} + F_P(i) - F_S(i) \right]$$

$$\left[\frac{1}{v_i(i)} \right] \eta_{mr} \cdot Q_A(i) \Delta p(i) - F_{LT}(i) - 2\mu_{mt} \frac{M_i(i)}{l_c} + F_S(i) = F_P(i)$$

Onde $\Delta p(i)$ corresponde à diferença de pressão na entrada do motor hidráulico da mesa rotativa entre as condições de movimento de translação e rotação e apenas de movimento de rotação do instrumento.

Definindo a resistência de ponta como sendo:

$$q_c(i) = \frac{F_{P(i)}}{A_p(i)} \quad (4.15)$$

em que:

$A_p(i)$ = área da seção transversal da ponta do instrumento.

tem-se:

$$q_c(i) = \left[\frac{\eta_{mr} \cdot \Delta p(i) \cdot Q_A(i)}{v_i(i)} - F_{LT}(i) - 2 \cdot \mu_{mt} \frac{T_{mr}(i)}{l_c} + F_S(i) \right] \frac{4}{\pi \cdot d^2} \quad (4.16)$$

Definindo o fator “ K_{AT} ” como sendo:

$$K_{AT} = \frac{F_{LT}(i)}{F_{LR}(i)} \quad (4.17)$$

tem-se:

$$qc(i) = \left[\frac{\eta_{mr} \cdot \Delta p(i) \cdot Q_A(i)}{v_i(i)} - K_{AT} \cdot F_{LR}(i) - 2 \cdot \mu_{mt} \frac{T_{mr}(i)}{l_c} + F_S(i) \right] \frac{4}{\pi \cdot d^2} \quad (4.18)$$

Os pesquisadores da Universidade de Massachusetts, LUTENEGGER e KELLEY (1998 e 2001), adotando a ideia brasileira de incrementar o ensaio de torque ao *SPT*, realizaram provas de carga à compressão e à tração (arrancamento) no amostrador *SPT*. Esses

autores concluíram que as resistências por atrito lateral, obtidas através dos ensaios de torque e de tração, apresentaram-se razoavelmente concordantes.

Considerado o fator $K_{AT} = I$, com base nos resultados dos trabalhos de LUTENEGGER e KELLEY (1998 e 2001), pode-se escrever:

$$qc(i) = \left[\frac{\eta_{mr} \cdot \Delta p(i) \cdot Q_A(i)}{v_i(i)} - F_{LR}(i) - 2 \cdot \mu_{mt} \frac{T_{mr}(i)}{l_c} + F_S(i) \right] \frac{4}{\pi \cdot d^2} \quad (4.19)$$

Ocorre que nas pesquisas dos autores acima citados os movimentos de rotação e de translação do instrumento não ocorrem simultaneamente.

No ensaio proposto nesta tese o instrumento gira e se desloca na vertical para baixo de forma simultânea, não sendo possível concluir que as resistências de atrito por rotação e por translação são aproximadamente iguais. Com o objetivo de se avaliar a relação entre essas resistências, foi desenvolvido um instrumento que não gera forças axiais durante o ensaio devido à aplicação do torque. A Figura 4.6 mostra uma imagem do instrumento desenvolvido.



Figura 4.6 Vista do instrumento para determinação de atrito lateral.

A Figura 4.7 mostra uma imagem do instrumento montado na composição de perfuração. Para a leitura dos dados necessários à obtenção dos valores de resistência de atrito lateral por rotação e translação foi utilizado um cilindro de empuxo axial (Figura 4.8) instrumentado com um manômetro, além do computador da perfuratriz (Figura 4.9).



Figura 4.7 Vista do instrumento montado.

Algumas considerações sobre o ensaio bem como a metodologia utilizada estão descritos abaixo.

1. A face inferior do tubo foi considerada como a ponta do instrumento.
2. Com o equipamento na posição desejada, a haste de perfuração foi colocada na vertical com auxílio do sistema de monitoramento eletrônico da perfuratriz.



Figura 4.8 Vista da montagem do cilindro de empuxo axial.



Figura 4.9 Vista do computador da perfuratriz.

3. A ponta do instrumento foi colocada na cota 0,00 m (superfície do terreno).
4. O instrumento foi inserido no solo por movimentos simultâneos de rotação e translação, até a profundidade de 1,00 m (cota 1,00 m), em cuja posição mediu-se a pressão no manômetro do cilindro de empuxo axial (*pull-down*). Essa leitura permitiu a obtenção da força necessária para se vencer a soma das resistências de ponta e de atrito lateral por translação.
5. Os movimentos de rotação e de translação foram paralisados e o instrumento foi elevado até a cota 0,50 m.
6. Os movimentos, de rotação e de translação, foram retomados e o instrumento foi levado até a cota muito próxima de 1,00 m sendo que nessa posição foram feitas as seguintes leituras.
 - a) No computador (sistema de monitoramento eletrônico) da perfuratriz:

Pressão hidráulica;

Velocidade de rotação do instrumento.

b) No cilindro de empuxo axial (*pull-down*):

Pressão hidráulica.

Para essa condição a resistência de ponta era nula, já que a ponta do instrumento estava logo acima da cota 1,00 m.

7. Avançou-se o instrumento até a profundidade de 1,50 m (cota 1,50 m) em cuja posição mediu-se a pressão no manômetro do cilindro de empuxo axial (*pull-down*). Essa leitura permitiu a obtenção da força necessária para se vencer a soma das resistências de ponta e de atrito lateral por translação nessa posição.
8. Os movimentos, de rotação e translação, foram paralisados e o instrumento foi elevado até a cota 1,00 m.
9. Os movimentos de rotação e de translação foram retomados e promoveu-se o avanço do instrumento até a cota 1,50 m sendo que nessa posição foram feitas as leituras conforme os passos 6.a e 6.b.

Os procedimentos acima foram repetidos até se atingir a cota 7,0 m onde o ensaio foi encerrado.

A metodologia acima foi adotada com o objetivo de se eliminar a influência das resistências de ponta do solo nas leituras efetuadas nas posições de interesse.

A ação do peso próprio da composição de perfuração (mesa rotativa + haste de perfuração + instrumento) foi neutralizada através da utilização de uma válvula conhecida na engenharia hidráulica como válvula de contrabalanço. Essa válvula consegue promover uma contrapressão que impede a descida da carga (“segura” a carga), sendo que para o presente caso a regulagem da válvula foi feita de sorte que a contrapressão gerou uma força resistiva praticamente igual ao peso da composição. Sem esse recurso não seria possível a realização do ensaio.

Para cada posição de ensaio, a resistência de atrito lateral por rotação foi obtida através da expressão abaixo.

$$f_{s,R} = \frac{pQ_A\eta_{mr}}{\pi^2 d_i^2 n_i l_i} \quad (4.20)$$

em que:

p = pressão hidráulica na entrada do motor hidráulico da mesa rotativa;

Q = soma das vazões de óleo hidráulico nos motores da mesa rotativa;

η_{mr} = rendimento da mesa rotativa;

d_i = diâmetro do instrumento de ensaio;
 n_i = velocidade de rotação do instrumento;
 l_i = comprimento efetivo de ensaio.

A resistência de atrito lateral por translação, para cada posição de ensaio, foi obtida através da expressão abaixo.

$$f_{s,T} = \frac{F_{LT}}{\pi d_i l_i} \quad (4.21)$$

em que:

F_{LT} = carga de ruptura do atrito lateral por translação;
 d_i = diâmetro do instrumento de ensaio;
 l_i = comprimento efetivo de ensaio.

As resistências de ponta, embora não sendo o foco desse ensaio, foram obtidas através da seguinte equação.

$$q_c = \frac{F_p}{A_p} \quad (4.22)$$

em que:

F_p = carga de ruptura da ponta;
 A_p = área da ponta do instrumento.

As cargas de ponta foram obtidas através da seguinte expressão.

$$F_p = (p_{fsTqc} - p_{fsT}) \cdot (A_c - A_h) \quad (4.23)$$

em que:

p_{fsTqc} = pressão hidráulica no cilindro de empuxo axial (*pull-down*) devida, ao atrito lateral de translação e resistência de ponta;
 p_{fsT} = pressão hidráulica no cilindro de empuxo axial (*pull-down*) devida, ao atrito lateral de translação;
 A_c = área da seção transversal da camisa do cilindro de *pull-down*;
 A_h = área da seção transversal da haste do cilindro de *pull-down*.

A aplicação da parcela (A_c-A_h) da equação (4.23) vem do fato do cilindro de *pull-down* ser montado com a haste para cima e a pressurização do óleo hidráulico ocorrer no espaço entre a camisa e a haste.

A Tabela 4.1 apresenta dados gerais necessários à obtenção dos resultados. A Tabela 4.2 apresenta valores medidos durante o ensaio e a Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos aplicando-se as expressões de (1) a (4).

Tabela 4.1 - Dados gerais.

Descrição	Valor
Diâmetro do instrumento (mm)	150
Comprimento efetivo de ensaio (mm)	600
Pressão nos motores hidráulicos da mesa rotativa para o sistema funcionando em vazio (bar)	9
Velocidade média avanço do instrumento (m/h)	20
Velocidade média de rotação do instrumento (rpm)	14
Diâmetro interno da camisa do cilindro de <i>pull-down</i> (mm)	82,56
Diâmetro da haste do cilindro de <i>pull-down</i> (mm)	50,80

Tabela 4.2 - Resultados das pressões medidas.

<i>Profundidade</i> (m)	P_{fsRqc} (MPa)	P_{fsR} (MPa)	P_{fsTqc} (MPa)	P_{fsT} (MPa)	P_{qc} (MPa)
1,0	1,0	0,5	6,0	3,0	3,0
1,5	1,5	0,5	6,0	4,0	2,0
2,0	1,5	0,7	7,5	4,0	3,5
2,5	1,8	0,7	6,0	4,0	2,0
3,0	1,4	0,6	6,5	4,0	2,5
3,5	1,5	1,0	6,5	3,5	3,0
4,0	1,4	0,8	6,5	3,5	3,0
4,5	1,6	0,5	7,5	3,5	4,0
5,0	1,7	0,5	10,5	5,0	5,5
5,5	1,8	0,5	10,0	5,0	5,0
6,0	1,9	0,4	11,5	4,5	7,0
6,5	1,9	1,0	10,5	5,0	5,5
7,0	2,1	0,5	12,0	5,0	7,0
7,5	2,7	0,5	13,5	5,5	8,0

P_{fsRqc} = pressão na mesa rotativa devida, ao atrito lateral por rotação e à resistência de ponta.

P_{fsR} = pressão na mesa rotativa devida ao atrito lateral por rotação.

P_{fsT} = pressão no cilindro de empuxo axial (*pull-down*) devida à resistência por atrito lateral.

P_{qc} = pressão no cilindro de empuxo axial (*pull-down*) devida à resistência de ponta.

A análise dos resultados obtidos permitiram observar que segue os valores de $f_{s,T}/qc$ resultaram elevados, provavelmente, devido à característica do ensaio que é desestruturar o solo na ponta do instrumento, além de desloca-lo para baixo e lateralmente.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos a partir das medidas realizadas.

Profundidade (m)	F_{LT} (kN)	F_P (kN)	$f_{s,T}$ (kPa)	$f_{s,R}$ (kPa)	q_c (MPa)	$f_{s,T}/q_c$ (%)	$f_{s,T}/f_{s,R}$
1,0	10,0	10,0	35	32	0,565	6,250	1,1
1,5	13,3	6,7	47	32	0,376	12,500	1,5
2,0	13,3	11,6	47	45	0,659	7,143	1,0
2,5	13,3	6,7	47	45	0,376	12,500	1,0
3,0	13,3	8,3	47	39	0,470	10,000	1,2
3,5	11,6	10,0	41	65	0,565	7,292	0,6
4,0	11,6	10,0	41	52	0,565	7,292	0,8
4,5	11,6	13,3	41	32	0,753	5,469	1,3
5,0	16,6	18,3	59	32	1,035	5,682	1,8
5,5	16,6	16,6	59	32	0,941	6,250	1,8
6,0	15,0	23,3	53	26	1,317	4,018	2,0
6,5	16,6	18,3	59	65	1,035	5,682	0,9
7,0	16,6	23,3	59	32	1,317	4,464	1,8
7,5	18,3	26,6	65	32	1,505	4,297	2,0

Essa relação não pode ser comparada com a razão de atrito f_s/q_c tão conhecida no ensaio *CPT*.

A relação entre as resistências de atrito lateral, por rotação e por translação, variou de 0,63 a 2,04 com valor médio de 1,35, desvio padrão de 0,47 e coeficiente de variação de 34,7%.

Embora tenham sido obtidas as expressões teóricas para a obtenção das resistências, de ponta e por atrito lateral, conforme descrito em 4.2 a ideia de se obter as resistências por atrito e de ponta teve que ser abandonada, pelo menos neste trabalho.

4.3.2 CONSIDERAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATRITO LATERAL UNITÁRIO POR ROTAÇÃO

Devido às limitações encontradas para, na prática, obter valores de resistências unitárias por atrito lateral e de ponta, optou-se por desenvolver o ensaio *FDT* com o objetivo de se obter a parcela de atrito lateral unitário por rotação do instrumento.

Para dar continuidade ao trabalho, nessa linha de análise, repete-se a seguir a equação 4.10.

$$\eta_{mr} p_A(i) \cdot Q_A(i) + F_S(i) \cdot v_i(i) = F_{LR}(i) \cdot \pi \cdot d \cdot n_i(i) + F_{LT}(i) \cdot v_i(i) + F_{AMR}(i) \cdot v_i(i) + F_P(i) \cdot v_i(i)$$

Se o ensaio for padronizado com velocidade de translação vertical em torno de 20 m/h que corresponde a 0,55 cm/s, ou seja, 28% da velocidade de penetração do cone no ensaio

CPT, pode-se afirmar que o ensaio será praticamente estático em termos de penetração do instrumento no solo.

Através de ensaios realizados com velocidade de translação em torno de 20 m/h e velocidade de rotação em torno de 15 rpm, verificou-se que a parcela de energia devida ao avanço, representa em torno de 5% da parcela de energia devida à rotação, do instrumento. Considerando a condição exposta acima, que poderá ser verificada através do exemplo apresentado no APÊNDICE L desta tese, a equação 4.10 foi reescrita da forma abaixo.

$$\eta_{mr} p_A(i) \cdot Q_A(i) = F_{LR}(i) \cdot \pi \cdot d \cdot n_i(i)$$

E a força lateral resultante pôde ser expressa por:

$$F_{LR}(i) = \frac{\eta_{mr} \cdot p_A(i) \cdot Q_A(i)}{\pi \cdot d \cdot n_i(i)} \quad (4.24)$$

Sabendo que a área lateral do instrumento pode ser expressa por:

$$A_L = \pi \cdot d \cdot l_i \quad (4.25)$$

Dividindo-se os dois membros da equação 4.24 pela área lateral, obtém-se a resistência de atrito lateral por rotação, expressa pela equação:

$$f_s(i) = \frac{\eta_{mr} \cdot p_A(i) \cdot Q_A(i)}{\pi \cdot d \cdot l_i \cdot n_i(i)} \quad 4.26$$

em que:

$p_A(i)$ - Pressão indicada no sistema de monitoramento da perfuratriz para a posição “i” da ponta do instrumento;

$Q_A(i)$ - Vazão de óleo hidráulico nos motores hidráulicos da mesa rotativa para a posição “i” da ponta do instrumento;

d - Diâmetro do instrumento;

l_i - Comprimento de ensaio (útil) do instrumento;

$n_i(i)$ - Velocidade de rotação do instrumento para a posição “i” da ponta do mesmo;

η_{mr} - Eficiência da mesa rotativa.

Por outro lado, o desenvolvimento teórico inicial faz um equilíbrio de energia considerando que a energia devida aos esforços ativos é igual à energia devida aos esforços reativos.

Devido à combinação de movimentos, por rotação e translação, houve necessidade de se considerar esforços verticais e horizontais atuantes no instrumento.

É importante ressaltar que no estudo anterior foram utilizadas diversas fontes de energia, tais como, uma bomba hidráulica para acionamento dos motores hidráulicos da mesa rotativa, outra bomba hidráulica para acionamento do cilindro de empuxo axial (*pull-down*) além dos pesos próprios: da mesa rotativa, das hastes de perfuração, do instrumento e do solo envolvido no instrumento.

Cabe salientar também que o torque na mesa rotativa não gera apenas forças tangenciais responsáveis pela rotação do instrumento, mas também forças axiais devido à inclinação das lâminas do helicóide. Além disso, no sistema instrumento-solo, estão presentes diversas outras forças tais como, forças radiais no tubo central que geram resistência (atrito) à rotação do instrumento, forças de atrito devidas ao transporte do solo sobre a hélice e sob a hélice, entre outras. Tais esforços estão considerados na parcela de energia “ $p.Q$ ”, ou seja no produto da pressão pela vazão. Portanto, o estudo através do equilíbrio de energia, evita considerar todos os esforços envolvidos no sistema instrumento-solo, já que tal consideração seria praticamente impossível, sobretudo, devido à geometria bastante irregular do instrumento.

Com base no exposto acima, o vetor atrito lateral unitário por rotação será considerado perpendicular ao eixo longitudinal do instrumento e tangente à sua geratriz e será denominado atrito lateral unitário equivalente, sendo representado pelo símbolo “ f_{se} ”. O termo atrito equivalente deve-se ao fato de que os valores obtidos respeitarão o princípio universal de conservação de energia, mas não serão exatos em módulo.

Para a obtenção apenas da resistência unitária por atrito lateral não há necessidade de se utilizar as simbologias, “ Q_A ” e “ Q_B ” para as vazões e “ p_A ” e “ p_B ” para as pressões hidráulicas nos motores da mesa rotativa. Assim, daqui em diante, a vazão e a pressão de óleo nos motores da mesa rotativa serão representados, respectivamente, por “ Q ” e “ p ”.

A equação do atrito lateral unitário equivalente poderá ser expressa por:

$$f_{se}(i) = \frac{\eta_{mr} \cdot p(i) \cdot Q(i)}{\pi \cdot d \cdot L_i \cdot n_i(i)} \quad (4.27)$$

Por outro lado, quando o instrumento é colocado em funcionamento apenas com movimento de rotação, observa-se que o sistema de monitoramento da perfuratriz indica uma pressão diferente de zero. Isso ocorre porque a pressão é medida na entrada dos motores

hidráulicos e para o funcionamento sem carga (em vazio) há necessidade de se vencer as perdas de energia no circuito hidráulico e nas partes mecânicas da mesa rotativa. Assim, a equação do atrito lateral equivalente deve ser expresso em função da pressão corrigida, conforme escrita abaixo.

$$f_{se}(i) = \frac{\eta_{mr} \cdot P_{corr}(i) \cdot Q(i)}{\pi \cdot d \cdot l_i \cdot n_i(i)} \quad (4.28)$$

em que:

P_{corr} – pressão corrigida.

A pressão corrigida é obtida pela expressão:

$$P_{corr}(i) = P(i) - P_{perdas}(i) \quad (4.29)$$

em que:

P_{perdas} – pressão necessária para acionamento da mesa rotativa e composição de hastes, sem perfuração do solo.

A partir da equação (4.28), é possível concluir que o atrito lateral unitário equivalente pode ser expresso por:

$$f_{se}(i) = \frac{\eta_{mr} \cdot P_{corr}(i) \cdot i \cdot dv_{mh} \cdot q_{mh}}{\pi \cdot d \cdot l_i} \quad (4.30)$$

em que:

dv_{mh} – deslocamento volumétrico do motor hidráulico para motor com $dv_{mh} = \text{cte}$;

q_{mh} – quantidade de motores hidráulicos de mesmo deslocamento volumétrico;

O que ocorre é que, para motor hidráulico com deslocamento volumétrico constante, a razão entre a vazão (Q) e a velocidade de rotação (n_i) é constante e, portanto, o atrito lateral é dependente apenas das variáveis apresentadas na expressão (4.30). O autor da presente tese optou pelo uso da expressão (4.28) porque teve facilidade de medir valores de (Q) e (n_i), e obter a equação (4.44) que fornece valores de (Q) em função de (n_i). A dedução da equação (4.30) é apresentada no APÊNDICE K do volume 2 desta tese.

Por outro lado, a demanda de energia para a execução de um ensaio pode ser escrita pela expressão (4.31) demonstrada em 5.4.

$$W_{perf} = \frac{f_{sem} \cdot \pi^2 \cdot d_i^2 \cdot l_i \cdot L_e \cdot 60 \cdot n_i}{v_i} \quad (4.31)$$

em que:

W_{perf} = demanda de energia para a realização do ensaio (kJ);

f_{sem} = atrito lateral unitário médio (kPa);

d_i = diâmetro do instrumento (m);

l_i = comprimento útil do instrumento (m);

L_e = comprimento do ensaio (m);

n_i = velocidade de rotação (rpm);

v_i = velocidade de avanço do instrumento (m/h).

A análise das equações (4.30) e (4.31) permite concluir que para que seja possível correlacionar os resultados de atrito lateral unitário equivalente (f_{sem}), ou de demanda de energia (W_{perf}), com a capacidade de carga do elemento isolado de fundação, o controle do ensaio deverá ser muito mais rigoroso para o caso da opção pelo uso da demanda de energia, já que os resultados dependem da relação entre as velocidades de rotação e de avanço do instrumento. Um caso real sobre essa importante abordagem pode ser visto no item 5.4.

Com relação às questões de relatórios de execução dos ensaios, fazendo-se uma implementação no *software* existente no sistema de monitoramento eletrônico da perfuratriz, os valores, de " $f_{se(i)}$ " e de " W_e " poderão ser obtidos automaticamente. No presente trabalho foi utilizado o sistema *S.I.M.E.h.C.* da empresa COMPUGEO, previamente instalado na perfuratriz utilizada para a realização dos ensaios. Esse sistema foi desenvolvido pela empresa COMPUGEO para o monitoramento da execução de estacas hélice, contínua e segmentada. e permite a aquisição de dados com intervalos a partir de 0,01 m.

Com relação à eficiência da mesa rotativa apresentam-se a seguir os cálculos para a sua determinação.

NIEMANN (1971) indica que o rendimento, por estágio, de transmissões por engrenagens cilíndricas varia de 96% a 99%, dependendo da forma construtiva e do tamanho. Esse mesmo autor apresenta a seguinte equação para o cálculo da potência perdida de uma transmissão por engrenagens.

$$N_v = N_o + N_z + N_L \quad (4.32)$$

em que:

N_v = potência total perdida;

N_o = potência de funcionamento em vazio;

N_z = potência perdida nos dentes;

N_L = potência perdida nos mancais para funcionamento com carga.

Onde a potência perdida devido ao funcionamento em vazio pode ainda ser subdividida conforme expresso abaixo.

$$N_o = N_{oz} + N_{pl} + N_{oL} \quad (4.33)$$

em que:

N_{oz} = potência de atrito das engrenagens;

N_{pl} = potência de agitação do lubrificante;

N_{oL} = potência nos mancais.

A potência perdida, devido ao funcionamento em vazio, não será considerada pelo fato de que para o cálculo do atrito lateral equivalente (f_{se}) já foi subtraída a potência perdida para funcionamento de todo o conjunto, em vazio, através da consideração da pressão corrigida expressa conforme já explicado neste item (4.3.2).

A potência perdida nos dentes pode ser expressa por:

$$N_z = N_I \left(\frac{0,1}{Z_I \cos \beta} + \frac{0,03}{v_t + 2} \right) \quad (4.34)$$

em que:

N_z = potência perdida nos dentes (CV);

N_I = potência de acionamento (CV);

Z_I = número de dentes do pinhão;

β = ângulo de inclinação do dente;

v_t = velocidade tangencial medida no círculo do diâmetro primitivo do engrenamento (m/s).

A potência perdida nos mancais pode ser expressa por:

$$N_L = \sum_I \frac{\mu_L \cdot F_L \cdot d_L \cdot n_L}{1,43 \cdot 10^6} \quad (4.35)$$

em que:

μ_L = coeficiente de atrito dos mancais;

F_L = carga no mancal (kgf);

d_L = diâmetro do eixo do mancal (mm);

n_L = velocidade de rotação do eixo do mancal (*rpm*).

PROVENZA (1986) indica os seguintes valores de rendimentos:

Mancais de rolamentos (99 %);

Engrenagens cilíndricas fresadas (96 %).

O mesmo autor apresenta duas expressões para a estimativa do rendimento total em transmissões por engrenagens:

$$\eta_t = \frac{1}{1 + \mu_d \pi \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)} \quad (4.36)$$

em que:

η_t = rendimento da transmissão por engrenagens;

μ_d = coeficiente de atrito de deslizamento entre os dentes;

Z_1 = número de dentes do pinhão;

Z_2 = número de dentes da coroa.

$$\eta_t = 1 - 0,5 \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) \quad (4.37)$$

Apresenta-se abaixo o cálculo do rendimento da mesa rotativa utilizando a expressão (4.32), NIEMANN (1960) que é reescrita.

$$N_v = N_o + N_z + N_L \quad (4.32)$$

$$N_o = 0$$

NIEMANN (1960) apresenta a seguinte expressão para o cálculo da potência perdida nos dentes.

$$N_z = N_I \left(\frac{0,1}{Z_1 \cos \beta} + \frac{0,03}{v_t + 2} \right) \quad (4.38)$$

$$N_z = I \left(\frac{0,1}{14 \cos 0} + \frac{0,03}{v_t + 2} \right) \quad (4.39)$$

Foi utilizado $N_I = I$ para se obter a perda no engrenamento para 1 CV.

Para pinhão com 14 dentes ($Z_1 = 14$) e coroa com 53 dentes ($Z_2 = 53$) e rotação da hélice igual a 15 rpm, a rotação do pinhão será:

$$n_{\text{pinhão}} = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot n_{\text{coroa}} = \frac{53}{14} \cdot 15 = 56,78 \cong 57 \quad (4.40)$$

A velocidade tangencial em (m/min) pode ser expressa por:

$$v_t = \frac{\pi \cdot dp_{\text{pinhão}} \cdot n_{\text{pinhão}}}{1000} \quad (4.41)$$

em que:

$dp_{\text{pinhão}}$ = diâmetro primitivo do pinhão (mm);

$n_{\text{pinhão}}$ = velocidade de rotação do pinhão (rpm).

O diâmetro primitivo de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos pode ser obtido através da expressão:

$$dp = m \cdot Z \quad (4.42)$$

em que:

dp = diâmetro primitivo da engrenagem;

m = módulo do dente da engrenagem;

Z = número de dentes da engrenagem.

De (4.41) e (4.42) resulta:

$$v_t = \frac{\pi \cdot m \cdot Z_1 \cdot n_{\text{pinhão}}}{1000} \quad (4.42)$$

então:

$$v_t = \frac{\pi \cdot 8 \cdot 14 \cdot 57}{1000} = 20,06 \text{ m/min} = 0,334 \text{ m/s}$$

$$N_z = I \left(\frac{0,1}{14 \cdot 1} + \frac{0,03}{0,334 + 2} \right) = 0,02 \quad \text{CV}$$

O valor obtido (0,02 CV) corresponde a 2% da potência de acionamento considerada (1 CV) que corresponde a um rendimento de 98 %.

A potência perdida nos mancais pode ser calculada pela expressão (4.35) reescrita abaixo.

$$N_L = \sum_i \frac{\mu_L \cdot F_L \cdot d_L \cdot n_L}{1,43 \cdot 10^6}$$

Nesta pesquisa foi utilizada uma perfuratriz cuja mesa rotativa é constituída basicamente por: uma caixa de aço, quatro motores hidráulicos, quatro pinhões, uma coroa e cinco pares de mancais de rolamentos. Os motores hidráulicos são acoplados diretamente nos eixos dos pinhões, ou seja, não foram utilizados redutores intermediários, normalmente utilizados nos equipamentos de estacas hélice contínua. A simetria utilizada na montagem dos quatro motores hidráulicos faz com que os mancais da engrenagem movida, teoricamente, não sofram esforços radiais e por esse motivo não será considerada nenhuma perda nesses mancais. Segundo STIPKOVIC (1983), para cada par de mancais das engrenagens motoras (pinhões) a força resultante, pode ser expressa por:

$$F_L = \frac{F_u}{\cos \alpha_0} \quad (4.43)$$

em que:

F_L = força resultante no par de mancais;

F_u = força tangencial do engrenamento;

α_0 = ângulo de pressão do engrenamento.

E força tangencial (F_u) pode ser expressa por:

$$F_u = \frac{2 \cdot T_{mh}}{d_p} \quad (4.44)$$

em que:

T = torque no motor hidráulico (Nm);

d_p = diâmetro primitivo da engrenagem (m);

De (4.43) e (4.44) resulta:

$$F_L = \frac{2 \cdot T_{mh}}{d_p \cdot \cos \alpha_0} \quad (4.45)$$

A Figura 4.10 apresenta as curvas de rendimento do motor DANFOSS, série OMV 630. Quatro motores dessa série estão instalados na mesa rotativa da perfuratriz utilizada nos ensaios *FDT*. Para a pressão de aproximadamente 4000 kPa (40 bar) e rotação do motor

hidráulico de aproximadamente 60 rpm, obtém-se, através da Figura 4.10, o valor do torque no motor hidráulico de aproximadamente 380 Nm.

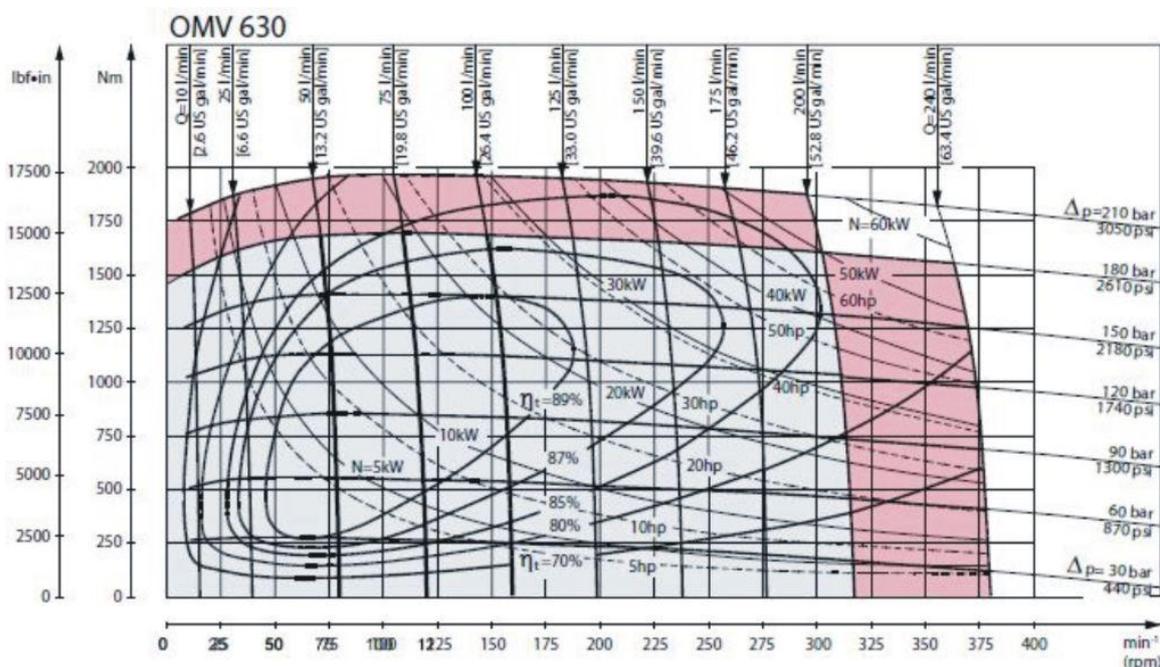


Figura 4.10 Curvas de rendimentos do motor hidráulico OMV 630. (Danfoss, 2013).

A força resultante no par de mancais, calculada pela expressão (4.45) será:

$$F_L = \frac{2.380}{0,112.0,997} = 7221N$$

Para a aplicação da expressão (4.35) há a necessidade de se conhecer o coeficiente de atrito do mancal de rolamento. Segundo FAIRES (1976) o coeficiente de atrito dos mancais de rolamento varia de 0,001 a 0,0045. No entanto esse autor aconselha a utilização de valores um pouco maiores para o caso de rolamentos novos ou se houver lubrificante em excesso. Segundo HALL (1968) o coeficiente de atrito dos mancais de rolamento varia de 0,001 a 0,003, mas salienta que uma montagem com aperto exagerado pode causar um grande aumento no atrito. Como pode-se notar, a escolha do valor exato do atrito de rolamento é praticamente impossível. Para este trabalho será adotado o valor do atrito de rolamento como sendo igual a 0,002.

Assim, para dois mancais de rolamento do pinhão (um par) a perda de potência será:

$$N_L = \frac{0,002.72270.57}{1,43.10^6} = 4,03.10^{-3}$$

A perda total nos mancais será:

$$N_L = 4.4,03 \cdot 10^{-3} = 0,016 CV$$

Para uma pressão média de ensaio igual a 3890 kPa (38,9) bar e vazão média da bomba hidráulica, igual a 152 l/min, a potência média consumida será:

$$N_m = \frac{p_m Q_m}{450} = \frac{39 \cdot 152}{450} = 13,2 \quad CV$$

A perda nos mancais (0,016 CV) representa 0,122% da potência média consumida, portanto o rendimento dos mancais pode ser considerado igual a 99,88%.

Para a pressão de 12000 kPa (120 bar) e rotação do eixo do mancal de 60 rpm, o torque no motor hidráulico será de aproximadamente 1130 Nm o que resultará numa perda de potência nos quatro pares de mancais de aproximadamente 0,048 CV que representa uma perda de potência de 0,118%, em relação à potência de aproximadamente 40,5 CV que deverá ser disponibilizada para a pressão de 12000 kPa (120 bar). Essa perda representa uma eficiência dos mancais igual a aproximadamente 99,88%, portanto igual à eficiência obtida para o caso da pressão hidráulica média de 4000 kPa (40 bar).

A eficiência total, aproximada, do sistema de engrenamento será igual ao produto da eficiência nos dentes do engrenamento pela eficiência nos mancais. O cálculo é feito pela expressão:

$$\eta_t = 0,98 \cdot 0,99 = 0,97 \quad (4.46)$$

Usando a expressão (4.36) apresentada por PROVENZA (1987) tem-se:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \mu_d \pi \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)}$$

$$\eta_i = \frac{1}{1 + 0,1\pi \left(\frac{1}{14} + \frac{1}{53} \right)} = 0,9724 \cong 0,97$$

Para a expressão (4.37), também proposta por PROVENZA (1987) tem-se:

$$\eta_i = 1 - 0,5 \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)$$

$$\eta_i = 1 - 0,5 \left(\frac{1}{14} + \frac{1}{53} \right) = 0,955 \cong 0,95$$

Com base nos valores obtidos através das diversas expressões apresentadas para a estimativa de eficiência, é razoável adotar o valor de 95% como sendo a eficiência do sistema de engrenamento.

Para os ensaios realizados no campo experimental da UNICAMP, os valores médios obtidos ao longo da profundidade para velocidade de rotação, pressão na entrada dos motores hidráulicos e perda de carga total para acionamento da mesa rotativa sem carga (em vazio) foram, respectivamente, 15 rpm, 39 bar e 10 bar. A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos.

A curva de Vazão *versus* Velocidade de rotação, ou seja, vazão da bomba hidráulica que alimenta os motores hidráulicos da mesa rotativa *versus* velocidade de rotação do instrumento, foi obtida através da realização de ensaios utilizando-se duas metodologias.

Tabela 4.4 – Velocidade de rotação, pressões no motores e perdas de carga.

Identificação do ensaio	Velocidade média de rotação (rpm)	Pressão nos motores (kPa)	Perda de carga total na mesa rotativa sem carga (kPa)
<i>FDT-2</i>	14	4100	1100
<i>FDT-3</i>	14	3700	900
<i>FDT-4</i>	14	3800	1000
<i>FDT-5</i>	14	4100	1000
<i>FDT-6</i>	17	3900	1000
<i>FDT-7</i>	14	3900	900
Médias	15	3900	1000

Na primeira metodologia utilizou-se um tambor com diâmetro interno de 56,5 cm e altura de 82,8 cm. Foram realizadas seis medições conforme descrito abaixo.

Para uma determinada rotação do eixo de saída da mesa rotativa e para um determinado tempo mediu-se a altura atingida pelo óleo hidráulico no tambor. Sendo conhecidas as dimensões do tambor foi possível calcular a vazão para cada rotação do eixo de saída da mesa rotativa. A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos nesse ensaio. A Figura 4.11 apresenta a curva de vazão obtida e o ajuste obtido considerando uma equação do primeiro grau. Como pode ser constatado não se obteve um bom valor para o coeficiente de determinação (R^2).

Na segunda metodologia utilizou-se um medidor de vazão marca *TechMeter*, modelo TCM25NBFA10-B. Foram feitos cinco ensaios sendo que para cada ensaio fixou-se uma rotação do eixo da mesa rotativa e mediu-se a vazão para cinco tempos diferentes.

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio para a determinação das vazões de óleo hidráulico na mesa rotativa.

Ensaio	Vel. de rotação (n)	Tempo (s)	H _{óleo} (cm)	V _{óleo} (cm ³)	Q (cm ³ /min)	Q (l/min)
1	8	120	62.8	157451	78726	79
2	10	96	70.5	176757	110473	110
3	12	62	59.8	149930	145093	145
4	15	60	61.2	153440	153440	153
5	17	60	70.3	176255	176255	176
6	19	60	78.2	196062	196062	196

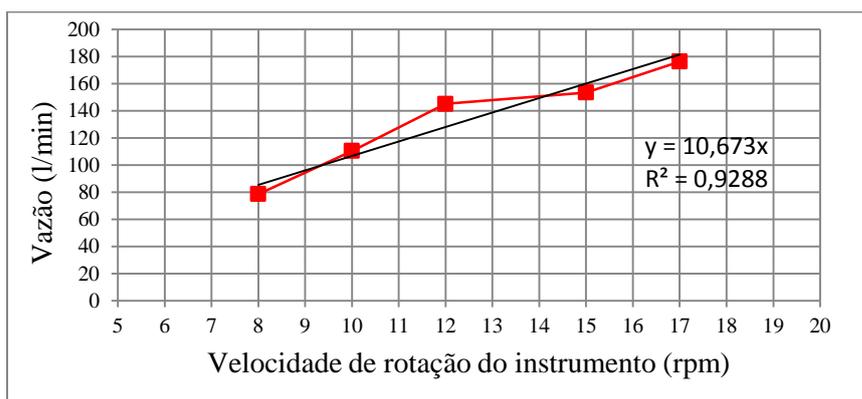


Figura 4.11 Curva de vazão na mesa rotativa – Metodologia 1.

A Tabela 4.6 apresenta as vazões obtidas para cada rotação fixada e a Figura 4.12 apresenta as curvas de vazão e de tendência, considerando uma equação do primeiro grau. A utilização do instrumento de medida de vazão mostrou-se interessante visto que foi possível obter uma equação que representa melhor a vazão hidráulica em função da rotação do instrumento. Desta vez obteve-se o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,991. Dessa forma, todos os cálculos que envolveram vazão do óleo hidráulico foram feitos com base na equação escrita abaixo.

$$Q_b = 10,103 \cdot \eta \quad (4.47)$$

em que:

Q_b = vazão da bomba que alimenta os motores hidráulicos da mesa rotativa (l/min);

n_i = velocidade de rotação do instrumento (rpm).

Tabela 4.6 – Resultados de ensaios de vazão hidráulica com utilização de instrumento.

Ensaio	Vel. de rotação (n)	Vazão (l/min)						Média
		0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	
1	7	64	71	72	72	71	71	70
2	10	97	98	99	98	99	98	98
3	12	116	116	116	117	118	118	117
4	15	149	150	150	151	151	151	150
5	17	177	178	178	178	178	178	178

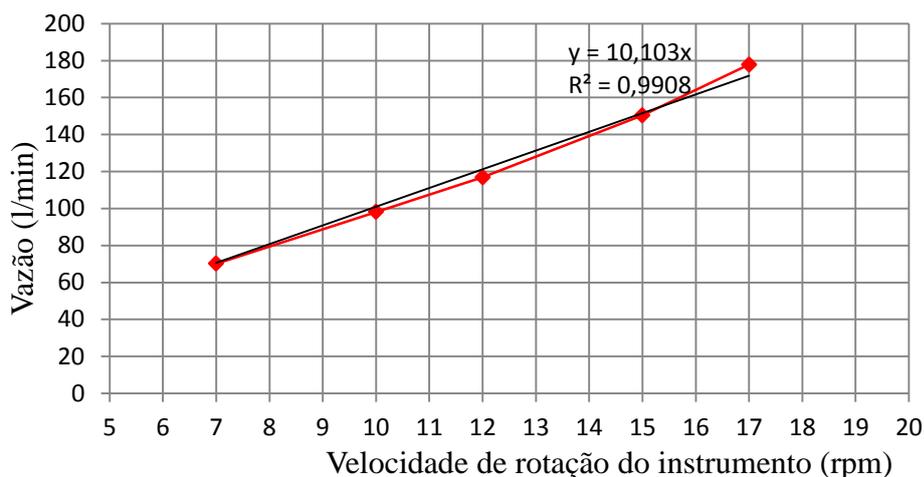


Figura 4.12 Curva de vazão na mesa rotativa – Metodologia 2.

Para a velocidade de rotação média utilizada nos ensaios (*FDT*) igual a 15 rpm a vazão hidráulica é calculada abaixo.

$$Q_b = 10,1 \cdot \eta = 10,1 \cdot 15 = 151,5 \cong 152 \text{ l/min}$$

Considerando que os motores estão ligados em paralelo, a vazão para cada motor pode ser obtida pela expressão:

$$Q_{mh} = \frac{Q_b}{q_{mh}} \quad (4.48)$$

em que:

Q_{mh} = vazão em um motor hidráulico;

Q_b = vazão da bomba;

q_{mh} = quantidade de motores hidráulicos instalados em paralelo.

$$Q_{mh} = \frac{152}{4} = 38 \text{ l/min}$$

O ábaco da Figura 4.12 permite obter o rendimento do motor hidráulico em função de sua rotação a qual está diretamente ligada à vazão de óleo e à pressão de trabalho.

Para pressões na faixa de 30 a 120 bar e rotação em torno de 55 a 60 rpm, o rendimento do motor será de aproximadamente 88%.

O rendimento total da mesa rotativa será:

$$\eta_{mr} = \eta_t \cdot \eta_{mh} \quad (4.49)$$

$$\eta_{mr} = 0,95 \cdot 0,88 = 0,836 \cong 0,84$$

em que:

η_{mr} = rendimento da mesa rotativa;

η_i = rendimento do engrenamento;

η_{mh} = rendimento do motor hidráulico.

Os valores de atrito lateral equivalente unitário (f_{se}) foram obtidos a partir da expressão (4.28) que está reescrita abaixo.

$$f_{se(i)} = \frac{\eta_{mr} \cdot p_{cor}(i) \cdot Q(i)}{\pi^2 d^2 n_i(i) l_i}$$

O atrito lateral unitário na estaca poderá ser expresso por:

$$r_L = \frac{f_{se}}{G_2} \quad (4.50)$$

em que:

G_2 = Fator de correção que leva em conta os diferentes comportamentos entre o instrumento e a estaca.

5 ENSAIOS *FDT*

5.1 INTRODUÇÃO

Foram realizados ensaios *FDT* em seis sítios, todos no interior do estado de São Paulo, conforme indicados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Ensaios *FDT* realizados em diversos Sítios.

Denominação do Sítio	Município	Período	Qde. de ensaios
Construtora e Incorporadora Villa Ramos	Araras	08/06/2011 a 14/06/2011	10
Suntheke Incorporadora Ltda	Araras	08/07/2011 a 09/07/2011	5
UNICAMP	Campinas	19/10/2011 a 20/10/2011	7
Igreja do Evangelho Quadrangular	Araras	26/06/2012 a 28/06/2012	5
Goodyear do Brasil Produtos de Borracha Ltda	Americana	25/09/2012	2
Residencial Ouro Verde	Araras	27/09/2012	2

Os ensaios realizados na UNICAMP e na Igreja do Evangelho Quadrangular estão apresentados neste volume da tese pelo fato de que nesses sítios foram feitas provas de carga estáticas, que possibilitaram o início do desenvolvimento de correlações dos resultados dos ensaios com as capacidades de cargas dos elementos estruturais.

Os ensaios *FDT* realizados nos demais sítios são apresentados no volume 2 desta tese, em forma de APÊNDICES. Nos locais onde estes ensaios foram feitos não foram realizadas provas de carga.

5.2 CAMPO EXPERIMENTAL DE MECÂNICA DOS SOLOS E FUNDAÇÕES DA UNICAMP

Há mais de duas décadas foram realizados os primeiros ensaios de campo (*SPT*) e laboratoriais no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da UNICAMP. Durante esse período diversas pesquisas foram realizadas nesse local, resultando em dissertações de mestrado e teses de doutoramento.

No subsolo local ocorrem rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral (diabásio).

Segundo ZUQUETE (1987) o material local é classificado, pedologicamente, como latossolos roxos e mineralogicamente constituído por quartzo, ilmenita, magnetita, caulinita, gibsita, óxidos e hidróxidos de ferro, com espessuras que variam de 5 a 30 m.

O solo de origem de diabásio do subsolo do Campo experimental apresenta uma camada superficial, coluvionar, de argila silto-arenosa, porosa, de aproximadamente 6,50 m de espessura, sobreposta a uma camada de solo saprolítico de silte-argilo-arenoso com espessura de aproximadamente 12,5 m. O nível d'água encontra-se a aproximadamente 17,7 m de profundidade contanto a partir da cota 100,00 m considerada para superfície do terreno.

A Figura 5.1 apresenta uma seção geológica típica da região de Campinas.

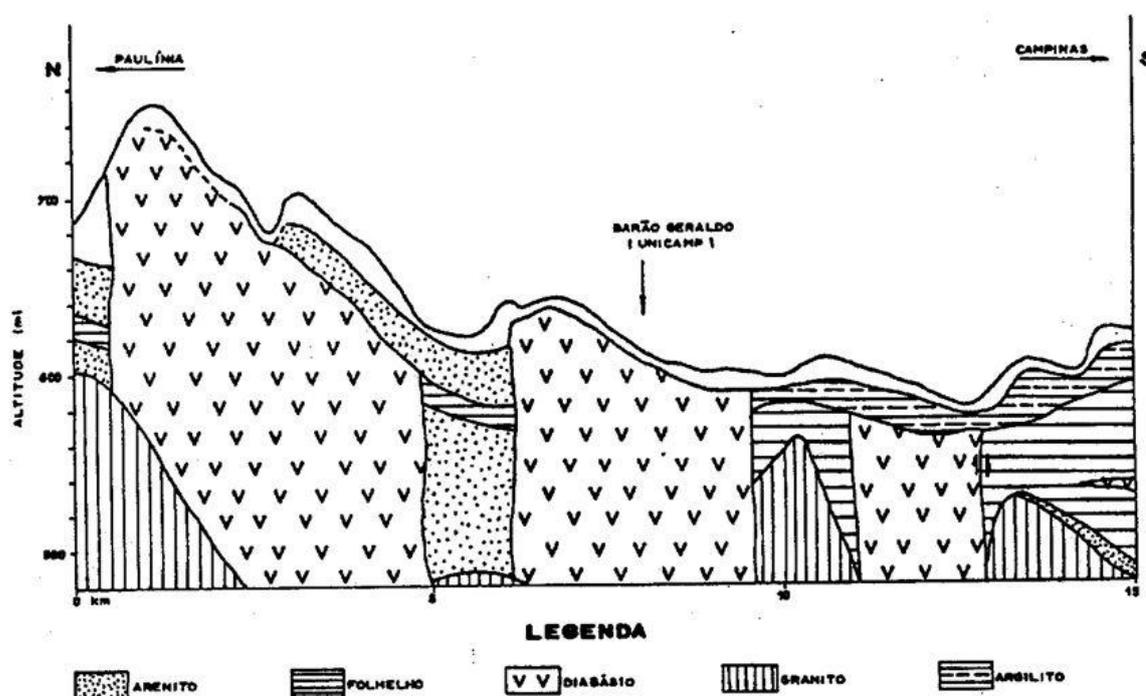


Figura 5.1 – Perfil Geológico da Região de Campinas (Zuquete, 1987).

Por ocasião do Seminário de Engenharia de Fundações – SEFE V, foi publicado um material que fornece um resumo dos ensaios realizados no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade de Campinas – UNICAMP, (Carvalho et al, 2004). A iniciativa coube à Associação Brasileira de Mecânica dos Solos através da Comissão Técnica de Investigação de Campo, sob, a presidência do Prof. Dr. RENATO CUNHA da Universidade de Brasília (UNB) e a vice-presidência do Prof. Dr. HERALDO L. GIACHETI da Universidade de Bauru (UNESP) e Universidade de São Paulo (USP-São Carlos).

A Figura 5.2 apresenta o perfil típico do subsolo do campo experimental.

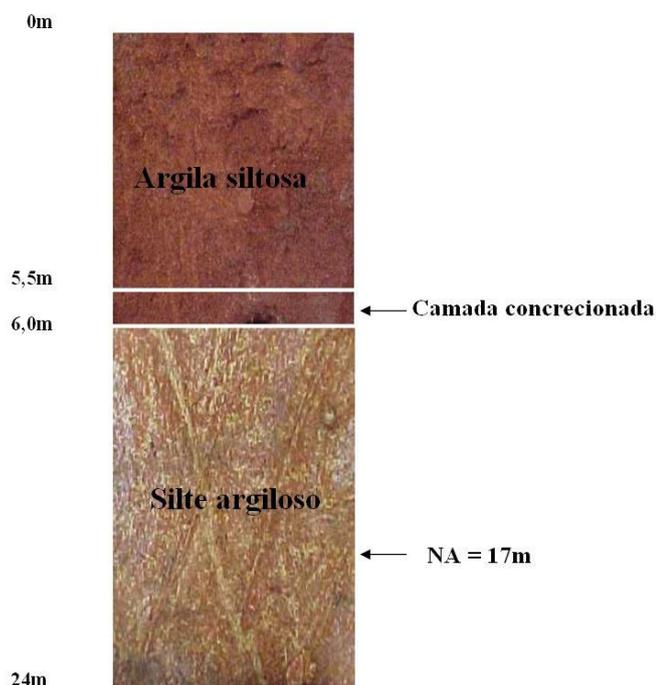


Figura 5.2 – Perfil típico do subsolo do campo experimental da UNICAMP (CARVALHO et al., 2004).

5.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS, DE ATRITO LATERAL UNITÁRIO EQUIVALENTE, OBTIDOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP.

No Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da FEAGRI – UNICAMP foram executados oito ensaios utilizando-se os dois instrumentos desenvolvidos pelo autor da presente tese.

O ensaio *FDT-1* foi realizado com um dos instrumentos desenvolvidos inicialmente. Esse instrumento possui 250 mm de diâmetro e comprimento útil (de ensaio) igual a 1000 mm. O ensaio foi paralisado com 6,73 m pelo fato já mencionado no item 4.2, ou seja, por insuficiência de torque, e de forças, de penetração (*pull-down*) e de extração (*pull-back*).

O ensaio foi realizado com velocidade de penetração entre 15 e 25 m/h e velocidade de rotação entre 10 e 20 rpm

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio *FDT-1* a cada 0,25 m de profundidade. Embora o sistema de monitoramento eletrônico utilizado tenha registrado dados a cada 0,01 m, a apresentação, neste texto, das tabelas de resultados com intervalos tão pequenos, implicaria na utilização de aproximadamente 24 páginas para cada ensaio. Apenas para a apresentação das tabelas de resultados para os oito ensaios realizados no sítio da UNICAMP seriam necessárias 192 páginas. Sendo assim, optou-se pela apresentação, no texto da tese, das tabelas de resultados com intervalos de profundidade de 0,25 m.

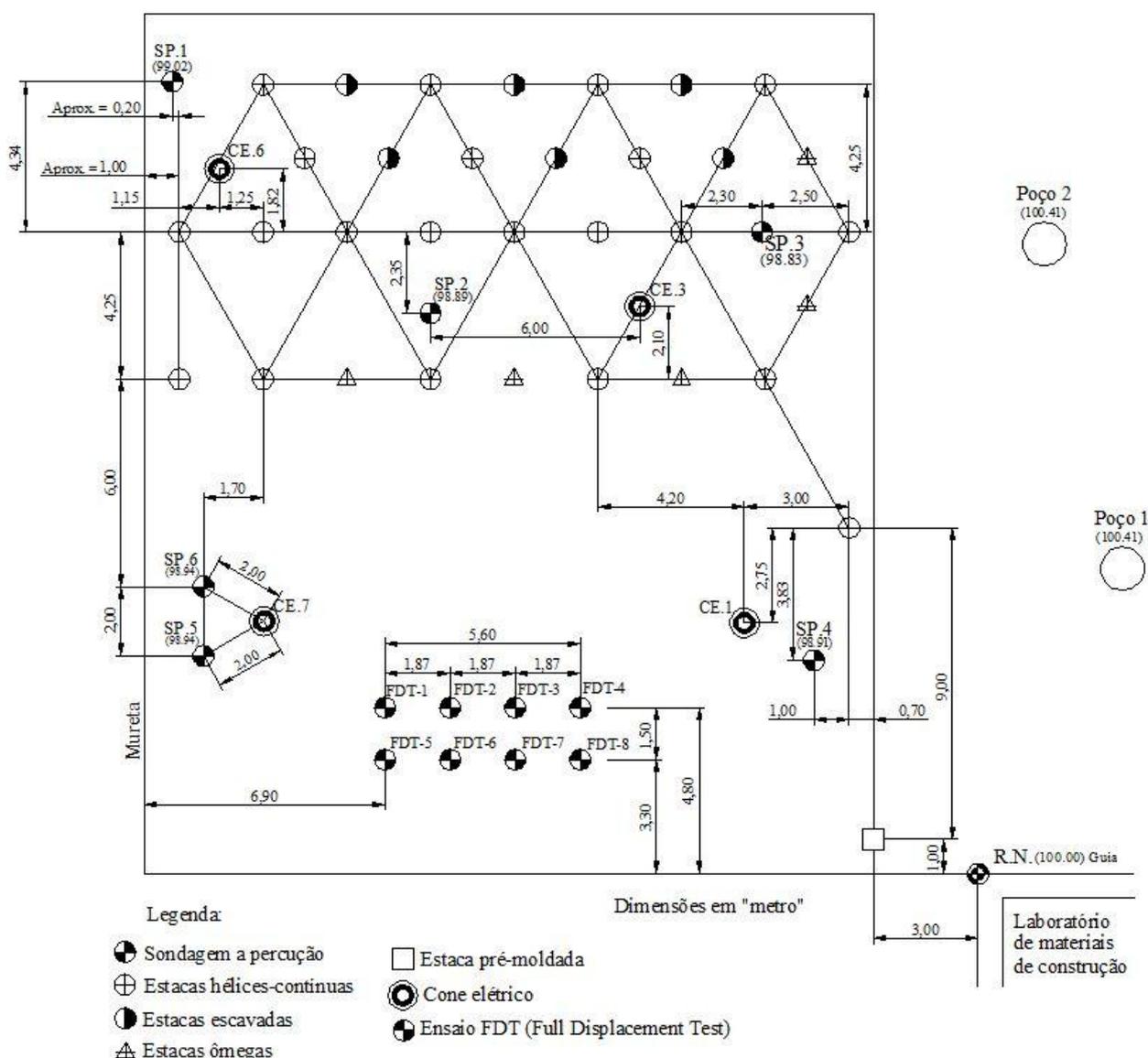


Figura 5.3 – Localização de ensaios *SPT* e *CPT* realizados por Peixoto (2001), de provas de carga estáticas realizadas por Albuquerque (2001) e ensaios *FDT*.

As curvas Atrito lateral *versus* Profundidade são apresentadas com intervalos de profundidade de 0,01 m, 0,25 m e 1,00 m, para os ensaios na UNICAMP e com intervalos de 0,25 m para os demais sítios.

O registro de dados a cada 0,01m pode parecer inadequado, no entanto, as análises que se são feitas em seguida mostram que intervalos pequenos desses registros possibilitam a obtenção de informações que não seriam obtidas para o caso de intervalos maiores, como por exemplo 0,50 m ou 1,00 m.

As Figuras 5.4 a 5.6 apresentam as curvas de atrito lateral unitário (f_{se}) *versus* profundidade, para intervalos de profundidade de, 1 cm, 25 cm e 100 cm, respectivamente. Em todas as legendas que se seguem as indicações “Int=1 cm”, “Int=25 cm” e Int=1 m”, significam,

respectivamente, intervalos de registro de dados em termos de profundidade de 1 cm, 25 cm e 1 m.

A Tabela 5.2 apresenta a descrição do significado de cada coluna das tabelas de resultados dos ensaios *FDT*.

Tabela 5.2 – Descrição do significado de cada coluna da tabela de resultados de ensaio *FDT*.

Coluna	Descrição do significado
1	Profundidade da ponta do instrumento
2	Pressão hidráulica adquirida na entrada dos motores hidráulicos da mesa rotativa.
3	Pressão hidráulica corrigida, ou seja, pressão hidráulica durante a operação de perfuração menos a pressão hidráulica para o funcionamento em vazio (sem carga).
4	Velocidade de translação vertical do instrumento
5	Velocidade de rotação do instrumento
6	Vazão hidráulica total na mesa rotativa, obtidos através da equação (4.39), obtida a partir de leituras feitas em um mostrador digital de um instrumento de medida de vazão.
7	Vazão hidráulica estimada considerando a vazão nominal (de catálogo) da bomba, igual a 190 l/min, com rendimento volumétrico de 80% e rotação do motor diesel igual a 1800 rpm. Essa coluna foi colocada apenas para mostrar que é possível estimar a vazão com boa precisão mesmo sem dispor de um instrumento de medida de vazão.
8	Atrito lateral unitário
9	Valores médios de atrito lateral unitário.

No sistema eletrônico de monitoramento da perfuratriz as pressões hidráulicas são fornecidas em “bar”, mas nas tabelas de resultados dos ensaios *FDT*, esses valores são apresentados no sistema internacional de medidas (SI), ou seja, em “*kPa*”.

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio *FDT-1*

<i>Prof.</i> (<i>m</i>)	<i>p</i> (<i>kPa</i>)	<i>P_{corr}</i> (<i>kPa</i>)	<i>v_i</i> (<i>m/h</i>)	<i>n_i</i> (<i>rpm</i>)	<i>Q_{medida}</i> (<i>m³/s</i>)	<i>Q_{estim}</i> (<i>m³/s</i>)	<i>f_{se}</i> (<i>kPa</i>)	<i>f_{sem}</i> (<i>kPa</i>)
0.00	0	0	0	0	0.000000	0.000000	0	0
0.25	2400	1400	22	18	0.003031	0.003041	78	39
0.50	2700	1700	26	18	0.003031	0.003041	48	42
0.75	3700	2700	24	17	0.002863	0.002872	50	44
1.00	4800	3800	26	16	0.002694	0.002703	53	46
1.25	4500	3500	21	16	0.002694	0.002703	49	46
1.50	5200	4200	24	15	0.002526	0.002534	59	48
1.75	5300	4300	22	15	0.002526	0.002534	60	50
2.00	6100	5100	20	15	0.002526	0.002534	71	52
2.25	5900	4900	18	15	0.002526	0.002534	69	54
2.50	6000	5000	19	15	0.002526	0.002534	70	55
2.75	5700	4700	19	15	0.002526	0.002534	66	56
3.00	6100	5100	18	14	0.002357	0.002365	71	57
3.25	6500	5500	18	14	0.002357	0.002365	77	59
3.50	7300	6300	25	13	0.002189	0.002196	88	61
3.75	7400	6400	12	13	0.002189	0.002196	90	62
4.00	9100	8100	22	12	0.002021	0.002027	113	65
4.25	9200	8200	21	12	0.002021	0.002027	115	68
4.50	10300	9300	21	11	0.001852	0.001858	130	71
4.75	10800	9800	20	10	0.001684	0.001689	137	75
5.00	11400	10400	20	9	0.001515	0.001520	146	78
5.25	10200	9200	19	11	0.001852	0.001858	129	80
5.50	10200	9200	20	10	0.001684	0.001689	129	83
5.75	10600	9600	19	9	0.001515	0.001520	134	85
6.00	11800	10800	19	9	0.001515	0.001520	151	87
6.25	13500	12500	20	7	0.001179	0.001182	175	91
6.50	13800	12800	22	7	0.001179	0.001182	179	94
6.73	15900	14900	20	6	0.001010	0.001014	209	98

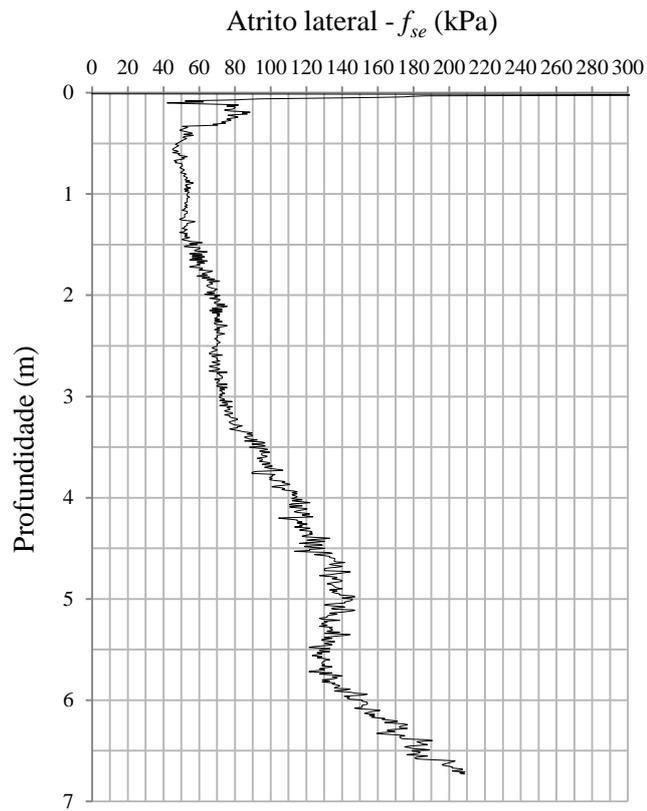


Figura 5.4 Atrito lateral unitário x Profundidade – *FDT-I-Int=1cm*.

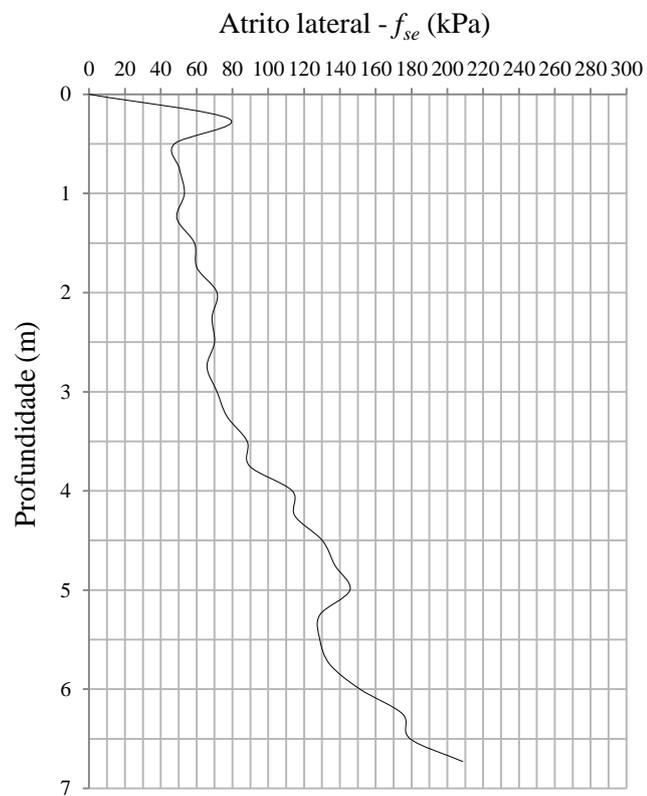


Figura 5.5 Atrito lateral unitário x Profundidade - *FDT-I-Int=25 cm*.

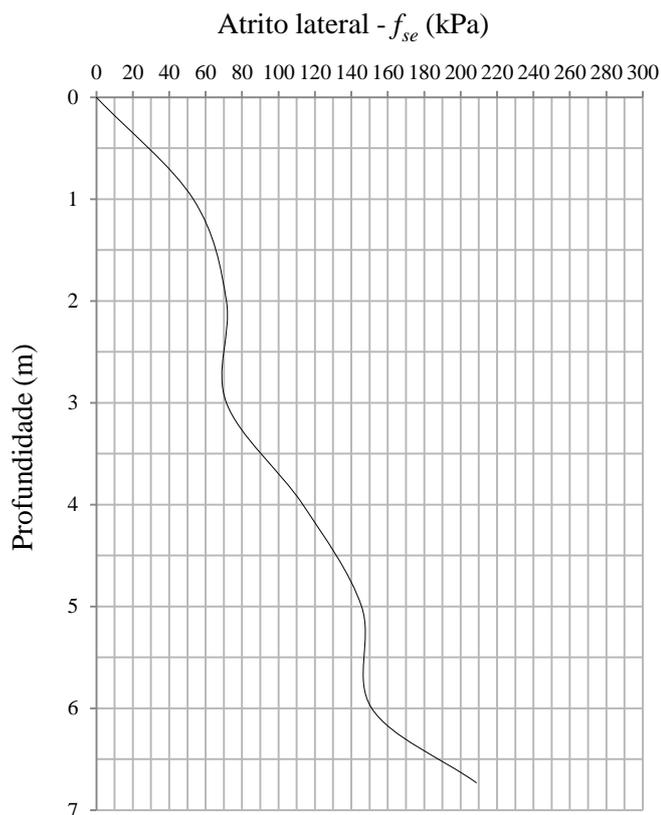


Figura 5.6 Atrito lateral unitário x Profundidade – *FDT-1-Int=1 m*.

Embora trata-se do mesmo ensaio, na Figura 5.4 é possível observar a existência de uma camada resistente na superfície do terreno, o que não se observa nas Figuras 5.5 e 5.6 que foram obtidas a partir do registro de dados de profundidades com intervalos de 25 cm e 1 m, respectivamente.

Nas Figuras 5.4 e 5.5 é possível observar o valor de f_{se} de aproximadamente 80 kPa para a profundidade aproximada de 0,25 m, o que não se observa na Figura 5.6, já que para essa última figura os dados foram registrados a cada metro.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos no ensaio *FDT-2* e as Figuras 5.7 a 5.9 apresentam as curvas de atrito lateral unitário (f_{se}) versus profundidade, para intervalos de profundidade de, 1 cm, 25 cm e 100 cm, respectivamente.

Tabela 5.4 – Resultados do ensaio *FDT-2*

<i>Prof.</i> (m)	<i>p</i> (kPa)	<i>p_{corr}</i> (kPa)	<i>v_i</i> (m/h)	<i>n_i</i> (rpm)	<i>Q_{medida}</i> (m ³ /s)	<i>Q_{estim}</i> (m ³ /s)	<i>f_{se}</i> (kPa)	<i>f_{sem}</i> (kPa)
0.00	0	0	0	0	0.000000	0.000000	0	0
0.25	1400	300	23	18	0.003031	0.003029	46	23
0.50	1700	600	23	17	0.002863	0.002861	46	30
0.75	2700	1600	19	17	0.002863	0.002861	81	43
1.00	2700	1600	16	16	0.002694	0.002693	61	47
1.25	2800	1700	18	16	0.002694	0.002693	65	50
1.50	2900	1800	18	16	0.002694	0.002693	68	52
1.75	3000	1900	18	16	0.002694	0.002693	72	55
2.00	3100	2000	19	16	0.002694	0.002693	76	57
2.25	3200	2100	20	16	0.002694	0.002693	80	59
2.50	3300	2200	21	15	0.002526	0.002524	84	62
2.75	3300	2200	21	15	0.002526	0.002524	84	63
3.00	3500	2400	19	15	0.002526	0.002524	91	66
3.25	3800	2700	24	15	0.002526	0.002524	103	68
3.50	3500	2400	19	16	0.002694	0.002693	91	70
3.75	3400	2300	19	15	0.002526	0.002524	87	71
4.00	3900	2800	22	15	0.002526	0.002524	106	73
4.25	3900	2800	18	15	0.002526	0.002524	106	75
4.50	4200	3100	23	15	0.002526	0.002524	118	77
4.75	4300	3200	18	15	0.002526	0.002524	122	79
5.00	4300	3200	19	15	0.002526	0.002524	122	81
5.25	4400	3300	20	14	0.002357	0.002356	126	83
5.50	4800	3700	21	14	0.002357	0.002356	141	86
5.75	4800	3700	21	14	0.002357	0.002356	141	88
6.00	4700	3600	21	14	0.002357	0.002356	137	90
6.25	5700	4600	17	13	0.002189	0.002188	175	93
6.50	6600	5500	15	13	0.002189	0.002188	209	98
6.75	6000	4900	23	12	0.002021	0.002019	186	101
7.00	4900	3800	19	14	0.002357	0.002356	145	102
7.25	4300	3200	24	14	0.002357	0.002356	122	103
7.50	4100	3000	19	15	0.002526	0.002524	114	103
7.75	4100	3000	21	15	0.002526	0.002524	114	104
8.00	4000	2900	22	14	0.002357	0.002356	110	104
8.25	4000	2900	25	15	0.002526	0.002524	110	104
8.50	4000	2900	15	15	0.002526	0.002524	110	104
8.75	4100	3000	24	14	0.002357	0.002356	114	105
9.00	4300	3200	20	14	0.002357	0.002356	122	105
9.25	4500	3400	18	14	0.002357	0.002356	129	106
9.50	4900	3800	20	13	0.002189	0.002188	145	107
9.75	4800	3700	20	13	0.002189	0.002188	141	107
10.00	5000	3900	21	13	0.002189	0.002188	148	108
10.25	4800	3700	20	13	0.002189	0.002188	141	109
10.50	4500	3400	20	13	0.002189	0.002188	129	110
10.75	4700	3600	29	13	0.002189	0.002188	137	110
11.00	4700	3600	22	13	0.002189	0.002188	137	111
11.25	4600	3500	21	13	0.002189	0.002188	133	111
11.50	4500	3400	22	13	0.002189	0.002188	129	112
11.75	4900	3800	20	13	0.002189	0.002188	145	112
12.00	5300	4200	9	13	0.002189	0.002188	160	113
12.24	5600	4500	22	11	0.001852	0.001851	171	115

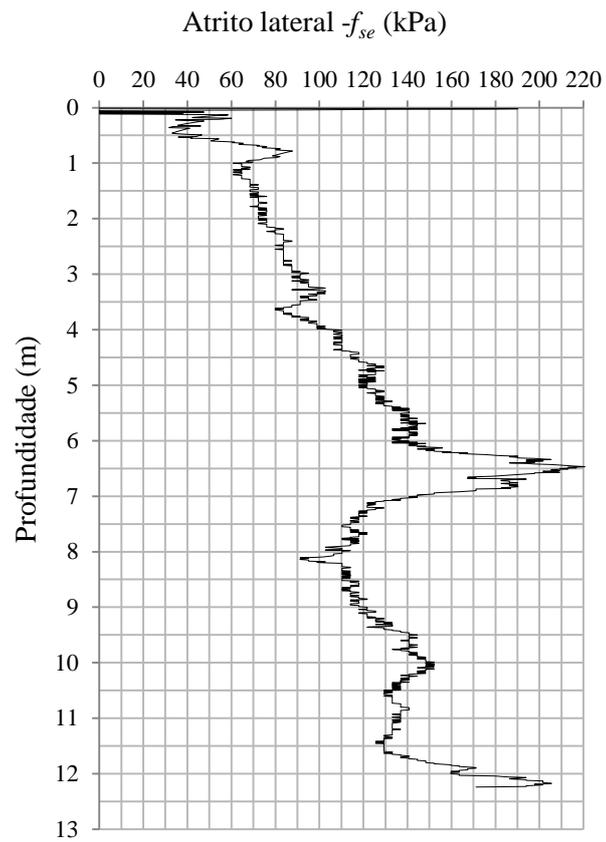


Figura 5.7 Atrito lateral unitário x Profundidade – *FDT-2-Int=1 cm*.

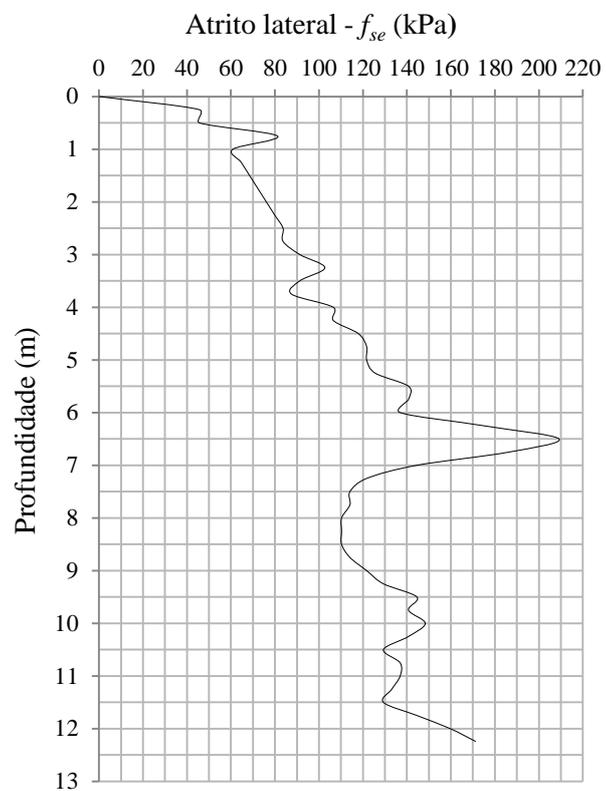


Figura 5.8 Atrito lateral unitário x Profundidade – *FDT-2-Int=25 cm*.

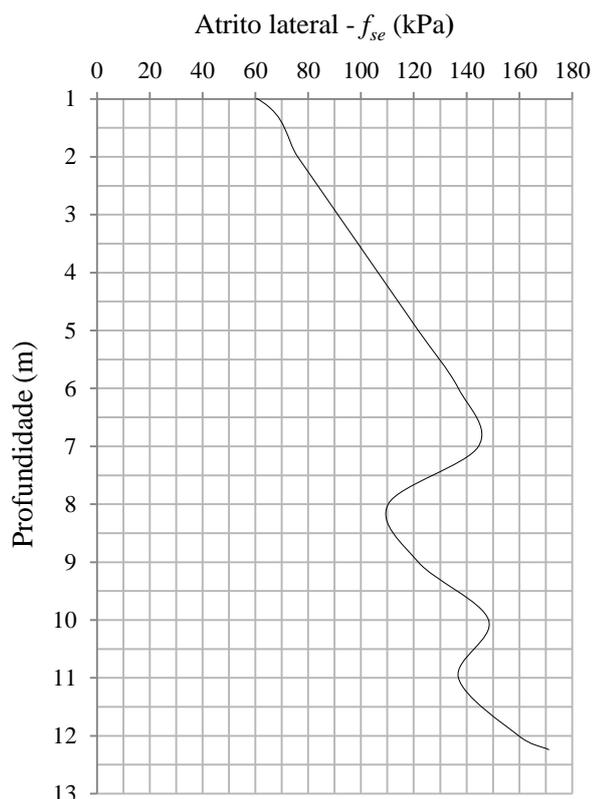


Figura 5.9 Atrito lateral unitário x Profundidade – *FDT-2-Int=1 m*.

Comparando-se as três curvas do ensaio *FDT-02*, observa-se nitidamente a maior sensibilidade obtida para a curva *Atrito lateral unitário x Profundidade* plotada para o intervalo de profundidade igual a 1 cm.

Na curva apresentada na Figura 5.7 nota-se que o atrito lateral apresenta um “pico” para a profundidade em torno de 6,50 m, de aproximadamente 220 kPa. Na curva apresentada na Figura 5.8 o valor de “pico”, na mesma região, aparece menor (em torno de 210 kPa) e na curva da Figura 5.9 esse valor aparece com o valor em torno de 145 kPa. Na tabela de resultados (Tabela 5.4) observa-se o valor de 137 kPa para a profundidade de 6 m.

Na Tabela 5.5 são mostrados valores registrados entre 6.00 m e 6.67 m, com intervalos de profundidade de 1 cm na qual observa-se que o valor máximo de f_{se} ocorre na profundidade de 6.47 m e é igual a 221 kPa e não igual a 137 kPa, para o registro de dados feito a cada metro. Em resumo pode-se afirmar que o registro de dados em intervalos pequenos confere ao ensaio bastante sensibilidade às variações localizadas de resistência. No entanto, será visto no decorrer do texto desta tese, que os valores médios de f_{se} são pouco afetados em função do intervalo de profundidade que os dados são registrados.

Tabela 5.5 – Valores obtidos para o ensaio *FDT-2* entre 6.39 m e 6.47 m.

<i>Prof. (m)</i>	<i>p(kPa)</i>	<i>p_{corr} (kPa)</i>	<i>v_i(m/h)</i>	<i>n_i (rpm)</i>	<i>f_{se} (kPa)</i>
6.00	4700	3600	21	14	137
6.01	4800	3700	21	14	141
6.02	4600	3500	21	13	133
6.03	4900	3800	20	14	145
6.04	4600	3500	20	14	133
6.05	5000	3900	8	6	148
6.06	4800	3700	14	9	141
6.07	4900	3800	17	14	145
6.08	4800	3700	20	14	141
6.09	4800	3700	16	13	141
6.10	5000	3900	19	14	148
6.11	4900	3800	14	13	145
6.12	5100	4000	15	13	152
6.13	5200	4100	16	14	156
6.14	5100	4000	12	13	152
6.15	4900	3800	16	14	145
6.16	5100	4000	16	13	152
6.17	5000	3900	20	14	148
6.18	5100	4000	18	13	152
6.19	5100	4000	21	14	152
6.20	5300	4200	16	14	160
6.21	5200	4100	21	14	156
6.22	5500	4400	16	14	167
6.23	5400	4300	18	13	164
6.25	5700	4600	17	13	175
6.26	5800	4700	18	13	179
6.27	5900	4800	21	13	183
6.28	6100	5000	19	13	190
6.29	6000	4900	22	13	186
6.30	6100	5000	21	13	190
6.31	6100	5000	20	13	190
6.32	6300	5200	24	13	198
6.33	6400	5300	23	13	202
6.34	6500	5400	24	13	205
6.35	6200	5100	24	13	194
6.36	6400	5300	21	13	202
6.37	6400	5300	23	13	202
6.38	6200	5100	25	13	194
6.39	6300	5200	22	13	198
6.40	6000	4900	20	13	186
6.41	6200	5100	14	13	194
6.42	6300	5200	17	13	198

Tabela 5.5 – Continuação

<i>Prof. (m)</i>	<i>p(kPa)</i>	<i>p_{corr} (kPa)</i>	<i>v_i(m/h)</i>	<i>n_i (rpm)</i>	<i>f_{se} (kPa)</i>
6.43	6500	5400	19	13	205
6.45	6700	5600	22	13	213
6.46	6800	5700	24	12	217
6.47	6900	5800	21	12	221
6.48	6700	5600	20	12	213
6.49	6800	5700	14	13	217
6.50	6600	5500	15	13	209
6.51	6700	5600	16	12	213
6.52	6500	5400	20	12	205
6.53	6500	5400	22	12	205
6.54	6600	5500	20	13	209
6.55	6400	5300	21	13	202
6.56	6500	5400	18	12	205
6.57	6600	5500	19	12	209
6.58	6300	5200	21	12	198
6.59	6300	5200	21	12	198
6.60	6200	5100	23	12	194
6.61	6100	5000	25	12	190
6.62	6000	4900	22	13	186
6.63	5900	4800	23	13	183
6.64	5800	4700	23	13	179
6.65	5600	4500	22	13	171
6.66	5500	4400	23	13	167
6.67	5600	4500	19	13	171

As Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos nos ensaios *FDT-3*, *FDT-4* e *FDT-5* e as Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam as curvas de atrito lateral unitário (f_{se}) *versus* profundidade, para os mesmos ensaios e para intervalo de profundidade de 1 cm.

A Tabela 5.9 apresenta resultados obtidos no ensaio *FDT-6*. A Figura 5.13 apresenta a curva Atrito lateral unitário *versus* Profundidade, para o ensaio *FDT-6*, considerando os valores de “pico” de f_{se} ocorridos entre 0,02 m e 0,06 m de profundidade e a Figura 5.14 apresenta a curva Atrito lateral unitário *versus* Profundidade para o mesmo ensaio, excluindo-se os valores de “pico” ocorridos entre 0,02 m e 0,06 m de profundidade. O valor de “pico” de f_{se} , igual a 2528 kPa a 0,02 m de profundidade, embora indique a existência de solo muito compactado na superfície do terreno, não pode ser considerado como um valor preciso pelo motivo explicado em seguida.

Para uma determinada posição “i” da ponta do instrumento, o atrito lateral unitário

por rotação, é obtido pela expressão (4.28) reescrita abaixo.

$$f_{se}(i) = \frac{\eta_{mr} \cdot P_{cor}(i) \cdot Q(i)}{\pi^2 \cdot d^2 \cdot l_i \cdot n_i(i)}$$

A partir do instante em que o instrumento penetra no solo o seu comprimento total que é igual a 1 m ($l_i=1$ m), esse valor torna-se uma constante, já que o comprimento de contato na interface instrumento - solo é constante e igual a 1 m. No entanto, se, por exemplo, a ponta do instrumento estiver na profundidade de 5 cm, o valor de “ l_i ” será igual a 5 cm e não 1 m. Nessa condição de início de ensaio, os valores de f_{se} não serão confiáveis pelo fato de que, neste caso, a demanda de energia na ponta do instrumento será significativa comparada com a pequena área lateral considerada ($\pi \cdot d \cdot l_i$), já que o solo circundante à ponta do instrumento não é considerado no cálculo da área de contato instrumento-solo.

Nos ensaios realizados nesta pesquisa, esse fato foi observado no máximo até aproximadamente 15 cm de profundidade.

Tabela 5.6 – Resultados do ensaio *FDT-3*.

<i>Prof. (m)</i>	<i>p(kPa)</i>	<i>P_{corr} (kPa)</i>	<i>v_i (m/h)</i>	<i>n_i (rpm)</i>	<i>Q_{medida} (m³/s)</i>	<i>Q_{estim} (m³/s)</i>	<i>f_{se} (kPa)</i>	<i>f_{sem} (kPa)</i>
0	0	0	0	0	0.000000	0.000000	0	0
0.25	1100	200	19	17	0.002863	0.002861	31	16
0.50	1300	400	20	16	0.002694	0.002693	31	21
0.75	1800	900	26	16	0.002694	0.002693	47	27
1.00	2000	1100	21	16	0.002694	0.002693	43	30
1.25	2100	1200	22	16	0.002694	0.002693	47	33
1.50	2000	1100	20	16	0.002694	0.002693	43	34
1.75	2000	1100	21	16	0.002694	0.002693	43	35
2.00	2100	1200	21	16	0.002694	0.002693	47	37
2.25	2800	1900	28	15	0.002526	0.002524	74	40
2.50	3200	2300	21	15	0.002526	0.002524	89	45
2.75	3200	2300	19	15	0.002526	0.002524	89	49
3.00	3500	2600	22	15	0.002526	0.002524	101	53
3.25	3700	2800	24	15	0.002526	0.002524	109	57
3.50	3800	2900	22	14	0.002357	0.002356	113	60
3.75	3800	2900	23	14	0.002357	0.002356	113	64
4.00	3900	3000	20	14	0.002357	0.002356	117	67
4.25	4200	3300	20	14	0.002357	0.002356	128	70
4.50	4600	3700	19	13	0.002189	0.002188	144	74
4.75	4600	3700	23	13	0.002189	0.002188	144	78
5.00	4800	3900	20	13	0.002189	0.002188	152	81
5.25	4600	3700	22	13	0.002189	0.002188	144	84
5.50	4400	3500	21	13	0.002189	0.002188	136	86

Tabela 5.6 – Continuação.

<i>Prof. (m)</i>	<i>p(kPa)</i>	<i>P_{corr}</i> <i>(kPa)</i>	<i>v_i</i> <i>(m/h)</i>	<i>n_i</i> <i>(rpm)</i>	<i>Q_{medida}</i> <i>(m³/s)</i>	<i>Q_{estim}</i> <i>(m³/s)</i>	<i>f_{se}</i> <i>(kPa)</i>	<i>f_{sem}</i> <i>(kPa)</i>
6.25	5400	4500	22	13	0.002189	0.002188	175	94
6.50	5200	4300	19	13	0.002189	0.002188	167	97
6.75	4800	3900	21	13	0.002189	0.002188	152	99
7.00	4200	3300	20	14	0.002357	0.002356	128	100
7.25	4100	3200	19	14	0.002357	0.002356	124	101
7.50	4200	3300	22	14	0.002357	0.002356	128	102
7.75	4100	3200	19	15	0.002526	0.002524	124	102
8.00	3800	2900	21	15	0.002526	0.002524	113	103
8.25	3800	2900	24	14	0.002357	0.002356	113	103
8.50	3500	2600	24	15	0.002526	0.002524	101	103
8.75	3300	2400	23	15	0.002526	0.002524	93	103
9.00	3500	2600	23	15	0.002526	0.002524	101	103
9.25	3600	2700	22	14	0.002357	0.002356	105	103
9.50	3700	2800	22	15	0.002526	0.002524	109	103
9.75	3800	2900	20	14	0.002357	0.002356	113	103
10.00	4400	3500	26	14	0.002357	0.002356	136	104
10.25	4100	3200	24	14	0.002357	0.002356	124	104
10.50	3900	3000	20	15	0.002526	0.002524	117	105
10.75	3900	3000	25	14	0.002357	0.002356	117	105
11.00	3900	3000	21	14	0.002357	0.002356	117	105
11.25	3900	3000	21	14	0.002357	0.002356	117	105
11.50	4000	3100	20	14	0.002357	0.002356	121	106
11.75	5100	4200	18	12	0.002021	0.002019	163	107
12.00	5200	4300	5	13	0.002189	0.002188	167	108
12.25	6100	5200	24	11	0.001852	0.001851	202	110

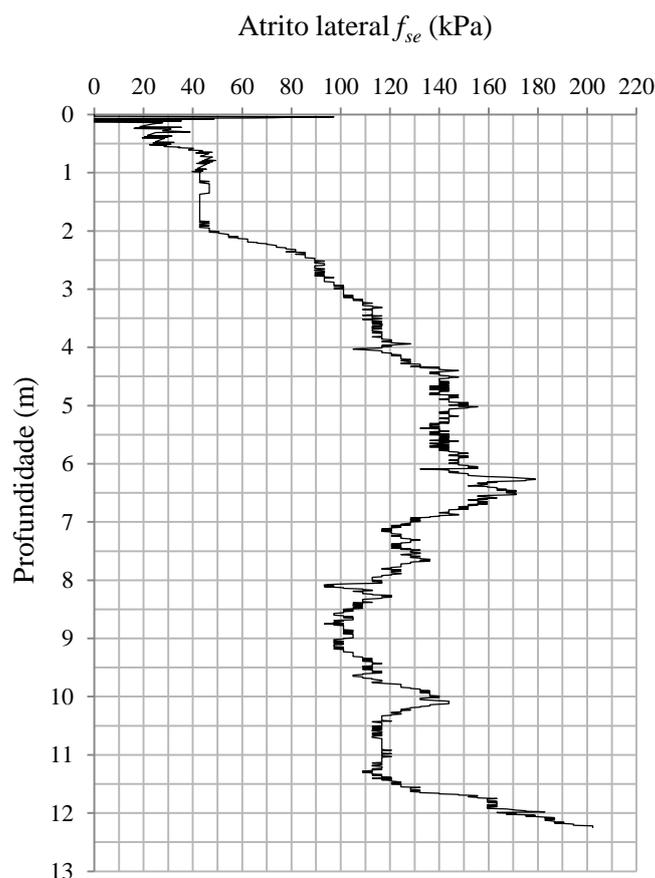


Figura 5.10 Atrito lateral unitário x Profundidade – *FDT-3-Int=1 cm*.

Tabela 5.7 – Resultados do ensaio *FDT-4*

<i>Prof.</i> (m)	p (kPa)	p_{corr} (kPa)	v_i (m/h)	n_i (rpm)	Q_{medida} (m ³ /s)	Q_{estim} (m ³ /s)	f_{se} (kPa)	f_{sem} (kPa)
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
0.25	1200	200	26	16	0.002694	0.002693	31	16
0.50	1500	500	21	17	0.002863	0.002861	39	23
0.75	2000	1000	22	16	0.002694	0.002693	52	30
1.00	2200	1200	22	16	0.002694	0.002693	47	34
1.25	2700	1700	20	15	0.002526	0.002524	66	39
1.50	3100	2100	24	15	0.002526	0.002524	82	45
1.75	3000	2000	22	15	0.002526	0.002524	78	49
2.00	3100	2100	21	15	0.002526	0.002524	82	53
2.25	3100	2100	23	15	0.002526	0.002524	82	56
2.50	3300	2300	22	15	0.002526	0.002524	89	59
2.75	3400	2400	17	15	0.002526	0.002524	93	62
3.00	3800	2800	16	15	0.002526	0.002524	109	65
3.25	4100	3100	25	14	0.002357	0.002356	121	69
3.50	3900	2900	22	14	0.002357	0.002356	113	72
3.75	3700	2700	22	14	0.002357	0.002356	105	74
4.00	3900	2900	22	15	0.002526	0.002524	113	77

Tabela 5.7 – Continuação

<i>Prof.</i> (<i>m</i>)	<i>p</i> (<i>kPa</i>)	<i>p_{corr}</i> (<i>kPa</i>)	<i>v_i</i> (<i>m/h</i>)	<i>n_i</i> (<i>rpm</i>)	<i>Q_{medida}</i> (<i>m³/s</i>)	<i>Q_{estim}</i> (<i>m³/s</i>)	<i>f_{se}</i> (<i>kPa</i>)	<i>f_{sem}</i> (<i>kPa</i>)
4.25	4000	3000	23	14	0.002357	0.002356	117	79
4.50	4200	3200	22	14	0.002357	0.002356	124	81
4.75	4000	3000	22	14	0.002357	0.002356	117	83
5.00	4100	3100	22	14	0.002357	0.002356	121	85
5.25	4300	3300	21	13	0.002189	0.002188	128	87
5.50	4400	3400	15	13	0.002189	0.002188	132	89
5.75	4500	3500	20	13	0.002189	0.002188	136	91
6.00	4400	3400	17	15	0.002526	0.002524	132	92
6.25	4800	3800	20	14	0.002357	0.002356	148	94
6.50	4500	3500	18	14	0.002357	0.002356	136	96
6.75	3900	2900	19	14	0.002357	0.002356	113	97
7.00	4000	3000	32	14	0.002357	0.002356	117	97
7.25	3800	2800	19	14	0.002357	0.002356	109	98
7.50	3800	2800	25	15	0.002526	0.002524	109	98
7.75	3800	2800	28	15	0.002526	0.002524	109	98
8.00	3400	2400	22	15	0.002526	0.002524	93	98
8.25	3600	2600	21	15	0.002526	0.002524	101	98
8.50	3800	2800	21	15	0.002526	0.002524	109	99
8.75	4000	3000	21	14	0.002357	0.002356	117	99
9.00	4300	3300	20	14	0.002357	0.002356	128	100
9.25	4300	3300	21	14	0.002357	0.002356	128	101
9.50	4200	3200	20	14	0.002357	0.002356	124	101
9.75	4100	3100	22	13	0.002189	0.002188	121	102
10.00	3800	2800	21	14	0.002357	0.002356	109	102
10.25	3800	2800	17	14	0.002357	0.002356	109	102
10.50	3700	2700	18	15	0.002526	0.002524	105	102
10.75	3800	2800	19	15	0.002526	0.002524	109	102
11.00	3600	2600	20	15	0.002526	0.002524	101	102
11.25	3700	2700	22	14	0.002357	0.002356	105	102
11.50	4800	3800	18	12	0.002021	0.002019	148	103
11.75	5100	4100	13	13	0.002189	0.002188	159	104
12.00	5200	4200	24	13	0.002189	0.002188	163	106
12.25	6100	5100	24	11	0.001852	0.001851	198	108

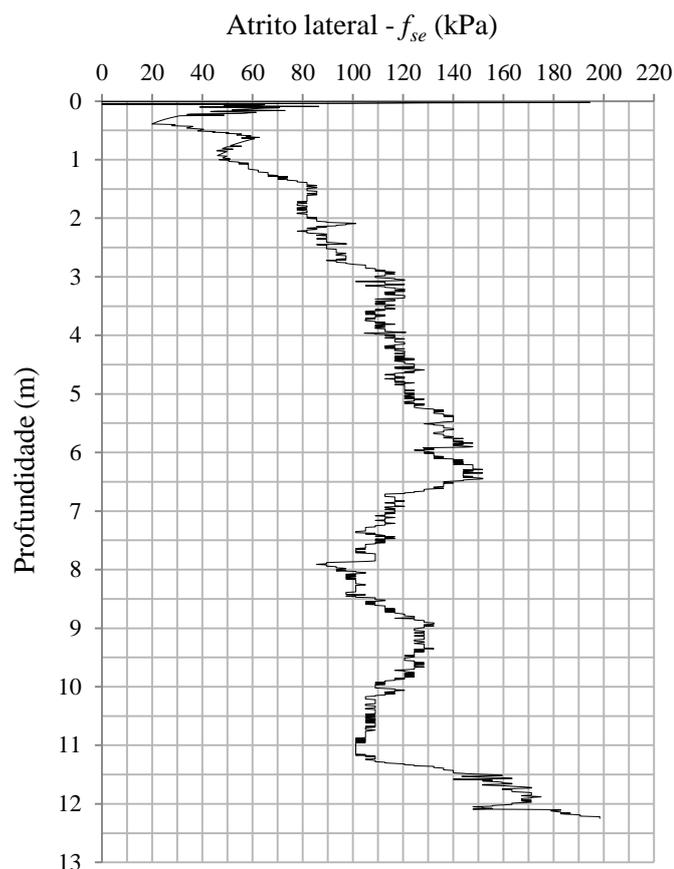


Figura 5.11 Atrito lateral unitário x Profundidade – *FDT-4-Int=1* cm

Tabela 5.8 – Resultados do ensaio *FDT-5*

<i>Prof.</i> (m)	<i>p</i> (kPa)	<i>Pcorr</i> (kPa)	<i>v_i</i> (m/h)	<i>n_i</i> (rpm)	<i>Q_{medida}</i> (m ³ /s)	<i>Q_{estim}</i> (m ³ /s)	<i>f_{se}</i> (kPa)	<i>f_{sem}</i> (kPa)
0.00	0	0	0	0	0.000000	0.000000	0	0
0.25	1200	200	19	17	0.002863	0.002861	31	16
0.50	1400	400	22	17	0.002863	0.002861	31	21
0.75	2200	1200	11	16	0.002694	0.002693	62	31
1.00	2400	1400	25	16	0.002694	0.002693	54	36
1.25	2400	1400	17	16	0.002694	0.002693	54	39
1.50	2500	1500	17	16	0.002694	0.002693	58	42
1.75	2900	1900	22	16	0.002694	0.002693	74	46
2.00	3000	2000	25	15	0.002526	0.002524	78	49
2.25	2900	1900	24	15	0.002526	0.002524	74	52
2.50	3100	2100	25	15	0.002526	0.002524	82	54
2.75	3000	2000	24	16	0.002694	0.002693	78	56
3.00	3300	2300	24	15	0.002526	0.002524	89	59
3.25	3600	2600	23	15	0.002526	0.002524	101	62
3.50	3900	2900	21	15	0.002526	0.002524	113	65
3.75	4700	3700	33	13	0.002189	0.002188	144	70
4.00	4600	3600	22	13	0.002189	0.002188	140	74

Tabela 5.8 – Continuação

<i>Prof.</i> (<i>m</i>)	<i>p</i> (<i>kPa</i>)	<i>Pcorr</i> (<i>kPa</i>)	<i>v_i</i> (<i>m/h</i>)	<i>n_i</i> (<i>rpm</i>)	<i>Q_{medida}</i> (<i>m³/s</i>)	<i>Q_{estim}</i> (<i>m³/s</i>)	<i>f_{se}</i> (<i>kPa</i>)	<i>f_{sem}</i> (<i>kPa</i>)
4.25	4900	3900	21	13	0.002189	0.002188	152	79
4.50	4900	3900	21	13	0.002189	0.002188	152	83
4.75	4600	3600	20	13	0.002189	0.002188	140	85
5.00	4600	3600	18	13	0.002189	0.002188	140	88
5.25	5000	4000	21	13	0.002189	0.002188	156	91
5.50	5200	4200	20	13	0.002189	0.002188	163	94
5.75	5500	4500	20	12	0.002021	0.002019	175	98
6.00	5100	4100	19	13	0.002189	0.002188	159	100
6.25	5100	4100	17	15	0.002526	0.002524	159	102
6.50	5000	4000	23	15	0.002526	0.002524	156	104
6.75	5700	4700	28	12	0.002021	0.002019	183	107
7.00	5300	4300	21	12	0.002021	0.002019	167	109
7.25	4400	3400	19	15	0.002526	0.002524	132	110
7.50	4400	3400	20	14	0.002357	0.002356	132	111
7.75	4200	3200	22	15	0.002526	0.002524	124	111
8.00	4100	3100	24	15	0.002526	0.002524	121	111
8.25	4000	3000	25	15	0.002526	0.002524	117	112
8.50	5100	4100	22	15	0.002526	0.002524	159	113
8.75	4500	3500	19	15	0.002526	0.002524	136	114
9.00	4300	3300	25	15	0.002526	0.002524	128	114
9.25	4400	3400	22	13	0.002189	0.002188	132	114
9.50	4200	3200	23	13	0.002189	0.002188	124	115
9.75	4400	3400	27	15	0.002526	0.002524	132	115
10.00	4100	3100	22	15	0.002526	0.002524	121	115
10.25	3800	2800	16	15	0.002526	0.002524	109	115
10.50	3900	2900	21	15	0.002526	0.002524	113	115
10.75	3900	2900	22	15	0.002526	0.002524	113	115
11.00	4600	3600	19	15	0.002526	0.002524	140	116
11.25	4400	3400	20	15	0.002526	0.002524	132	116
11.50	4800	3800	20	13	0.002189	0.002188	148	117
11.75	4700	3700	21	14	0.002357	0.002356	144	117
12.00	4800	3800	20	10	0.001684	0.001683	148	118
12.25	5000	4000	24	11	0.001852	0.001851	156	119
12.29	5300	4300	27	9	0.001515	0.001515	167	120

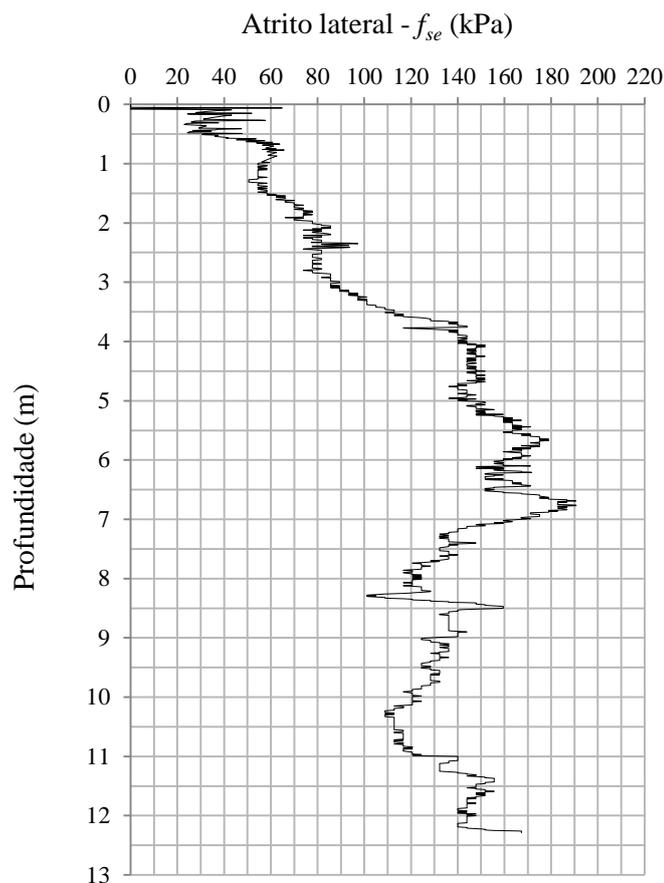


Figura 5.12 Atrito lateral unitário x Profundidade – *FDT-5-Int=1 cm*.

Tabela 5.9 – Resultados do Ensaio *FDT-6*

<i>Prof.</i> (m)	p (kPa)	P_{corr} (kPa)	v_i (m/h)	n_i (rpm)	Q_{medida} (m ³ /s)	Q_{estim} (m ³ /s)	f_{se} (kPa)	f_{sem} (kPa)
0.00	0	0	0	0	0.000000	0.000000	0	0
0.25	1800	800	24	18	0.003031	0.003029	124	62
0.50	2200	1200	16	18	0.003031	0.003029	93	73
0.75	2900	1900	25	19	0.003199	0.003197	99	79
1.00	2800	1800	20	19	0.003199	0.003197	70	77
1.25	2600	1600	18	19	0.003199	0.003197	62	75
1.50	2400	1400	19	18	0.003031	0.003029	54	72
1.75	2500	1500	22	19	0.003199	0.003197	58	70
2.00	2800	1800	19	19	0.003199	0.003197	70	70
2.25	3100	2100	20	18	0.003031	0.003029	82	71
2.50	3100	2100	19	18	0.003031	0.003029	82	72
2.75	3200	2200	22	18	0.003031	0.003029	86	73
3.00	2900	1900	23	18	0.003031	0.003029	74	73
3.25	2900	1900	18	18	0.003031	0.003029	74	73
3.50	2800	1800	23	18	0.003031	0.003029	70	73

Tabela 5.9 - Continuação

<i>Prof.</i> (<i>m</i>)	<i>p</i> (<i>bar</i>)	<i>P_{corr}</i> (<i>bar</i>)	<i>v_i</i> (<i>m/h</i>)	<i>n_i</i> (<i>rpm</i>)	<i>Q_{medida}</i> (<i>m³/s</i>)	<i>Q_{estim}</i> (<i>m³/s</i>)	<i>f_{se}</i> (<i>kPa</i>)	<i>f_{sem}</i> (<i>kPa</i>)
3.75	3400	2400	24	18	0.003031	0.003029	93	74
4.00	3500	2500	18	17	0.002863	0.002861	97	76
4.25	3900	2900	22	18	0.003031	0.003029	113	78
4.50	4300	3300	24	18	0.003031	0.003029	128	81
4.75	4600	3600	24	17	0.002863	0.002861	140	84
5.00	4600	3600	22	17	0.002863	0.002861	140	86
5.25	4800	3800	22	16	0.002694	0.002693	148	89
5.50	5000	4000	22	16	0.002694	0.002693	156	92
5.75	4700	3700	21	17	0.002863	0.002861	144	94
6.00	4500	3500	20	16	0.002694	0.002693	136	96
6.25	5000	4000	16	16	0.002694	0.002693	156	98
6.50	5600	4600	19	16	0.002694	0.002693	179	101
6.75	5000	4000	19	15	0.002526	0.002524	156	103
7.00	4100	3100	25	16	0.002694	0.002693	121	104
7.25	4100	3100	24	16	0.002694	0.002693	121	104
7.50	3600	2600	20	17	0.002863	0.002861	101	104
7.75	3800	2800	21	16	0.002694	0.002693	109	104
8.00	3800	2800	22	16	0.002694	0.002693	109	104
8.25	3900	2900	19	16	0.002694	0.002693	113	105
8.50	3800	2800	17	16	0.002694	0.002693	109	105
8.75	3900	2900	14	16	0.002694	0.002693	113	105
9.00	3900	2900	20	14	0.002357	0.002356	113	105
9.25	4100	3100	23	14	0.002357	0.002356	121	106
9.50	4100	3100	24	14	0.002357	0.002356	121	106
9.75	4300	3300	23	15	0.002526	0.002524	128	107
10.00	4300	3300	22	16	0.002694	0.002693	128	107
10.25	4300	3300	20	16	0.002694	0.002693	128	108
10.50	4500	3500	23	14	0.002357	0.002356	136	108
10.75	4500	3500	21	15	0.002526	0.002524	136	109
11.00	4300	3300	23	15	0.002526	0.002524	128	109
11.25	4600	3600	24	15	0.002526	0.002524	140	110
11.50	4800	3800	23	14	0.002357	0.002356	148	111
11.75	4800	3800	21	15	0.002526	0.002524	148	112
12.00	6500	5500	18	13	0.002189	0.002188	214	114
12.21	6400	5400	31	14	0.002357	0.002356	210	116

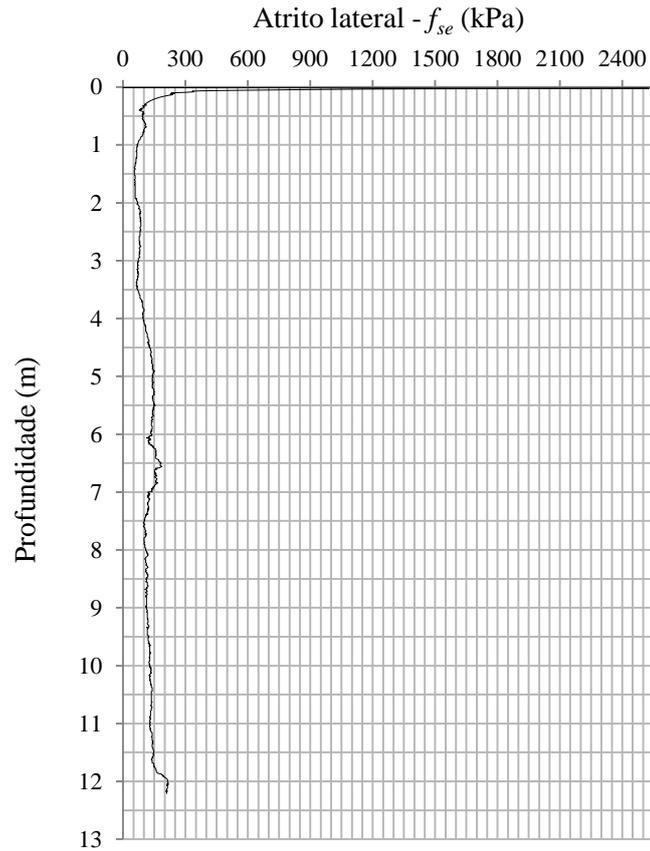


Figura 5.13 – Curva Atrito lateral – Profundidade – *FDT-6-Int=1* cm.
Com consideração dos valores máximos de atrito obtidos nos primeiros centímetros.

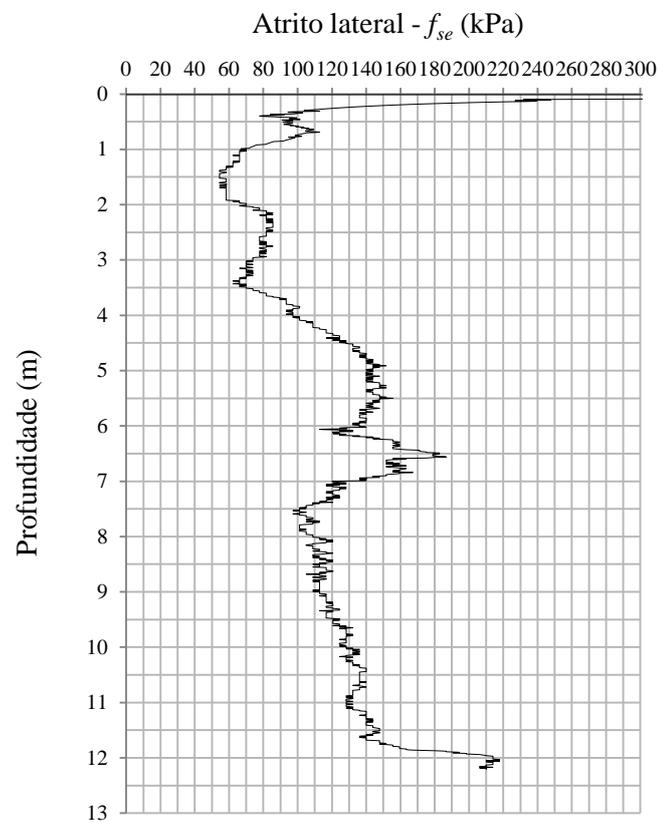


Figura 5.14 – Curva Atrito lateral – Profundidade – *FDT-6-Int=1* cm.
Sem consideração dos valores máximos de atrito obtidos nos primeiros centímetros.

A Tabela 5.10 apresenta resultados obtidos no ensaio *FDT-7* e a Figura 5.15 apresenta a curva Atrito lateral unitário *versus* Profundidade para o mesmo ensaio.

Tabela 5.10 – Resultados do ensaio *FDT-7*

<i>Prof. (m)</i>	<i>P(kPa)</i>	<i>Pcorr (kPa)</i>	<i>v_i (m/h)</i>	<i>n_i (rpm)</i>	<i>Q_{medida} (m³/s)</i>	<i>Q_{estim} (m³/s)</i>	<i>f_{se} (kPa)</i>	<i>f_{sem} (kPa)</i>
0.00	0	0	0	0	0.000000	0.000000	0	0
0.25	1400	500	22	17	0.002863	0.002861	78	39
0.50	1800	900	25	17	0.002863	0.002861	70	49
0.75	2500	1600	21	16	0.002694	0.002693	83	58
1.00	2500	1600	24	16	0.002694	0.002693	62	59
1.25	2500	1600	17	16	0.002694	0.002693	62	59
1.50	2500	1600	20	16	0.002694	0.002693	62	60
1.75	2500	1600	31	16	0.002694	0.002693	62	60
2.00	2500	1600	21	16	0.002694	0.002693	62	60
2.25	3100	2200	20	16	0.002694	0.002693	86	63
2.50	3000	2100	20	16	0.002694	0.002693	82	64
2.75	3100	2200	20	15	0.002526	0.002524	86	66
3.00	3200	2300	20	16	0.002694	0.002693	89	68
3.25	3300	2400	21	16	0.002694	0.002693	93	70
3.50	3500	2600	21	15	0.002526	0.002524	101	72
3.75	3700	2800	24	15	0.002526	0.002524	109	74
4.00	4100	3200	24	15	0.002526	0.002524	124	77
4.25	4300	3400	22	15	0.002526	0.002524	132	80
4.50	4400	3500	23	15	0.002526	0.002524	136	83
4.75	4600	3700	24	14	0.002357	0.002356	144	86
5.00	4600	3700	22	15	0.002526	0.002524	144	89
5.25	4500	3600	22	13	0.002189	0.002188	140	91
5.50	4200	3300	22	13	0.002189	0.002188	128	93
5.75	4100	3200	20	15	0.002526	0.002524	124	94
6.00	3600	2700	20	14	0.002357	0.002356	105	95
6.25	4200	3300	20	15	0.002526	0.002524	128	96
6.50	4100	3200	20	12	0.002021	0.002019	124	97
6.75	4200	3300	21	13	0.002189	0.002188	128	98
7.00	3900	3000	22	15	0.002526	0.002524	117	99
7.25	3800	2900	22	15	0.002526	0.002524	113	99
7.50	3700	2800	16	15	0.002526	0.002524	109	100
7.75	3300	2400	18	15	0.002526	0.002524	93	99
8.00	3100	2200	17	15	0.002526	0.002524	86	99
8.25	3500	2600	21	15	0.002526	0.002524	101	99
8.50	3600	2700	22	15	0.002526	0.002524	105	99

Tabela 5.10 – Continuação

<i>Prof. (m)</i>	<i>p(kPa)</i>	<i>P_{corr} (kPa)</i>	<i>v_i (m/h)</i>	<i>n_i (rpm)</i>	<i>Q_{medida} (m³/s)</i>	<i>Q_{estim} (m³/s)</i>	<i>f_{se} (kPa)</i>	<i>f_{sem} (kPa)</i>
8.75	3600	2700	22	14	0.002357	0.002356	105	99
9.00	3700	2800	22	13	0.002189	0.002188	109	100
9.25	3900	3000	21	13	0.002189	0.002188	117	100
9.50	4000	3100	22	14	0.002357	0.002356	121	101
9.75	4200	3300	22	14	0.002357	0.002356	128	101
10.00	3800	2900	4	14	0.002357	0.002356	113	102
10.25	4300	3400	20	14	0.002357	0.002356	132	102
10.50	4500	3600	21	14	0.002357	0.002356	140	103
10.75	4400	3500	20	13	0.002189	0.002188	136	104
11.00	4600	3700	28	14	0.002357	0.002356	144	105
11.25	4500	3600	20	14	0.002357	0.002356	140	106
11.50	4500	3600	21	13	0.002189	0.002188	140	106
11.75	4500	3600	21	13	0.002189	0.002188	140	107
12.00	4700	3800	20	13	0.002189	0.002188	148	108
12.25	5100	4200	21	14	0.002357	0.002356	163	109
12.50	4600	3700	20	13	0.002189	0.002188	144	110
12.75	4100	3200	23	14	0.002357	0.002356	124	110
13.00	4000	3100	26	15	0.002526	0.002524	121	110
13.25	4000	3100	21	15	0.002526	0.002524	121	110
13.50	3300	2400	18	15	0.002526	0.002524	93	110
13.75	3200	2300	23	15	0.002526	0.002524	89	110
14.00	3200	2300	25	15	0.002526	0.002524	89	109
14.25	3300	2400	23	14	0.002357	0.002356	93	109
14.50	3100	2200	20	15	0.002526	0.002524	86	109
14.75	3700	2800	18	13	0.002189	0.002188	109	109
15.00	4500	3600	16	13	0.002189	0.002188	140	109
15.25	5100	4200	20	14	0.002357	0.002356	163	110
15.50	4400	3500	20	13	0.002189	0.002188	136	110
15.75	4000	3100	19	13	0.002189	0.002188	121	111
16.00	3800	2900	24	15	0.002526	0.002524	113	111
16.25	3700	2800	20	15	0.002526	0.002524	109	111
16.50	3900	3000	20	13	0.002189	0.002188	117	111
16.75	3900	3000	18	14	0.002357	0.002356	117	111
17.00	4500	3600	19	14	0.002357	0.002356	140	111
17.25	5500	4600	19	13	0.002189	0.002188	179	112
17.50	5700	4800	17	13	0.002189	0.002188	187	113
17.75	5600	4700	24	13	0.002189	0.002188	183	114
18.00	6000	5100	21	12	0.002021	0.002019	198	115
18.09	5900	5000	24	13	0.002189	0.002188	194	116

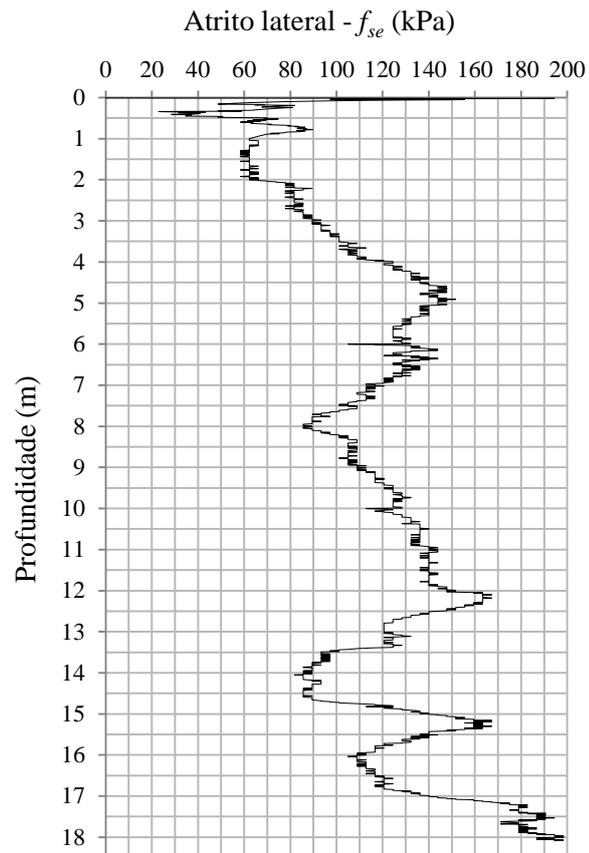


Figura 5.15 Curva Atrito lateral *versus* Profundidade. *FDT-7-Int=1 cm*.

A Figura 5.16 apresenta, lado a lado, as curvas Atrito lateral – Profundidade para os três intervalos de profundidades adotados, ou seja, 1cm, 25 cm e 100 cm.

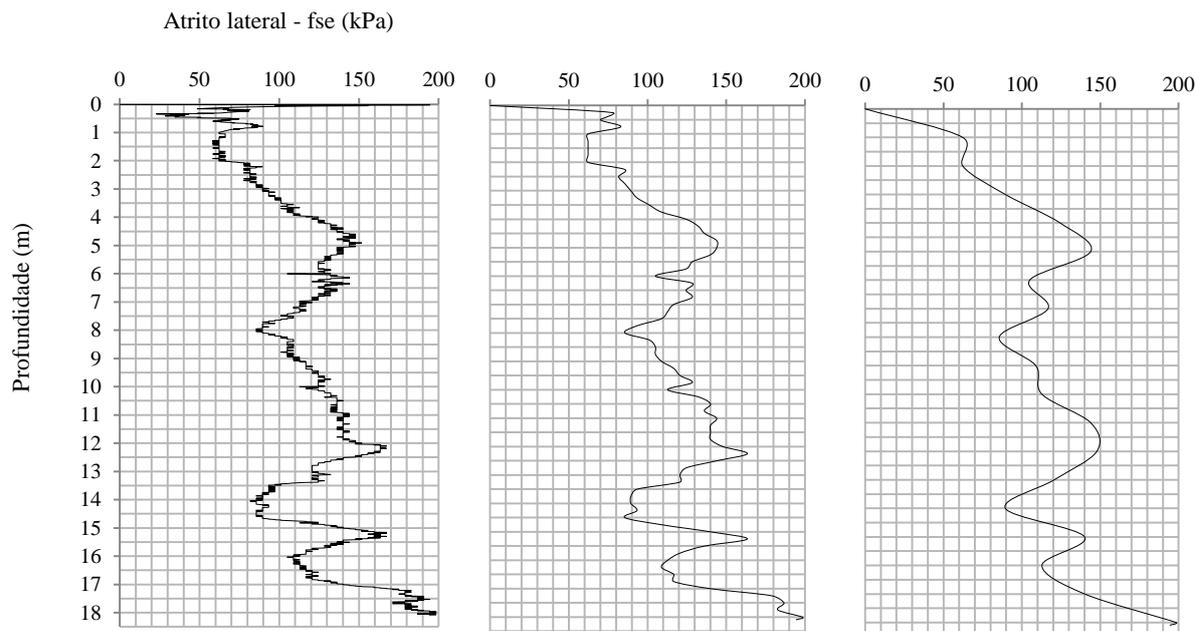


Figura 5.16 Curvas de Atrito lateral *versus* Prof. para intervalos de prof. de 1 cm 25 cm e 1 m.

É importante ressaltar que a variação do atrito lateral (f_{se}) ao longo da profundidade é função da variação da resistência que o solo oferece à rotação do instrumento, dentro do intervalo de registro de dados. Se, por exemplo, o registro de dados for feito a cada centímetro, a variação do valor de f_{se} será função da variação da resistência que o solo irá oferecer à rotação do instrumento dentro desse intervalo. Como o comprimento útil do instrumento é igual a 100 cm e a profundidade do ensaio para uma determinada posição de sua ponta é definida como sendo a distância, na vertical, da boca do furo de sondagem até a ponta do instrumento, para cada avanço de 1 cm a variação do valor de f_{se} estará intimamente ligada com a variação da resistência do solo nesse mesmo intervalo (1 cm).

A Tabela 5.11 apresenta resultados obtidos no ensaio *FDT-8* e a Figura 5.17 apresenta a curva Atrito lateral unitário *versus* Profundidade para o mesmo ensaio.

Tabela 5.11 – Resultados do ensaio *FDT-8*.

<i>Prof. (m)</i>	<i>P(kPa)</i>	<i>Pcorr (kPa)</i>	<i>v_i (m/h)</i>	<i>n_i (rpm)</i>	<i>Q_{medida} (m³/s)</i>	<i>Q_{estim} (m³/s)</i>	<i>f_{se} (kPa)</i>	<i>f_{sem} (kPa)</i>
0.00	0	0	0	0	0.000000	0.000000	0	0
0.25	1600	600	37	16	0.002694	0.002693	93	47
0.50	1900	900	42	16	0.002694	0.002693	70	54
0.75	2900	1900	38	13	0.002189	0.002188	99	65
1.00	3900	2900	43	13	0.002189	0.002188	113	75
1.25	3300	2300	34	15	0.002526	0.002524	89	77
1.50	3100	2100	41	14	0.002357	0.002356	82	78
1.75	3100	2100	42	13	0.002189	0.002188	82	78
2.00	3200	2200	42	13	0.002189	0.002188	86	79
2.25	3700	2700	41	13	0.002189	0.002188	105	82
2.50	3800	2800	43	14	0.002357	0.002356	109	84
2.75	3900	2900	50	12	0.002021	0.002019	113	87
3.00	4500	3500	44	10	0.001684	0.001683	136	90
3.25	5000	4000	44	8	0.001347	0.001346	156	95
3.50	5400	4400	43	7	0.001179	0.001178	171	100
3.75	5400	4400	42	9	0.001515	0.001515	171	105
4.00	5300	4300	42	8	0.001347	0.001346	167	108
4.25	5300	4300	39	8	0.001347	0.001346	167	112
4.50	5400	4400	38	9	0.001515	0.001515	171	115
4.75	5600	4600	45	8	0.001347	0.001346	179	118
5.00	6000	5000	40	8	0.001347	0.001346	194	122
5.25	6200	5200	44	6	0.001010	0.001010	202	125

Tabela 5.11 – Continuação

<i>Prof. (m)</i>	<i>p(kPa)</i>	<i>P_{corr} (kPa)</i>	<i>v_i (m/h)</i>	<i>n_i (rpm)</i>	<i>Q_{medida} (m³/s)</i>	<i>Q_{estim} (m³/s)</i>	<i>f_{se} (kPa)</i>	<i>f_{sem} (kPa)</i>
5.50	6100	5100	45	7	0.001179	0.001178	198	128
5.75	6000	5000	44	6	0.001010	0.001010	194	131
6.00	5500	4500	32	13	0.002189	0.002188	175	133
6.25	6000	5000	38	11	0.001852	0.001851	194	135
6.50	6500	5500	37	9	0.001515	0.001515	214	138
6.75	5600	4600	48	10	0.001684	0.001683	179	140
7.00	5600	4600	42	9	0.001515	0.001515	179	141
7.25	5100	4100	44	10	0.001684	0.001683	159	142
7.50	4100	3100	39	11	0.001852	0.001851	121	141
7.75	4300	3300	40	13	0.002189	0.002188	128	141
8.00	4600	3600	41	11	0.001852	0.001851	140	141
8.25	3800	2800	40	12	0.002021	0.002019	109	140
8.50	4000	3000	54	12	0.002021	0.002019	117	139
8.75	4300	3300	39	11	0.001852	0.001851	128	139
9.00	4800	3800	44	9	0.001515	0.001515	148	139
9.25	4900	3900	37	8	0.001347	0.001346	152	139
9.50	4800	3800	35	9	0.001515	0.001515	148	139
9.75	4700	3700	37	11	0.001852	0.001851	144	140
10.00	4600	3600	37	11	0.001852	0.001851	140	140
10.25	4600	3600	36	10	0.001684	0.001683	140	140
10.50	4600	3600	38	8	0.001347	0.001346	140	140
10.75	4300	3300	36	8	0.001347	0.001346	128	139
11.00	4400	3400	37	7	0.001179	0.001178	132	139
11.25	4300	3300	37	8	0.001347	0.001346	128	139
11.50	4500	3500	39	6	0.001010	0.001010	136	139
11.75	4300	3300	34	7	0.001179	0.001178	128	139
12.00	4300	3300	39	7	0.001179	0.001178	128	138
12.13	4200	3200	40	6	0.001010	0.001010	124	138

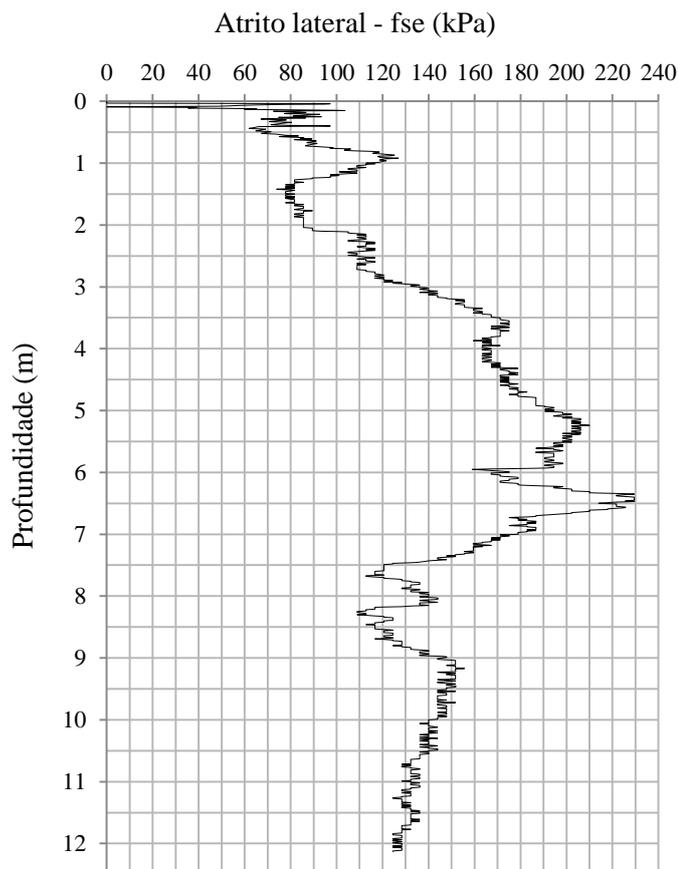


Figura 5.17 Curva Atrito lateral *versus* Profundidade para o ensaio *FDT-8* para intervalo de profundidade igual a 1 cm.

O ensaio *FDT-8* foi propositalmente realizado com velocidade de avanço de aproximadamente 40 m/h, ou seja, em torno de duas vezes a velocidade padronizada para esse ensaio de campo. A Figura 5.18 apresenta duas curvas de atrito lateral *versus* profundidade, sendo que uma corresponde à média dos atritos laterais médios obtidos para os ensaios *FDT-2*, *FDT-3*, *FDT-4*, *FDT-5* e *FDT-7*, e a outra representa o atrito lateral médio obtido para o ensaio *FDT-8*. A observação dessa Figura permite constatar o aumento que ocorre nos valores de atrito lateral para o ensaio realizado com maior velocidade de avanço.

Considerando a mesma profundidade, o volume de solo deslocado para cada ensaio foi praticamente o mesmo. No entanto, para o ensaio *FDT-8*, o tempo gasto para o deslocamento do solo foi praticamente a metade do tempo necessário para o mesmo deslocamento ocorrido nos outros ensaios. O aumento na velocidade de realização do ensaio implica no aumento das tensões normais às partes que formam o instrumento, o que resulta no aumento do atrito lateral unitário equivalente. Daí a necessidade de se padronizar a velocidade de avanço do instrumento.

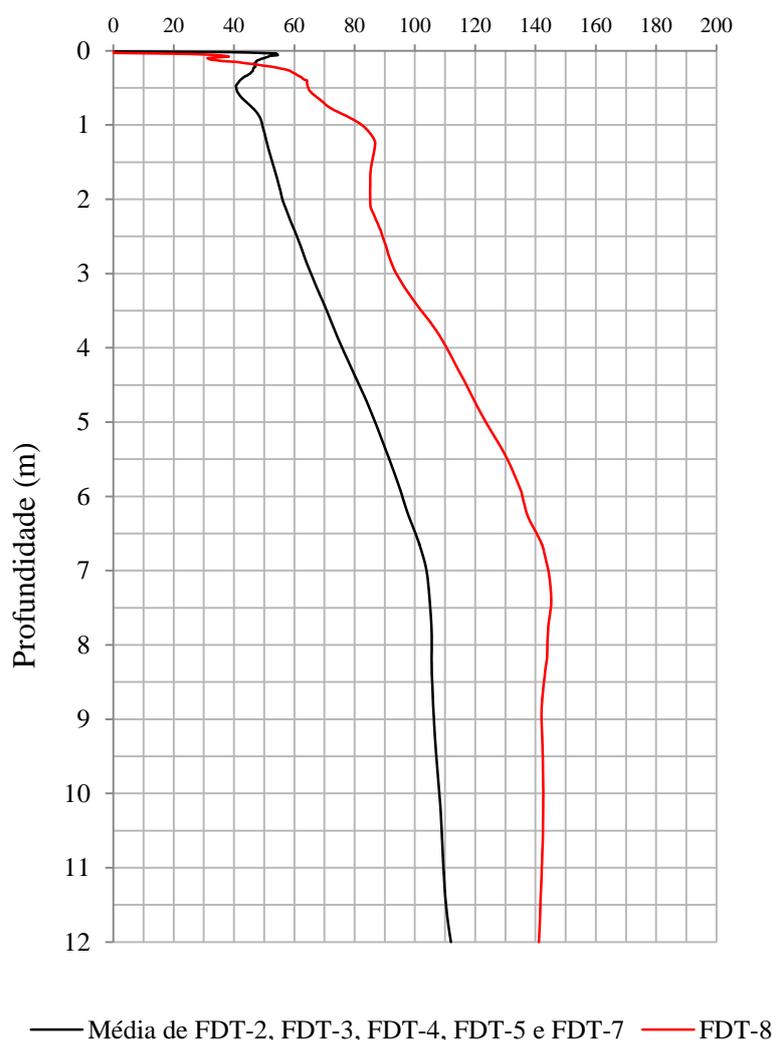


Figura 5.18 Curvas, Média do atrito lateral médio *versus* Profundidade para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*, excluindo-se o ensaio *FDT-6*, e Atrito lateral médio *versus* Profundidade para o ensaio *FDT-8*.

Para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*, cada valor médio de atrito lateral médio foi obtido desconsiderando-se o ensaio *FDT-6*, pelo fato do solo ter apresentado nesse ensaio, uma camada de solo compactado mecanicamente, além da presença de entulhos de tijolos de barro, o que implicou na obtenção de valores muito elevados de atrito lateral (f_{se}).

A Figura 5.19 apresenta as curvas de Atrito lateral *versus* Profundidade para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*, com intervalo de registro de dados igual a 1 cm. No ensaio *FDT-6* foram obtidos valores muito elevados de f_{se} , até a profundidade de aproximadamente 1,30 m, devido à presença de solo muito compactado com entulhos. Para propiciar boa aparência ao gráfico, os valores de f_{se} foram limitados em 300 kPa.

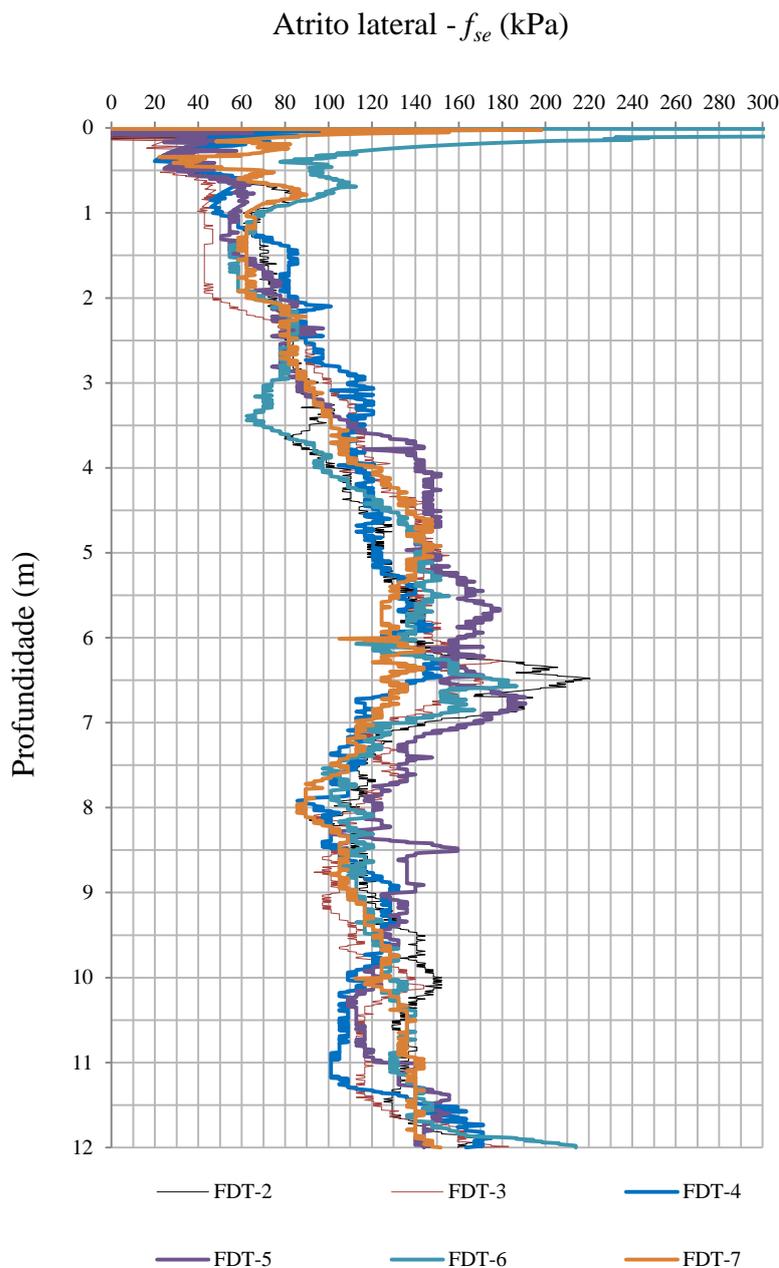


Figura 5.19 Curvas de Atrito lateral *versus* Profundidade para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*

A Figura 5.20 apresenta as curvas de Atrito lateral *versus* Profundidade para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7* com intervalo de registro de dados igual a 1 m. Comparando a Figura 5.19 com a Figura 5.20 observa-se a perda de informações que ocorre quando o registro de dados é feito de metro em metro.

Os ensaios *FDT* apresentaram menor variabilidade quando comparados com os ensaios *SPT* e de Cone Elétrico. Há, no entanto, que se considerar que os ensaios *FDT* foram executados muito próximos uns dos outros.

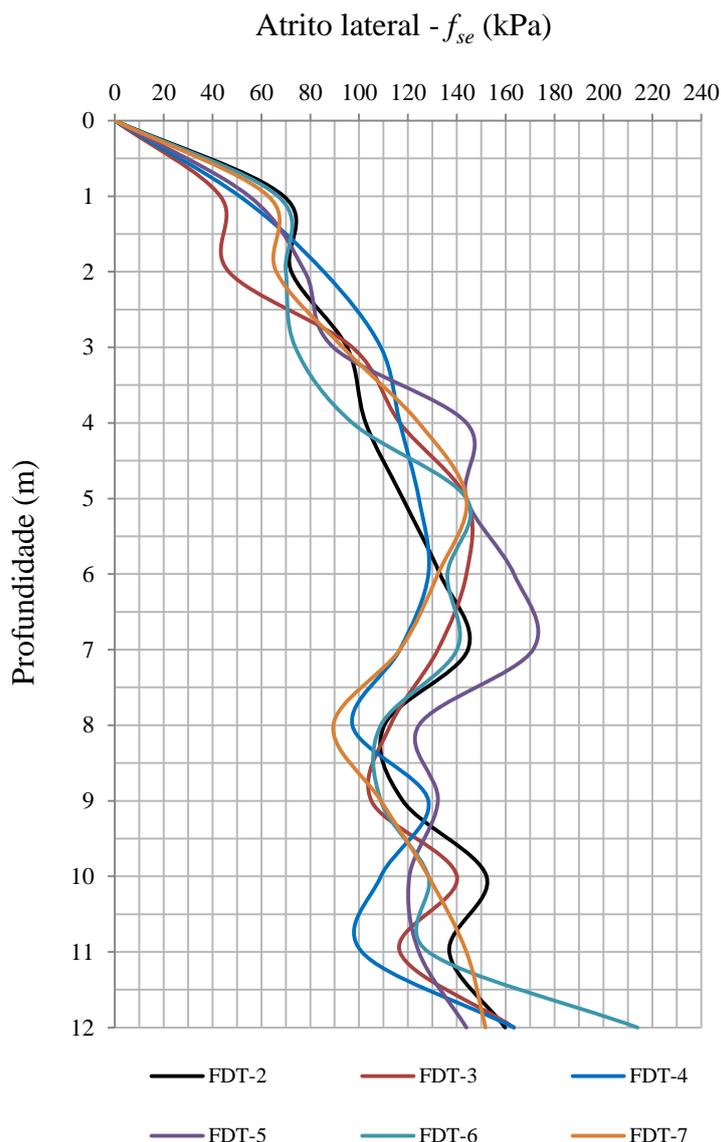


Figura 5.20 Curva de Atrito lateral *versus* Profundidade para os ensaios *FDT-1* a *FDT-7* com intervalo de aquisição de dados igual a 1m.

A Tabela 5.12 apresenta os coeficientes de variação para três faixas de profundidades.

A análise dos resultados permitiu concluir o que se segue.

A campanha de ensaios *FDT*, sem a consideração do ensaio *FDT-6*, apresentou menor variabilidade que os outros dois ensaios (*CPT* e *SPT*).

Para a camada de 0 a 5 m, a campanha de ensaios *FDT* com a consideração do ensaio *FDT-6*, apresentou maior variabilidade que o mesmo tipo de ensaio, quando não foi considerado o ensaio *FDT-6*. Esse fato ocorreu porque no primeiro metro do ensaio *FDT-6* os resultados de f_{se} foram muito elevados devido à camada de solo muito compactado e com presença de entulhos.

O elevado valor do coeficiente de variação obtido no ensaio de Cone Elétrico também pode ser explicado pela presença de solos compactados em alguns pontos.

Tabela 5.12 – Coeficientes de variação para os diversos ensaios.

Faixa de profundidade (m)	Coeficiente de variação (%)			
	<i>SPT</i>	Cone Elétrico	<i>FDT-2</i> a <i>FDT-7</i>	<i>FDT-2</i> a <i>FDT-7</i> – exceto <i>FDT-6</i>
0 a 5	17,1	47,6	7,9	4,9
0 a 11	8,4	18,6	4,5	4,5
0 a 12	10,4	17,8	4,3	4,2

O valor do coeficiente de variação igual a 17,1 % obtido nos ensaios *SPT*, para a camada de 0 a 5 m, deve-se, provavelmente, ao fato de que esse tipo de ensaio não apresenta boa precisão para valores baixos de N_{spt} . Portanto, nos primeiros metros, com N_{spt} na faixa de 1 a 4, não faz sentido o cálculo do coeficiente de variação.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE ATRITO LATERAL E DEMANDA DE ENERGIA, OBTIDOS ATRAVÉS DE ENSAIOS *FDT*.

O trabalho realizado, por rotação, para que o instrumento dê uma volta pode ser expresso por:

$$W_{1v} = f_{sem} \cdot A_l \cdot d_{1v} \quad (5.1)$$

em que:

W_{1v} = Trabalho realizado para uma volta do instrumento (kJ);

f_{sem} = Atrito lateral equivalente médio para o trecho considerado (kPa);

A_l = Área lateral do instrumento (m²);

d_{1v} = deslocamento circular no plano horizontal, para uma volta do instrumento(m).

Desenvolvendo a expressão (5.1) tem-se:

$$W_{1v} = f_{se} \cdot (\pi \cdot d_i \cdot l_i) \cdot (\pi \cdot d_i) \quad (5.2)$$

em que d_i e l_i são, o diâmetro e o comprimento útil do instrumento, respectivamente.

Se, n_i é a velocidade de rotação do instrumento em rpm, L_e é o comprimento da perfuração em metros e v_i é a velocidade de penetração do instrumento em m/h , o tempo para execução da perfuração, em segundos, pode ser expresso por:

$$t_{exec} = L_e \cdot \frac{3600}{v_i} \quad (5.3)$$

E o número de voltas para a execução da perfuração será dada por:

$$n_v = t_{exec} \cdot \frac{n_i}{60} \quad (5.4a)$$

$$n_v = L_e \cdot \frac{3600}{v_i} \cdot \frac{n_i}{60} = L_e \cdot 60 \cdot \frac{n_i}{v_i} \quad (5.4b)$$

O trabalho realizado devido à rotação do instrumento, para a execução da perfuração, pode ser expresso por:

$$W_{perf} = 60 \cdot f_{sem} \cdot \pi^2 \cdot d_i^2 \cdot l_i \cdot L_e \cdot \frac{n_i}{v_i} \quad (5.5)$$

A demanda de energia, para uma posição qualquer da ponta do instrumento, pode ser facilmente obtida, já que: o comprimento do instrumento é fixo e conhecido, o comprimento perfurado (L_e), a velocidade de perfuração (v_i) e a velocidade de rotação (n_i) são registrados pelo sistema de monitoramento eletrônico da perfuratriz e o atrito lateral unitário (f_{se}) é obtido com da expressão (4.48).

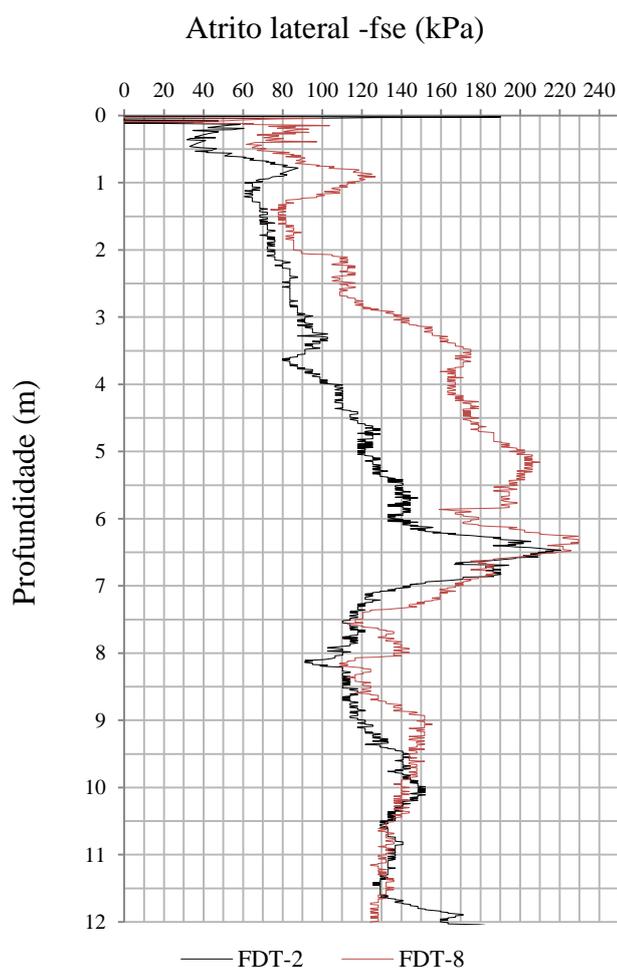
A seguir faz-se uma comparação entre os resultados obtidos para o atrito lateral (f_{se}) e a energia (W_{perf}) nos ensaios realizados.

Os ensaios *FDT-2* a *FDT-7* foram feitos com velocidade média de avanço do instrumento em torno de 20 m/h e o ensaio *FDT-8* foi realizado com velocidade média de perfuração em torno de 40 m/h. A Tabela 5.13 apresenta os valores médios de, atrito lateral (f_{sem}), velocidade de perfuração (v_{im}), rotação do instrumento (n_{im}); e energia necessária para perfuração (W_{perf}), para três intervalos de aquisição de dados, ou seja, 0,01 m, 0,25 m e 1,00 m.

A Figura 5.21 apresenta duas curvas de f_{se} versus profundidade e a Figura 5.22 apresenta duas curvas de energia versus profundidade. Para cada figura, uma das curvas refere-se ao ensaio *FDT-2* e a outra representa o ensaio *FDT-8*. A profundidade de perfuração considerada foi de 12 m.

Tabela 5.13 – Valores de f_{sem} , v_i , n_i e W_{perf} para ensaios com 12 m de profundidade.

Item	un.	Intervalo de							
		registro dos dados (m)	FDT-2	FDT-3	FDT-4	FDT-5	FDT-6	FDT-7	FDT-8
f_{sem}	kPa	0,01	115	109	109	120	121	110	141
		0,25	116	110	108	120	116	110	141
		1,00	118	114	110	124	117	109	145
v_{im}	m/h	0,01	20	21	21	21	21	21	41
		0,25	20	21	21	22	21	21	40
		1,00	19	20	22	22	21	20	40
n_{im}	rpm	0,01	14	14	14	14	17	15	10
		0,25	14	14	14	14	17	15	10
		1,00	14	14	15	14	16	15	10
W_{perf}	MJ	0,01	12,8	11,6	11,7	12,7	13,8	11,9	5,3
		0,25	13,3	12,6	11,9	12,6	14,0	12,8	5,3
		1,00	15,0	16,5	12,1	12,6	14,3	15,9	5,7

Figura 5.21 Curvas de atrito lateral unitário equivalente *versus* profundidade.

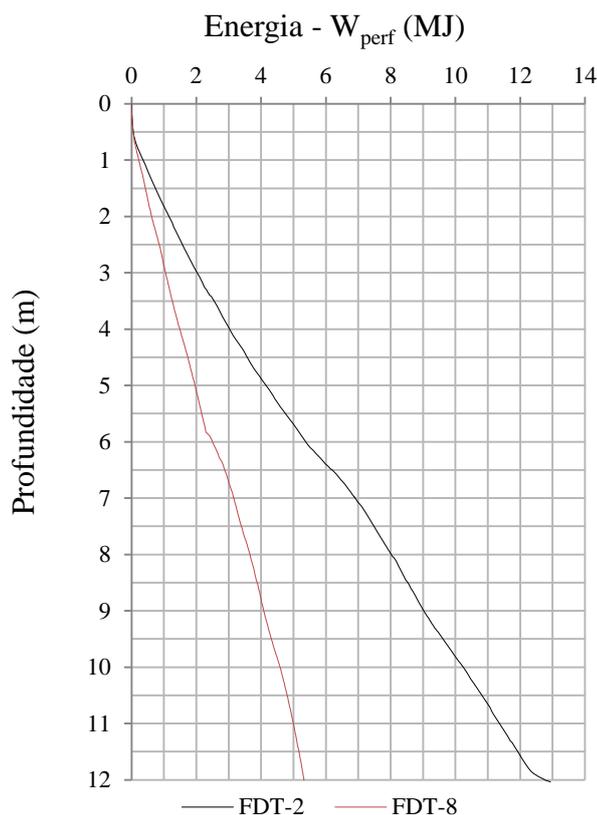


Figura 5.22 Curvas de demanda de energia *versus* profundidade.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 5.14 e nas Figuras 5.21 e 5.22 permite concluir o seguinte:

- Para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*, cuja velocidade de perfuração foi padronizada em 20 m/h, os valores de f_{sem} apresentaram-se bastante concordantes;
- Para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*, os valores de demandas de energia apresentaram-se maiores para os intervalos de registro de dados igual a 1,00 m;
- Para o ensaio *FDT-8*, cuja velocidade de perfuração foi padronizada em 40 m/h, o valor de f_{sem} foi 24% maior que o valor médio obtido para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*, indicando que o aumento da velocidade de avanço do instrumento interfere no sentido de aumentar os valores de f_{se} . Isso ocorre porque o aumento da velocidade de perfuração implica no aumento das tensões radiais atuantes no instrumento;
- Para o ensaio *FDT-8* o valor da demanda de energia (W_{perf}) apresentou-se praticamente igual à metade (46%) do valor médio obtido para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*;

- A execução do ensaio com condições não controladas implica em resultados menos discrepantes quando se trabalha com valores de f_{sem} em vez de W_{perf} ;
- A execução do ensaio com condições controladas (SILVA, 2011), é fundamental para a obtenção de resultados consistentes;

5.5 AJUSTES COM PROVAS DE CARGAS ESTÁTICAS

ALBUQUERQUE (2001) executou, no Campo Experimental de Fundações da FEAGRI – UNICAMP, provas de carga estáticas instrumentadas em nove estacas, sendo 3 estacas escavadas com trado mecânico com diâmetro de 45 cm, três estacas hélice contínua com diâmetro de 40 cm e três estacas ômega com diâmetro de 39 cm. Todas as estacas foram executadas com comprimento de 12 m, sendo instrumentadas nos níveis 5 m; 11,10 m, 11,70 m e 12,00 m.

Com base, nos resultados de resistência por atrito lateral das provas de carga e nos valores de atrito lateral médio (f_{se}) obtidos nos ensaios *FDT*, foram feitos ajustes através de planilhas EXCEL para se determinar o fator G_2 da expressão (4.42), de sorte que fosse satisfeita a expressão abaixo.

$$\frac{P_{lprev}}{P_{lmed}} = 1 \quad (6.1)$$

em que:

P_{lprev} – Resistência prevista por atrito lateral da estaca;

P_{lmed} – Resistência medida por atrito lateral da estaca.

A Tabela 5.14 apresenta os valores das resistências, por atrito lateral, previstas pelo autor da presente tese e os valores calculados com base nas medidas feitas por ALBUQUERQUE (2001).

Tabela 5.14 – Valores de resistência das estacas por atrito lateral para a profundidade de 11,70 m (kN).

Tipo	<i>FDT-2</i>	<i>FDT-3</i>	<i>FDT-4</i>	<i>FDT-5</i>	<i>FDT-6</i>	<i>FDT-7</i>	Média	Desv. padrão	Coef. de var.(%)	Albuquerque (2001)
Escavada	651	615	615	682	663	625	642	28	4.33	642
Hél. Cont.	809	764	764	848	824	777	798	35	4.36	797
Ômega	1205	1137	1137	1262	1226	1156	1187	52	4.37	1183

A Tabela 5.15 apresenta os valores de G_2 ajustados para o Campo Experimental de Fundações da FEAGRI – UNICAMP.

Tabela 5.15 – Valores do fator G_2 .

Tipo de estaca	G_2
Escavada	2.88
Hélice Contínua	2.06
Ômega	1.35

Com base nos valores de G_2 e nas resistências por atrito lateral obtidas nos ensaios *FDT* foram feitas previsões de capacidade de carga por atrito lateral para as profundidades até os diversos níveis instrumentados por Albuquerque (2001).

As Tabelas 5.16 a 6.16 apresentam os valores das resistências, por atrito lateral, previstas pelo autor da presente tese e daquelas calculadas a partir das medidas feitas por Albuquerque (2001).

Tabela 5.16 – Valores de resistências por atrito lateral, previstas e medidas, entre 0 m e 5,00 m (kN)

Tipo	<i>FDT-2</i>	<i>FDT-3</i>	<i>FDT-4</i>	<i>FDT-5</i>	<i>FDT-6</i>	<i>FDT-7</i>	Média	Desv. Padrão	Coef. de Var.(%)	Albuquerque (2001)
Escavada	205	200	220	219	235	223	217	13	5.85	196
Hélice Contínua	255	248	274	273	291	277	270	16	5.80	420
Ômega	380	369	408	406	434	412	402	23	5.84	408

Tabela 5.17 – Valores de resistências por atrito lateral, previstas e medidas, entre 0 m e 11,10 m (kN)

Tipo	<i>FDT-2</i>	<i>FDT-3</i>	<i>FDT-4</i>	<i>FDT-5</i>	<i>FDT-6</i>	<i>FDT-7</i>	Média	Desv. Padrão	Coef. de Var.(%)	Albuquerque (2001)
Escavada	612	579	576	640	621	584	602	26	4.35	590
Hél. Cont.	761	719	716	795	772	726	748	33	4.35	754
Ômega	1133	1070	1065	1183	1149	1080	1113	49	4.37	1094

Tabela 5.18 – Valores de resistências por atrito lateral, previstas e medidas, entre 0 m e 12,00 m (kN)

Tipo	<i>FDT-2</i>	<i>FDT-3</i>	<i>FDT-4</i>	<i>FDT-5</i>	<i>FDT-6</i>	<i>FDT-7</i>	Média	Desv. Padrão	Coef. de Var.(%)	Albuquerque (2001)
Escavada	674	639	639	704	689	646	665	28	4.19	668
Hél. Cont.	838	794	794	874	856	803	827	34	4.16	820
Ômega	1247	1181	1181	1301	1274	1195	1230	52	4.19	1376

A Tabela 5.19 apresenta relações entre as resistências por atrito lateral, previstas e medidas.

Tabela 5.19 – Relações entre resistências previstas e medidas

Nível da instrumentação (m)	P_{lprev}/P_{lmed}		
	Escavada	Hélice Cont.	Ômega
5,00	1,11	0,64	0,98
11,10	1,02	0,99	1,02
11,70	1,00	1,00	1,00
12,00	1,00	1,01	0,89

Na tabela 5.19 observa-se que para o nível da instrumentação a 5,00 m, a relação entre as resistências prevista e medida, para a estaca hélice contínua, resultou em 0,64, e, portanto um valor discrepante. No entanto, segundo relato de ALBUQUERQUE (2001) ocorreu um significativo aumento dos diâmetros, da estaca hélice contínua exumada, no trecho de 0 a 5 m, o que resultou no aumento da resistência por atrito lateral. Como no cálculo de previsão de capacidade de carga foi considerado o diâmetro da estaca igual a 40 cm, a relação entre a resistência prevista e a medida ficou prejudicada para esse caso.

5.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO: SPT, FDT E PROVA DE CARGA ESTÁTICA REALIZADOS NO SÍTIO IGREJA DO EVANGELHO QUADRANGULAR.

Nesse site foram realizadas 5 sondagens *SPT*, 5 ensaios *FDT* e uma prova de carga estática do tipo rápida em estaca hélice segmentada monitorada com diâmetro nominal de 35 cm e comprimento de 14,08 m, para carga de trabalho de 500 kN.

A Figura 5.23 apresenta o perfil individual da sondagem *SPT-2*, ao lado da prova de carga estática realizada. A Figura 5.24 apresenta uma imagem do arranjo utilizado na prova de carga. A Figura 5.25 apresenta a curva carga – recalque da estaca ensaiada. A Figura 5.26 apresenta os resultados dos ensaios *FDT-1* a *FDT-5*, para intervalo de registro de dados de 0.01m, considerando como profundidade zero a cota da boca de cada furo de sondagem. A Figura 5.27 apresenta os resultados dos ensaios *FDT-1* a *FDT-5* para intervalo de registro de dados de 0.01m, considerando a cota 98.38 m como início da contagem de profundidade (prof. = 0), que corresponde à cota da boca do furo do ensaio *FDT-1* e do furo *SPT- 01*. Portanto, nesse caso, para os ensaios *FDT-2*, *FDT-3*, *FDT-4* e *FDT-5*, só foram plotados os valores de atrito (f_{se}) abaixo da cota 98.38. Para os dois casos (Figura 5.26 e Figura 5.27), a diferença entre os coeficientes de variação médios foi de aproximadamente 3%. Foram desconsiderados os valores de f_{se} maiores que 600 kPa.

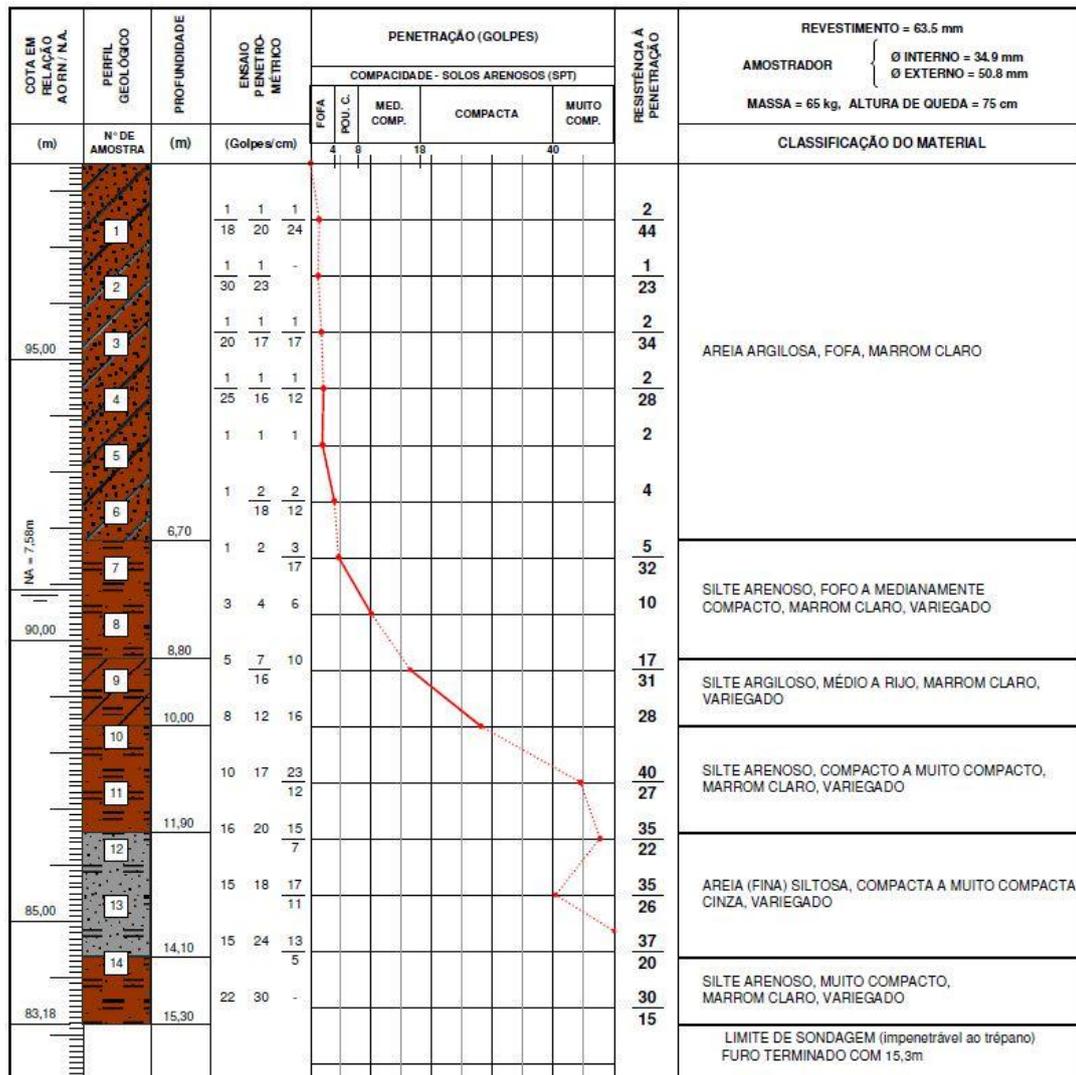


Figura 5.23 Perfil individual da sondagem SPT-02 realizada na IEQ-Araras-SP.



Figura 5.24 – Vista do arranjo da prova de carga realizada na IEQ-Araras-SP.

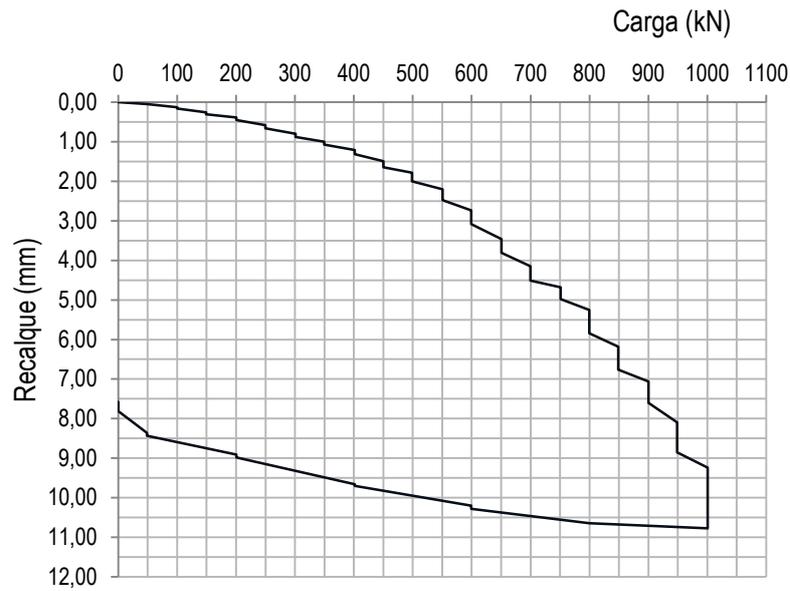


Figura 5.25 Curva carga-recalque da estaca hélice segmentada com diâmetro nominal de 35 cm e comprimento de 14,08 m.

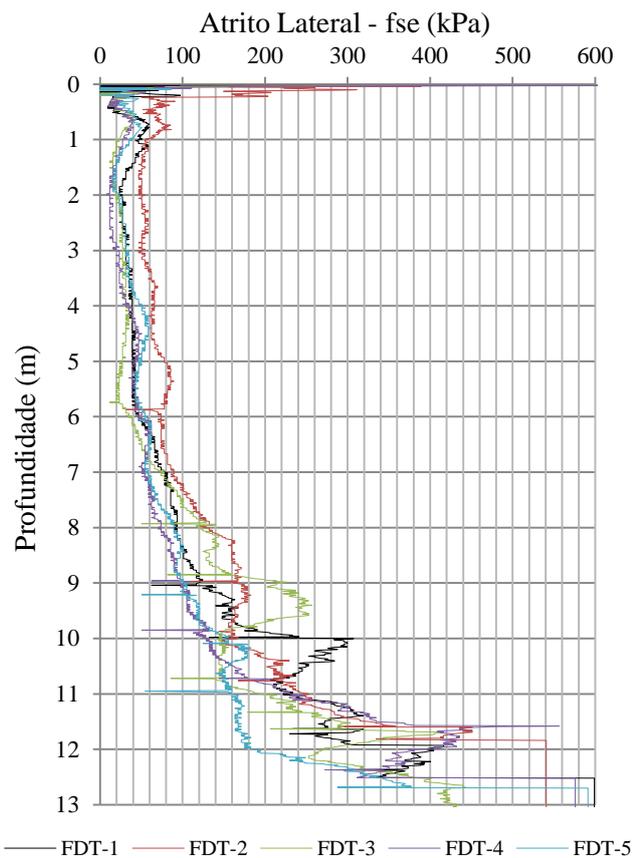


Figura 5.26 Curva de Atrito lateral *versus* Profundidade para os ensaios *FDT-1* a *FDT-5* com intervalo de aquisição de dados igual a 1 cm e profundidades contadas a partir da cota da boca de cada furo de investigação.

A Tabela 5.20 apresenta os valores mínimos, máximos e médios dos coeficientes de variação obtidos para os ensaios *SPT* e *FDT*, executados lado a lado.

Tabela 5.20 – Coeficientes de variação obtidos nos ensaios *SPT* e *FDT*.

Condição	Ensaio					
	<i>SPT</i>			<i>FDT</i>		
	Min.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	Média
Furos 1 a 5	12	149	41	12	68	32
Furos 1 e 2	0	141	30	0	67	25
Furos 4 e 5	0	141	46	0	86	18

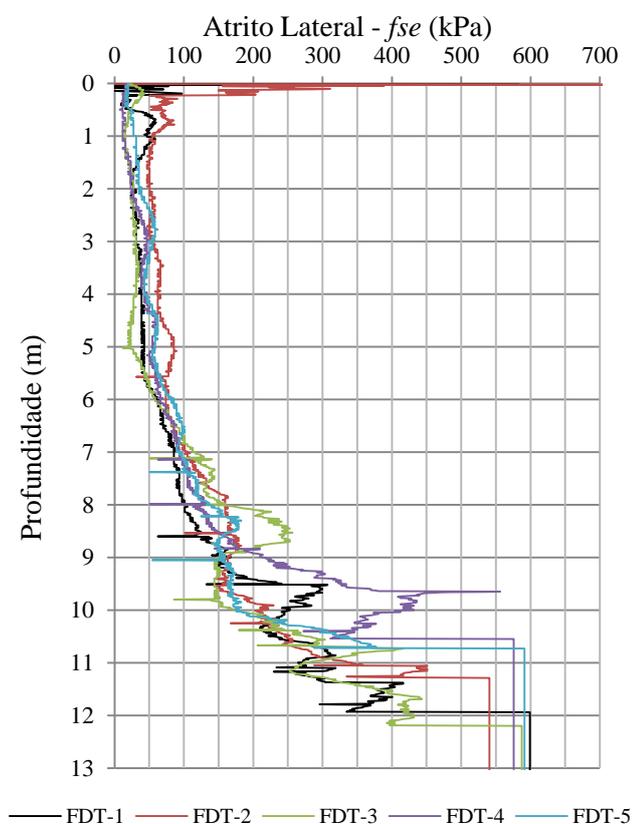


Figura 5.27 Curva de Atrito lateral *versus* Profundidade para os ensaios *FDT-1* a *FDT-5* com intervalo de registro de dados igual a 1 cm e profundidades contadas a partir da cota 98.38 m.

A Figura 5.28 apresenta a curva de atrito lateral *versus* profundidade para os ensaios *FDT-1* e *FDT-2*, sendo que as bocas dos furos destes ensaios estão na cota 98.38 m.

A Figura 5.29 apresenta a curva de atrito lateral *versus* profundidade para os ensaios *FDT-4* e *FDT-5*, sendo que as bocas dos furos destes ensaios estão na cota 99.77 m.

A análise da Tabela 5.20 permite constatar que a campanha de ensaios *FDT* realizada no sítio Igreja do Evangelho Quadrangular, apresentou menor variabilidade que a campanha de

ensaios *SPT*, e que para as duas campanhas a variabilidade foi menor quando se comparou dois ensaios executados próximos um do outro.

Embora o objetivo da presente tese não seja estudar a capacidade de carga do sistema estaca-solo, para o sítio da IEQ foi feito um estudo de previsão de capacidade de carga adotando-se o fator G_2 igual a 2.06, que foi obtido a partir dos ajustes feitos para as estacas do tipo hélice contínua ensaiadas por ALBUQUERQUE (2001).

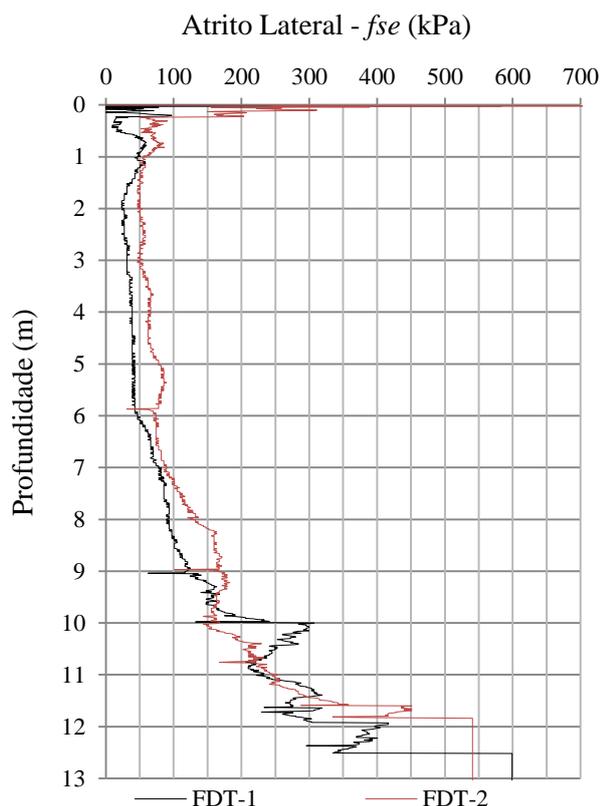


Figura 5.28 Curva de Atrito lateral versus Profundidade para os ensaios *FDT-1* e *FDT-2*.

A Figura 5.30 mostra a curva de previsão de capacidade de carga por atrito lateral em função da profundidade, obtida a partir dos resultados do ensaio *FDT-2* executado ao lado do furo de sondagem *SPT-02* e ao lado da prova de carga estática. Essa previsão foi feita limitando os valores de f_{se} a um máximo de 400 kPa, que com base nas relações f_{se}/N_{spt} obtidas, correspondem a valores de N_{spt} maiores que 40. A Figura 5.31 mostra a curva de previsão de capacidade de carga por atrito lateral em função da profundidade, obtida a partir dos resultados do ensaio *FDT-1* executado ao lado do furo de sondagem *SPT-01* e a aproximadamente 10 m da prova de carga estática. A Figura 5.31 apresenta a reta 1 da curva Carga versus Deslocamento/Carga ($P - \delta/P$), e a curva de tendência linear cujo coeficiente angular corresponde à carga por atrito lateral segundo CHIN & VAIL (1973) e a Figura 5.32

apresenta a reta 2 da mesma curva, e a curva de tendência linear cujo coeficiente angular corresponde à carga de ruptura, segundo os mesmos autores.

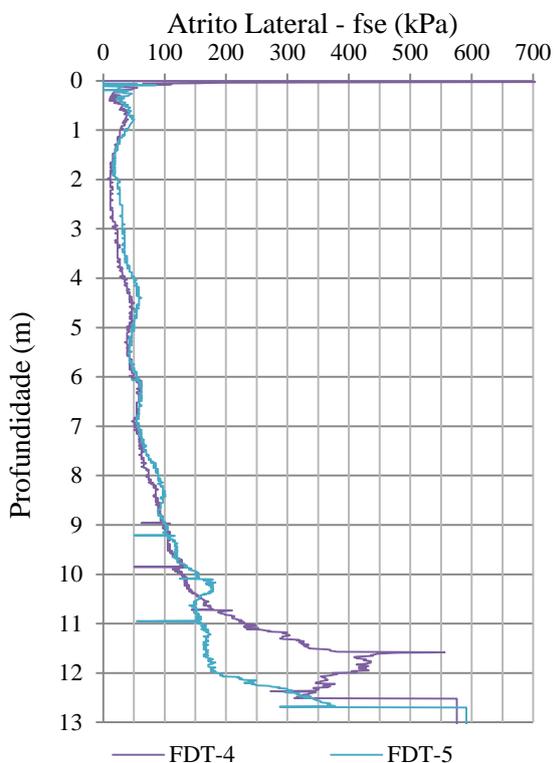


Figura 5.29 Curva de Atrito lateral *versus* Profundidade para os ensaios *FDT-4* e *FDT-5*.

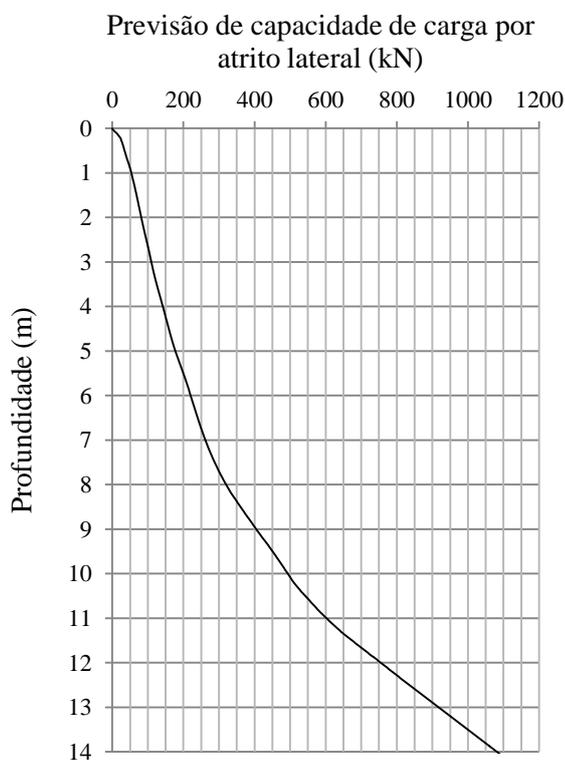


Figura 5.30 Previsão de capacidade de carga com base nos resultados do ensaio *FDT-2* executado ao lado da estaca hélice segmentada ensaiada.

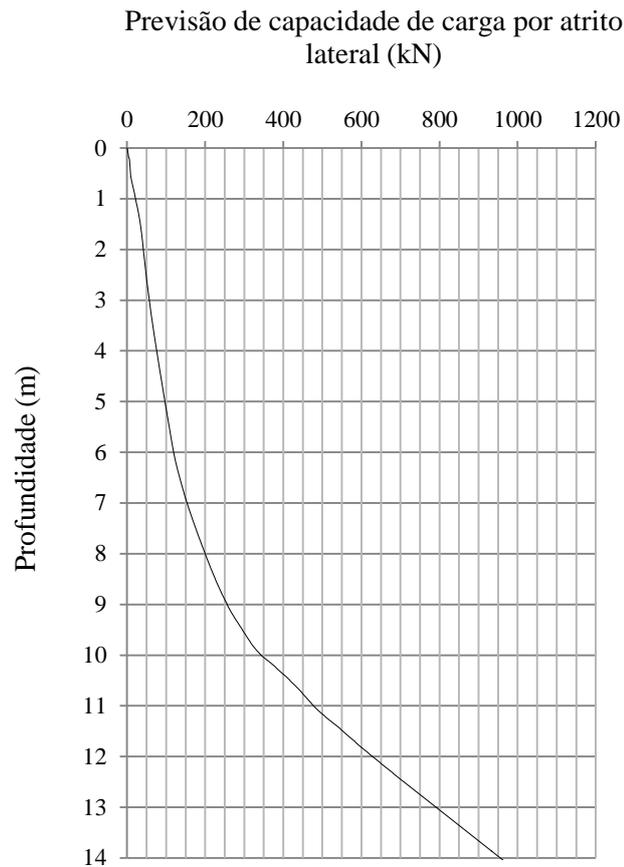


Figura 5.31 Previsão de capacidade de carga a partir dos resultados do ensaio *FDT-1* executado a aproximadamente 10 m da estaca hélice segmentada ensaiada.

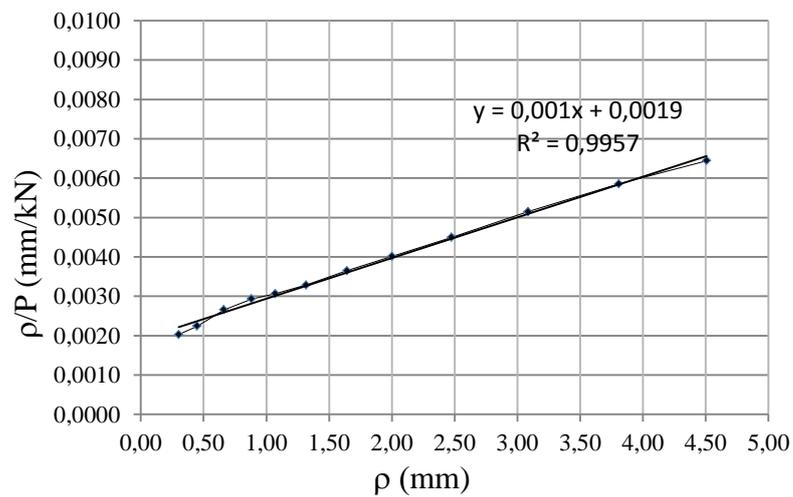


Figura 5.32 Reta 1 da curva $\rho/P - \rho$ e curva de tendência linear, através da qual se obtém a carga por atrito lateral segundo CHIN & VAIL (1973).

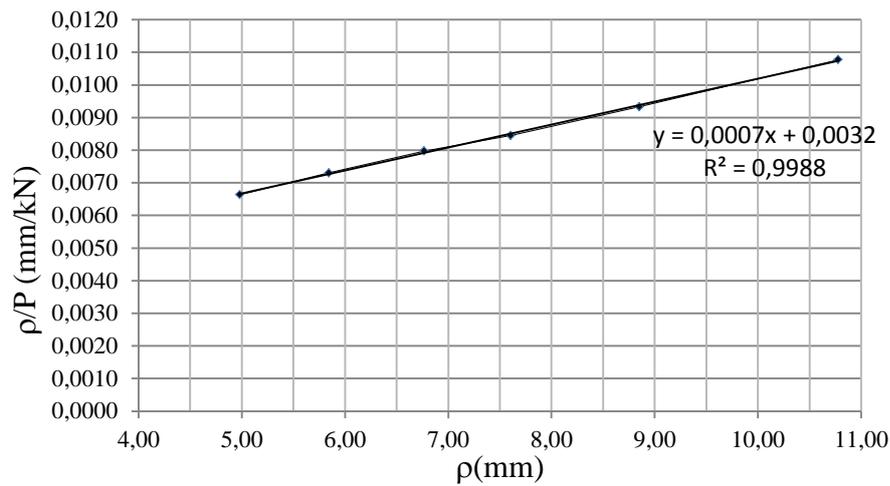


Figura 5.33 Reta 2 da curva $\rho/P - \rho$, e curva de tendência linear através da qual se obtém a carga de ruptura segundo CHIN & VAIL (1973).

A Figura 5.34 mostra a curva carga – recalque, extrapolada pelo método de Van der VEEN adaptado por AOKI, 1976, sendo que a carga máxima aplicada na estaca foi de 1000 kN. A Tabela 5.21 apresenta as previsões das cargas de ruptura, de ponta e por atrito lateral segundo diversos métodos.

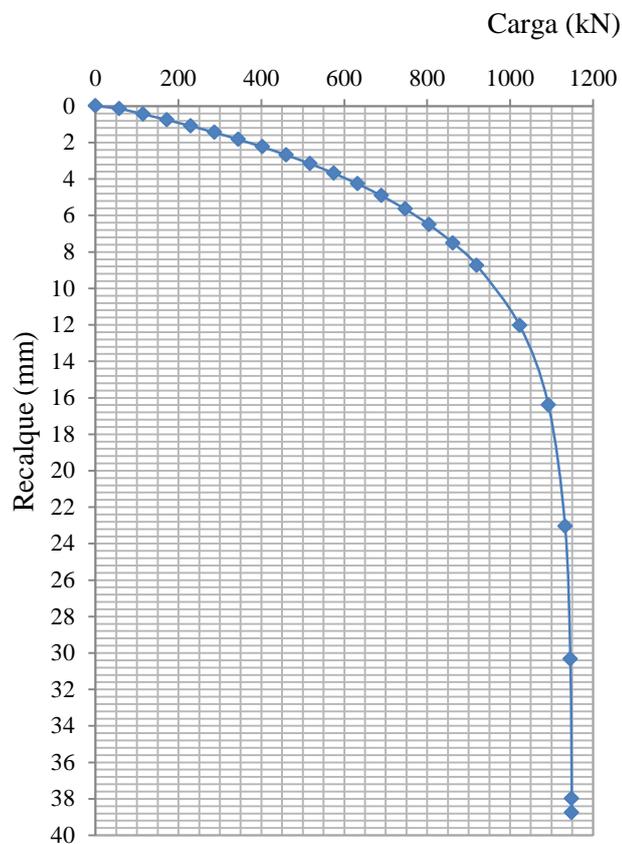


Figura 5.34 Curva carga – recalque, extrapolada.

Tabela 5.21 – Resultados de previsões de capacidade de carga obtidos através de diversos métodos.

Método	Carga por atrito lateral - P_L (kN)	Carga de ponta P_p (kN)	Carga de ruptura P_r (kN)
NBR 6122	***	***	1060
Van der Veen modificado por Aoki 1996	***	***	1150
Mazurkiewicz (1972)	***	***	1107
Chin e Vail (1973)	1000	429	1429
Décourt (1996)	***	***	1400
Décourt (1982) – SPT-01	905	348	1253
Décourt (1982) – SPT-02	927	337	1264
Antunes e Cabral (1998) – SP-01	931	132	1063
Antunes e Cabral (1998) – SP-02	977	138	1115
<i>FDT-1</i> (ao lado do SP-01)	969	***	***
<i>FDT-2</i> (ao lado do SP-02)	1095	***	***

A análise dos valores da Tabela 5.21 permite concluir que os valores obtidos são bastante concordantes em termos de resistência por atrito lateral.

6 CONCLUSÕES

Abaixo são apresentadas as principais conclusões da tese.

O equipamento projetado será capaz de executar estacas, hélice contínua monitorada, hélice segmentada monitorada, escavada com trado mecânico, *hollow-auger* e raiz. A capacidade da perfuratriz de executar esses cinco tipos de fundação profunda é interessante pelo fato de que as estacas, hélice contínua e escavada são muito utilizadas em nosso país; as estacas hélice segmentada estão sendo muito requisitadas em obras onde os diâmetros são menores que 60 cm e as quantidades de estacas são pequenas, e as estacas raiz e *hollow-auger* são utilizadas em situações especiais. Portanto, essa combinação de funções poderá resultar numa contribuição importante para a geotecnia brasileira no que diz respeito a equipamentos para execução de estacas.

Como a perfuratriz foi desenvolvida para utilizar o sistema de monitoramento eletrônico, normalmente utilizado nos equipamentos convencionais que executam estacas do tipo hélice contínua, será possível a execução de estacas escavadas monitoradas na fase de escavação, o que é interessante visto que o monitoramento irá registrar dados de pressão do sistema hidráulico que está diretamente ligada ao torque na mesa rotativa, velocidade de perfuração, velocidade de rotação, hora de início e de término da escavação, inclinações da torre e profundidade da estaca. Da mesma forma, as estacas raiz e *hollow-auger* poderão ser monitoradas eletronicamente durante a execução, o que não ocorre quando essas estacas são executadas com equipamentos convencionais.

O projeto que especifica componentes encontrados no Brasil, a utilização de sistema de manobras que dispensa a esteira rodante, o sistema de autocarregamento, a multifuncionalidade da perfuratriz e o menor custo de aquisição e manutenção em relação às perfuratrizes existentes no mercado nacional e internacional, provavelmente criarão condições favoráveis para que muitas empresas executoras, principalmente aquelas instaladas em cidades de porte médio, possam adquirir um equipamento desse tipo.

É um desafio para o engenheiro, determinar, com precisão, os esforços que atuam num helicóide comum, ou seja, num helicóide constituído de um tubo central de seção transversal constante e uma hélice com passo e espessura da chapa, também constantes. Para uma hélice

de deslocamento essa questão fica mais complexa ainda, devido à grande variação que ocorre em sua geometria ao longo de seu eixo longitudinal, sendo praticamente impossível se determinar, com precisão razoável, as forças que atuam nesses trados. No entanto, a aplicação do princípio da conservação de energia de Hamilton tornou relativamente simples a determinação do atrito, denominado nesta tese por atrito lateral equivalente.

A estaca hélice de deslocamento utiliza um trado curto que, durante todo o processo de execução do furo, a área lateral de contato do helicóide com o solo circundante se mantém constante. Esse fato possibilitou a criação de um instrumento de ensaio projetado a partir do trado de deslocamento.

O ensaio *FDT* poderá servir como um “ajuste fino” na previsão da resistência lateral de diversos tipos de estacas, já que utiliza um sistema eletrônico de registro de dados e o instrumento desenvolvido tem dimensões bem maiores que aquelas padronizadas para os instrumentos existentes. Esse fato deverá melhorar a precisão das correlações entre o atrito lateral unitário no instrumento (f_{se}) e o atrito lateral unitário da estaca (r_l).

A baixa variabilidade obtida nos ensaios *FDT* executados no campo experimental da FEAGRI - UNICAMP (4,3% a 7,9%), indica um avanço no sentido de se conseguir a repetibilidade de um ensaio de campo.

Desde que o operador da perfuratriz mantenha, além dos limites de velocidades de avanço e de rotação do instrumento, a verticalidade da composição de hastes, os fatores humanos intervenientes no ensaio desenvolvido ficam totalmente controlados, já que o processo é monitorado eletronicamente.

O desenvolvimento do instrumento com diâmetro de 15 cm e 100 cm de comprimento útil de ensaio, viabilizou a execução do novo ensaio de campo com utilização de perfuratriz de porte médio, com peso de aproximadamente 170 kN, torque na mesa rotativa de aproximadamente 25 kNm e força de extração da hélice de aproximadamente 200 kN.

As curvas de atrito lateral equivalente *versus* profundidade apresentaram informações mais precisas do subsolo quando foram considerados os dados registrados a cada 1cm em relação aos dados adquiridos a cada 25 cm ou 100 cm. Esse fato indicou a maior sensibilidade que o ensaio apresenta quando os dados são registrados em pequenos intervalos.

Para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7* realizados no campo experimental de Fundações da FEAGRI-UNICAMP, os valores médios de atrito lateral unitário (f_{sem}), para a profundidade de 12,00 m, apresentaram diferenças, entre 0% e 5,3% para valores de f_{se} registrados a cada 1 cm em relação aos valores registrados a cada 25 cm, e entre 2,9% e 11,1% para valores de f_{se} registrados a cada 1 cm em relação aos valores registrados a cada 100 cm. Aumentando-se os

intervalos de registro dos dados de f_{se} observou-se que as diferenças indicadas acima eram sempre para menos. Isso ocorre porque o registro de dados em intervalos maiores implica na perda de valores de picos de f_{se} e esse fato mostrou que, para a previsão de capacidade de carga do sistema estaca-solo, o registro de dados a cada 25 cm não implicou em diferença significativa no resultado, o que não se pode afirmar para intervalos de 100 cm.

Os resultados dos ensaios *FDT* praticamente independem dos pesos, normalmente utilizados, das composições (mesa rotativa mais hastes e instrumento de perfuração), o que representa a ausência de um eventual fator interveniente no ensaio.

Os fatores G_2 ajustados para os comprimentos de 0 m a 11,70 m das provas de carga instrumentadas em estacas escavadas, hélice contínua e ômega, apresentaram-se concordantes para os demais níveis instrumentados por Albuquerque (2001), exceto, por questões relativas ao processo executivo; para a estaca hélice contínua até a profundidade de 5,00 m. Essas concordâncias indicam que os ensaios *FDT* são consistentes.

A consistência dos resultados obtidos nos ensaios *FDT*, indica um caminho promissor a ser percorrido por esse e outros pesquisadores.

O valor da resistência por atrito lateral previsto para a estaca hélice segmentada monitorada executada no sítio da Igreja do Evangelho Quadrangular usando o fator G_2 ajustado para as estacas hélice contínua ensaiadas no campo experimental da FEAGRI-UNICAMP, mostrou-se concordante com os métodos utilizados nessa tese, para a obtenção de capacidade de carga em estacas.

Os resultados de previsão de capacidade de carga constituem-se apenas no início de um longo trabalho que deverá ser desenvolvido. Portanto, com relação à previsão de capacidade de carga do sistema estaca-solo, os resultados dessa tese não podem ser considerados conclusivos.

Embora os valores de f_{se} nos primeiros centímetros do ensaio são imprecisos devido ao reduzido comprimento do instrumento considerado para o cálculo da área lateral, já que o comprimento do instrumento é constante somente a partir de um metro de profundidade, foi perfeitamente possível identificar pequenas espessuras de solo compactado.

A mudança de inclinação das curvas de atrito lateral unitário equivalente *versus* profundidade e de demanda de energia para perfuração *versus* profundidade, indicam nitidamente o aumento da resistência do solo, o que pôde ser constatado, também, através do aumento nos valores de N_{spt} .

Para todos os ensaios executados observou-se que as relações f_{sem}/N_{spt*} , f_{sem}/T_{max} e f_{sem}/T_{res} , resultaram em valores elevados para os solos de baixa resistência. Esse fato ocorreu porque que no ensaio *FDT* a fraca estrutura dos solos porosos não é destruída. Por outro lado, valores baixos de N_{spt} são imprecisos e, por se tratar de um ensaio dinâmico, a fraca estrutura dos solos porosos é afetada, o que resulta em valores de resistência à penetração, menores que a realidade física. Com relação ao ensaio de torque, embora seja praticamente estático, é afetado pelo fato de ser feito após a cravação do amostrador *SPT*.

Os valores discrepantes da relação f_{sem}/N_{spt*} obtidos para as profundidades entre 7 e 8 m no sítio Goodyear do Brasil, provavelmente indicam valores discrepantes de N_{spt} nessas profundidades, já que o ensaio *FDT* apresenta pouca possibilidade de erros grosseiros.

No campo experimental da UNICAMP, o ensaio *FDT-8* realizado propositalmente com velocidade de avanço do instrumento em torno de 40 m/h, ou seja, duas vezes a velocidade padronizada para o ensaio *FDT*, mostrou os aumentos ocorridos nos valores de atrito lateral equivalente. Esse fato ocorreu porque o volume de solo deslocado para cada um dos ensaios (*FDT-2* a *FDT-8*) foi praticamente o mesmo, sendo que para o ensaio *FDT-8* o deslocamento de solo ocorreu na metade do tempo gasto para os demais ensaios. Esse fato provoca um aumento nas tensões radiais, o que resulta no aumento do atrito lateral equivalente. Daí a necessidade de se padronizar a velocidade de avanço do instrumento.

A execução do ensaio *FDT-8* no sítio da FEAGRI-UNICAMP, realizado com velocidade de perfuração de aproximadamente 40 m/h, resultou num valor de f_{sem} 24% maior que o f_{sem} obtido para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*, realizados com velocidade de perfuração em torno de 20 m/h; enquanto que o valor da demanda de energia para o ensaio *FDT-8* resultou aproximadamente igual à metade do valor médio obtido para os ensaios *FDT-2* a *FDT-7*. Esse fato indica que a execução do ensaio *FDT* sob condições não controladas implica em resultados menos discrepantes para valores de f_{sem} quando comparados com os valores de demanda de energia.

A seguir são apresentadas algumas sugestões para futuras pesquisas.

Realizar ensaios *FDT*, ensaios dinâmicos, provas de carga estáticas instrumentadas em profundidade, em diversos sítios, para que possa ser desenvolvida uma metodologia confiável de previsão de capacidade de carga do elemento isolado de fundação profunda, a partir dos resultados de ensaios *FDT*.

Realizar um novo trabalho de investigação, considerando as resistências por atrito lateral e de ponta, utilizando uma perfuratriz com torque na mesa rotativa e força de extração da hélice, de no mínimo 120 kNm e 400 kN, respectivamente.

Realizar um novo trabalho de investigação utilizando um instrumento com diâmetro em torno de 100 mm e uma perfuratriz mais leve e de menor potência que a utilizada nesse trabalho.

Desenvolver um equipamento específico para a realização do ensaio *FDT*, montado sobre caminhão ou sobre esteiras rodantes ou ainda sobre rodas de pneus.

Desenvolver uma metodologia de previsão de capacidade de carga com base em ensaios *FDT*, utilizando os conceitos de confiabilidade.

Desenvolver uma pesquisa em um sítio que apresente solo não saturado, executando-se, além de ensaios de laboratório, ensaios *SPT-T*, *CPTu*, *DMT* e *FDT* em quantidade significativa (em torno de 20 ensaios de cada tipo), sem e com saturação do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA. Manual de Especificações de Produtos e Procedimentos. 2.ed. São Paulo, 1999.

ABEF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA. Research on foundation engineering. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 12. São Paulo: ABEF, 1989. 86 p.

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. Diretrizes para execução de sondagens. São Paulo, 1971.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Fundações: NBR 6122:1996. Rio de Janeiro.

_____. Projeto e Execução de Fundações: NBR 6122:2010. Rio de Janeiro.

_____. Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos: NBR 6484:1980. Rio de Janeiro.

_____. Solo – Ensaio de palheta *in situ*: NBR 1095:1989. Rio de Janeiro.

ALBUQUERQUE, P.J.R. Estacas escavadas, hélice contínua e ômega: estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2001. São Paulo, 260p.

ALBUQUERQUE, P.J.R. Análise do Comportamento de Estaca Pré-moldada de Pequeno Diâmetro, Instrumentada, em Solo Residual de Diabásio da Região de Campinas. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

ALMEIDA NETO, J. Análise do desempenho de estacas hélice contínua e ômega – Aspectos executivos. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2002, 187p.

ALMEIDA, M.S.S. Aterros Sobre Solos Moles: Da Concepção à Avaliação do Desempenho. Rio de Janeiro: UFRJ-RJ, 1996.

ALPHAGEOS TECNOLOGIA APLICADA S.A. Foto da sonda CME 55. Cubatão – SP, Brasil, 2000. 1 fotografia, color; 10 x 15. Arquivo.

ALONSO, U. R. Reavaliação do dimensionamento estrutural de estacas raiz face à exigência do ensaio MB-3472 da ABNT. Solos e Rochas, São Paulo, Vol. 16, No. 1, p. 41-44, abril 1993.

_____. Estacas hélice contínua com monitoração eletrônica: previsão da capacidade de carga através do ensaio SPT-T. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 3. 1996, São Paulo. Anais... Vol. 2, São Paulo: ABEF/ABMS, p. 141-151, 1996.

_____. Estacas Injetadas. In: HACHICH, W.; FALCONI, F. R.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. Fundações: teoria e prática. 1a Ed. São Paulo: Pini, 1996. Capítulo 9, p. 361-372.

AMANN, K. A. P.; MASSAD, F. Estacas Raiz: avaliação crítica e proposta de melhoria dos métodos semi-empíricos de estimativa da carga de ruptura. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. 4., 2000, São Paulo. Anais... Vol. 1. São Paulo: ABEF/ABMS, p. 279-292, 2000.

ANJOS, G.J.M. Estudo do Comportamento de Fundações Escavadas em Solos Tropicais. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, 2006, Brasília, DF. 341p.

ANTUNES, W.R. & CABRAL, D. A. Capacidade de carga de estacas hélice contínua. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS – SEFE III, 3^o, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo, A.B.M.S., v.2, p. 105-110, 1996.

AOKI, N; LOPES, F.R. Estimating stresses and settlements due to deep foundations by the theory of elasticity. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOILS MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5^o, 1975, Buenos Aires, Proceedings..., Buenos Aires, v.1, p.377-386, 1975.

AOKI, N. Controle "in-situ" da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas via repique elástico da cravação; Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS) - Núcleo Regional de São Paulo; Associação Brasileira de Engenharia de Fundações (ABEF); Instituto de Engenharia - Divisão de Mecânica dos Solos. São Paulo, 1986.

_____. Invited contribution on driveability of piles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. XII ICSMFE, Rio de Janeiro. Proceedings. v.5, p. 2963-2966, 1989.

AOKI, N. Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 100p., 1997.

AOKI, N. e CINTRA, J.C.A. The Application of Energy Conservation Hamilton's Principle to the Determination of Energy in SPT Test, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF THE STRESS-WAVE THEORY TO PILES, 6, v. único, São Paulo, 2000. Anais... p. 457-460.

AOKI, N.; ESQUIVEL, E.R.; SEIXAS NEVES, L.F.; CINTRA, J.C.A. The impact efficiency obtained from static load test performed on the SPT sampler. *Soils and Foundation*, v. 47, n.6, p. 1045-1052, Dez. 2007.

ARAÚJO, G.S.; SILVA, C.M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; PAOLUCCI, H.V.N. Capacidade de Carga em Estaca Hélice Contínua em Função do Torque Obtido Durante a Execução. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO DO CENTRO-OESTE, Goiânia, 1., 2009, Goiânia, GO. São Paulo: ABMS, 1. p. 92 – 97.

ASTM. Penetration Test and Split Barrel Sampling of Soils. D1586-63 T, 1963.

_____. Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer, D6635-01, 2007.

_____. Standard test method for field vane shear test in cohesive soil. ASTM D2573-08.

BAGUELIN, F.J.; JÉZÉQUEL, J.; LE MÉE, E. & LE MÉHAUTÉ, A. Expansion of cylindrical probes in cohesive soils. In: *Journal of Soil Mech. Found. Div.*, 1998 (SM11), New York: ASCE, p. 129 – 142, 1972.

BARENTSEN, P. Short Description of a Field-testing Method with Cone Shaped Sounding Apparatus. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING*. Cambridge: Harvard University, 1936.

BARRETO, G.W. Relações Teóricas entre as Penetrações Parciais e Total no ensaio SPT. Trabalho iniciado na disciplina Engenharia de Fundações. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2003.

_____. BARRETO, G. W. Desenvolvimento de um equipamento para a execução de estacas hélice segmentada. 2005. 131 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

BAUER MASCHINEN GmbH. Rotary Drilling Rigs. Schrobhausen, Alemanha, 2010. Catálogo. 36p.

_____. Les Matériels BAUER. Perfuratriz modelo BG 30. Schrobhausen, Alemanha, 1994. Catálogo. 4p.

_____. BG H 12: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 15 H: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 18 H: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 20: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 20 H: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 24: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 24 H: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 25: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 28: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 28 H: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 36: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 36 H: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 40: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. BG 50: Rotary Drilling Rig. Alemanha, 2010. Catálogo de perfuratriz. Disponível em < <http://www.bauer.de>>. Acesso em 14 set. 2010.

BAXTER, D.J. Innovation in the design of continuous flight auger and bored displacement piles. Tese (Doutorado). Loughborough University, Leicestershire, U.K. 228p.

BELINCANTA, Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 1998.

BOGOSSIAN, F; MATOS, S.F.D. On the evaluation of soil parameters for the foundation design of offshore structures. Proceeding, 2nd Int. Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, p. 1297-1314, 1979.

BOGOSSIAN, R.; MUXFELDT, A.S. & BOGOSSIAN, M.F. A utilização do dilatômetro para a determinação de propriedades geotécnicas de um depósito de argilas moles. In: Simpósio de Novos Conceitos de Ensaios de Campo e Laboratório em Geotecnia, v.2, p. 483-491. Rio de Janeiro, 1988.

BOGOSSIAN, R.; MUXFELDT, A.S. & DUTRA, A.M.B. Some results of flat dilatometer test in brazilian soils. In: Proc. 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. v. 1, p. 187-190. Rio de Janeiro, 1989.

BOSCH REXROTH (a). Catálogo de bombas de pistões axiais de deslocamento volumétrico variável. Disponível em: <http://www.boschrexroth.com>. Acesso: 03 junho 2009.

BOSCH REXROTH (b). Catálogo de bombas de engrenagens. Disponível em: <http://www.boschrexroth.com>. Acesso: 03 junho 2009.

BOSCH REXROTH (c). Catálogo de motores de pistões axiais de deslocamento volumétrico constante. Disponível em: <http://www.boschrexroth.com>. Acesso: 03 junho 2009.

BOTTIAU, M. Pile walling with the PCS-method. In: International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, 2., 1993, Ghent. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1993. p. 185-190.

BOTTIAU, M.; MEYUS, I.A.; VAN IMPE, P.O. & RUSSO, G. Load testing at Feluy test site: Introducing the Omega B+ pile. In: INT. CONFERENCE ON DEEP FOUNDATIONS ON BORED AND AUGERED PILES, Ghent, Belgium, 1998. Proceedings... Rotterdam: A.A.Balkema, 1998, p. 187 – 199.

BRASFOND FUNDAÇÕES ESPECIAIS S.A. (Guarulhos, Brasil). Catálogo de apresentação da empresa: catálogo. Brasil, 2001. 54 p. Catálogo de equipamentos e obras.

BROMS, B.B.; FLODIM, N. History of penetration testing. In: International Symposium on Penetration Testing, 1, ISOPT I, Orlando. Proceedings...v.1, p. 157-220, 1988.

BRONS, K. F.; KOOL, A. F. Methods to improve the quality of auger piles. In: International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, 3., 1998. Ghent. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1998, p. 269-272.

BRUGGER, P.J.; ALMEIDA, M.S.S.; SANDRONI, S.S.; BRANTES, R.J.; LACERDA, W.A.; DANZIGER, F.A.B. Parâmetros Geotécnicos da Argila de Sergipe Segundo a Teoria dos Estados Críticos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10, 1994, Foz do Iguaçu. Anais...Foz do Iguaçu, 1994. v.2. p.539-546.

BS INDÚSTRIA DE PERFURATRIZES LTDA. Perfuratriz BS CFA 1842. Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.bsindustria.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz BS SFA 80. Betim – MG, Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.bsindustria.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz BS 1000. Catálogo. Betim – MG, Brasil, 200-?. 2p.

_____. Perfuratriz BS 1200. Catálogo. Betim – MG, Brasil, 200-?. 2p.

_____. Perfuratriz BS 400. Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.bsindustria.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz BS 280. Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.bsindustria.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz BS 250. Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.bsindustria.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz BS 450. Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.bsindustria.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

BS INDÚSTRIA DE PERFURATRIZES LTDA. Perfuratriz BS 250. Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.bsindustria.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz BS 1000. Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.bsindustria.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz BS 1200. Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.bsindustria.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

BUSTAMANTE, M; GIANESELLI, L. Installation parameters and capacity of screwed piles. In: INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SEMINAR ON DEEP FOUNDATIONS ON BORED AND AUGER PILES, 3nd, 1998, Ghent-Belgium. Proceedings... Rotterdam: A.A.Balkema, 1998. P.95-108.

CABRAL, D. A.; FEITOSA, G. O.; GOTLIEB, M. Um caso de reformulação de fundações com emprego de estacas raiz. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. 2., 1991, São Paulo. Anais... Vol. 1. São Paulo: ABEF/ABMS, 1991. p. 58-68.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SILVA, C.M.; PAOLUCCI, H.V.N. GONZAÁLES, Y.V. & VALENCIA, L.A.L. Considerações sobre a análise dos resultados de provas de carga estáticas. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 6., 2008, São Paulo. Anais... São Paulo, 2008. v.1. p. 355-369.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SILVA, C.M.; AQUINO, F.R.; AGUIAR, L.A.; MOTA, N.M.B. & ALBUQUERQUE, P.J.R. Análises dos Resultados de Provas de Carga Estáticas sobre Fundações Profundas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 15., 2010, Gramado, RS. Anais... Gramado, 2010. v.1. p. 1 – 8.

CAMPANELLA, R.G. & ROBERTSON, P.K. Flat dilatometer DMT: Research at UBC. In: Proc. 1st Conference on the Flat Dilatometer, Edmonton, 1983.

CAPUTO, A.N.; HÉLVIO, T.; URBANO, R. A.; ANTUNES, W. R. Estacas hélice contínua: projeto, execução e controle. São Paulo: NRSP/ABMS, 1997. 67 p.

CAPUTO, A.N. Novas Tecnologias em Fundações Profundas – Visão do Executor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 14., 2008, Búzios, RJ.

CARVALHO, D. Análise de cargas últimas à tração em estacas escavadas instrumentadas em Campo Experimental de São Carlos. 1991. 204 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

CARVALHO, D.; CINTRA, J. C. A. Aspects of the bearing capacity of root piles in some brazilian soils. In: International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles. 2., 1993, Ghent. Anais... Ghent, 1993. p. 1-4.

CARVALHO, D.; ALBUQUERQUE, P.J.R.; FONTAINE, E.B.; PASCHOALIN FILHO, J.A.; NOGUEIRA, R.C.R. Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da UNICAMP. Material publicado por ocasião do SEFE V, 2004. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, Comissão Técnica de Investigações de Campo. Campinas, 2004.

CASAGRANDE GROUP. B125. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. C800 DH. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. B105. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. B135. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. B170. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. B180 HD. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. B250. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. B300. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. C600 HD. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. C800. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. C14. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. C4. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. C8. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. C6. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. M6A-1. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. M9-1. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. C7. Itália, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.casagrandegroup.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

CAVALCANTE, E.H. Investigação Teórico-Experimental Sobre o SPT. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

CEPOLLINA, M. Definição. In: FALCONI, F. F. et al. Estacas Raiz: projeto, execução e controle. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 2000. Capítulo 2.2, p. 11-17.

CHIN, F.K.; VAIL, A.J. Behaviour of Piles in Alluvium – In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 6, Moscow, v.2.1, p. 45-57, 1973.

CINTRA, J.C.A.; AOKI, N. Fundações por estacas - projeto geotécnico. 1. ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2010.

CINTRA, J.C.A.; AOKI, N.; TSUHA, C.H.C.; GIACHETI, H.L. Fundações – Ensaios Estáticos e Dinâmicos. 1. ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2013.

CLARK, B. & WROTH, C.P. Comparison between results from flat dilatometer and sefboring pressuremeter tests. In: Proceedings... Penetration Testing, Institute of Civil Engineers, British Geotechnical Conference Birmingham, 1988.

CLEMENCE, S.P.; CROUCH, L.K.; STEPHENSON, R.W. Prediction of uplift capacity for helical anchors in sand. Proceedings... GEOTECHNICAL ENGINEERING CONFERENCE,1. Cairo, 1994.

CLÓ ZIRONI ORGANIZAÇÕES LTDA. Perfuratriz CA 80 S/30. Brasil, 2006. Informativo da Cló Zironi –Ano 5 – Número 7, Maio, 2006.

_____. Perfuratriz Hidráulica Montada sobre Caminhão modelo CD 30 – CFA. Brasil, 2010. 6p. Catálogo de Perfuratriz.

_____. Perfuratriz CD 27. Belo Horizonte – MG, Brasil, 198-?. Catálogo. 2p.

_____. Perfuratriz CD 17. Belo Horizonte – MG, Brasil, 199-?. Catálogo. 2p.

_____. Perfuratriz CL 07. Belo Horizonte – MG, Brasil, 199-?. Catálogo. 2p.

_____. Perfuratriz CD 20 P/PR. Catálogo. Belo Horizonte – MG, Brasil, 2002. 4p.

_____. Perfuratriz CD 12. Catálogo. Belo Horizonte – MG, Brasil, 2002. 4p.

_____. Catálogo geral de perfuratrizes. Inclui perfuratriz CR 10 montada com trado *hollow-auger*. Catálogo. Belo Horizonte – MG, Brasil, 199-?. 16p.

_____. Foto da perfuratriz HT 7 10. Araras – SP, Brasil, 2004. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm. Arquivo.

_____. Perfuratriz CR140. Brasil, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.clozironi.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz CR160. Brasil, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.clozironi.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz CR160T. Brasil, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.clozironi.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz CR10T. Brasil, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.clozironi.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz CR10. Brasil, 2006. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.clozironi.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Perfuratriz CD17. Belo Horizonte – MG, Brasil, 199-?. 2p.

_____. Catálogo de perfuratriz CFA60: catálogo. Brasil, 200-?. 4 p. Catálogo de perfuratriz.

CMV GROUP. TH 26 *Hydraulic Piling Rig*. 1.ed. Itália, 2006. Catálogo. 8p.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 10/25*. 1.ed. Itália, 2000. Catálogo. 6 p.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 10/30*. 2.ed. Itália, 2004. Catálogo. 6 p.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 13/40*. 2.ed. Itália, 2008. Catálogo. 8 p.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 14*. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 14/35*. 9.ed. Itália, 2000. Catálogo. 6 p.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 16*. 1.ed. Itália, 2006. Catálogo. 8p.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 16/50*. 1.ed. Itália, 2000. Catálogo. 6p.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 18*. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 18/60*. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. *Hydraulic Piling Rig TH 20*. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

- _____. *Hydraulic Piling Rig TH 22/75*. 1.ed. Itália, 2000. Catálogo. 6 p.
- _____. *Hydraulic Piling Rig TH 32*. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 14 set. 2010.
- _____. *Hydraulic Crawler Drill MK 3000F*. 2.ed. Itália, 2008. Catálogo. 8p.
- _____. Perfuratriz Hidráulica HG22. Brasil, 200-?. Catálogo. 4p.
- _____. Perfuratriz HG 22 CFA-ESC. Brasil. 200-?. Catálogo. 12p.
- _____. Perfuratriz Hidráulica HG 07. Brasil. 200-?. Catálogo. 8p.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 420 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 800 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 2000M. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. M20-10: perfuratriz hidráulica: Catálogo. Brasil, 2010. 6 p. Catálogo de perfuratriz.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 420 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 800 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 2000 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK20-10. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 600: Catálogo. Itália, 2000. 6 p. Catálogo de perfuratriz.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 600 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 900 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 1200 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. Hydraulic Crawler Drill MK 1400 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Hydraulic Crawler Drill MK 1500 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Hydraulic Crawler Drill MK 2000 series. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em <<http://www.cmv-group.com>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Hydraulic Crawler Drill MK 3000: Catálogo. Itália, 2000. 6 p. Catálogo de perfuratrizes.

CORRÊA, R. S. Previsão da carga de ruptura de estacas-raiz a partir de sondagens de simples reconhecimento. 1988. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

COSTA, C.M.C.; TAVARES, C.A.A.; MOTA, N.M.B.; RIBEIRO, L.F.M. Análise comparativa ente o N_{spt} e o torque obtido no monitoramento de estacas hélice contínua. In: SEFE VI – SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, São Paulo, 2008.

COUTINHO, R.Q.; OLIVEIRA, J.T.R.; DANZIGER, F.A.B. Caracterização geotécnica de uma argila mole do Recife. Solos e Rochas, v. 16, n. 4, 255-266, 1993.

CZM INDÚSTRIA DE EQUIPAMENTOS LTDA. Perfuratriz para hélice contínua modelo EM800EC. Catálogo. Brasil. 2010. 8p.

_____. Perfuratriz para hélice contínua modelo EM800 US. Catálogo. Brasil. 2010. 6p.

_____. Perfuratriz EM 60K. Catálogo. Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www.czm.com.br>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. Perfuratriz CFA-60. Catálogo. Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www.czm.com.br>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. Perfuratriz CFA-60. Catálogo. Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www.czm.com.br>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. Perfuratriz CZ 31. Catálogo. Brasil, 200-?. 16p.

_____. Perfuratriz CD 30 CFA. Catálogo. Brasil, 200-?. 4p.

_____. Perfuratriz CA 40 CFA. Catálogo. Brasil, 200-?, 8p.

_____. Perfuratriz CA 80 S/30. Catálogo. Brasil, 200-?, 20p.

_____. Perfuratriz CA 80 S/26. Catálogo. Brasil, 200-?, 20p.

_____. Perfuratriz CA 80/22. Catálogo. Brasil, 200-?, 20p.

_____. Perfuratriz CA 60/20. Catálogo. Brasil, 200-?, 20p.

_____. Perfuratriz CA 50/17. Catálogo. Brasil, 200-?, 20p.

_____. Perfuratriz EM1000/32. Catálogo. Brasil, 200-?, 8p.

_____. Perfuratriz EM1000/26. Catálogo. Brasil, 200-?, 6p.

_____. Perfuratriz EM800/24. Catálogo. Brasil, 200-?, 6p.

_____. Perfuratriz EM800/30. Catálogo. Brasil, 200-?, 8p.

_____. Perfuratriz EM 800EC. Catálogo. Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www.czm.com.br>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. EM 800US *Excavator Mounted* 800US. Brasil, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.czm.com.br>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. MC180 Perfuratriz de estacas raiz. Brasil, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.czm.com.br>>. Acesso em 12 jan. 2012.

_____. MC140 Perfuratriz para microestacas e estacas escavadas. Brasil, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.czm.com.br>>. Acesso em 12 jan. 2011.

_____. MC140T Perfuratriz de microestacas. Brasil, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.czm.com.br>>. Acesso em 12 jan. 2011.

_____. MC1050 Perfuratriz de microestacas. Brasil, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.czm.com.br>>. Acesso em 12 jan. 2011.

CUMMINS ENGINE COMPANY. Arquivo eletrônico do motor Cummins modelo 6CTA-8.3-P. Fornecido pela Cummins do Brasil. 2010.

CUMMINS ENGINE COMPANY. Folheto geral. 2009, São Paulo, Brasil, 1p.

DAMASCO PENNA. Ensaio de Piezocone (CPTU). Página da WEB, Damasco Penna – Engenharia Geotécnica. Disponível em: <http://www.damascopenna.com.br/cptu>. Acessado em: 01 de junho de 2013.

DAMASCO PENNA. Dilatômetro de Marchetti (SDMT). Página da WEB, Damasco Penna - Engenharia Geotécnica. Disponível em: <http://www.damascopenna.com.br/ensaios-dilatometricos-dmt>. Acessado em: 05 de julho de 2013.

DANZIGER, F.A.B. Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios de piezocone: aplicação para as argilas moles. Tese (Doutorado); COPPE-UFRJ, 1990.

DE COCK, F. Design of axially loaded bored piles: european codes, practice and experience. In: VAN IMPE; HAEGEMAN (Ed.). *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*. A. A. Balkema, Rotterdam: 1998. p. 63-74.

DÉCOURT, L. On the load-settlement behavior of piles. *Revista Solos e Rochas*, São Paulo, v.18, n.2, p. 93-112, ago.,1995.

_____. Predicted and measured behavior. In: INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SEMINAR ON DEEP FOUNDATIONS ON BORED AND AUGER PILES, 2nd, 1993, Ghent-Belgium. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. P. 369-376.

DÉCOURT, L.; QUARESMA FILHO, A.R. Practical applications of the standard penetration test complemented by torque measurement SPT-T, present stage and future trend. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 13, New Delhi. Proceedings, v.4, p. 143-146. 1994.

DÉCOURT, L. A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE III, São Paulo – SP. Anais. ABEF – ABMS, 1996. v.1. p.215-224. 1996.

DÉCOURT, L.; Prediction of the bearing capacity of piles base exclusively on values of the SPT. In: EUROPEAN SYMPOSIUM ON PENETRATING TEST, 2; 1982, Amsterdam. Proceedings...Amsterdam, 1982. v.1. p. 29-34.

DE RUITER, J. Electric penetrometer for site investigations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, v. 97, n.SM2, p. 457-473, 1971.

DONALD, I.B.; JORDAN, D.O.; PARKER, R.J.; THE, C.T. The Vane Test – A critical appraisal. In: Proceedings 9th INTERNATIONAL CONF. ON SOIL MECH. AND FOUND. ENGG. v.1, p. 81-88, Tóquio, 1977.

EATON CORPORATION. Catálogo de motores hidráulicos séries 2000, 4000, 6000 e 10000. Catálogo. USA, 1994. 76p.

E.G.BARRETO LTDA. Perfuratriz HS 400. Vista do carregamento. Araras – SP, Brasil, 2006. 1 fotografia, color., 11,5 cm x 10,4 cm. Equipamento. Arquivo.

_____. Perfuratriz HS 400. Vista do equipamento modificado – fase de escavação. Araras – SP, Brasil, 2008. 1 fotografia, color., 8,0 cm x 10,5 cm. Equipamento. Arquivo.

_____. Perfuratriz HS 400. Vista do equipamento modificado – fase de concretagem. Araras – SP, Brasil, 2008. 1 fotografia, color., 10,0 cm x 7,5 cm. Equipamento. Arquivo.

_____. Vista do transdutor de pressão. 2010. 1 fotografia, color., 10,0 cm x 7,8 cm. Instrumento. Arquivo.

_____. Sensor de velocidade de rotação. 2010. 1 fotografia, color., 10,0 cm x 7,6 cm. Instrumento. Arquivo.

_____. Vista frontal do conjunto de medida de profundidade. 2010. 1 fotografia, color., 10,0 cm x 7,6 cm. Instrumento. Arquivo.

_____. Relatório de monitoramento de uma estaca hélice segmentada. Araras – SP, Brasil, 2010.

_____. Perfuratriz HS 400. Araras – SP, Brasil, 2007. Disponível em: <http://www.egbarreto.com.br>. Acesso em 10 out. 2007.

- _____. Perfuratriz M 500. Araras – SP, Brasil, 1987. Catálogo. 2p.
- _____. Perfuratriz H 800. Araras – SP, Brasil, 1993. 1 fotografia, color. 10 cm x 7,6 cm. Arquivo.
- _____. Perfuratriz H 800. Araras – SP, Brasil, 1994. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm. Arquivo.
- _____. Perfuratriz H 1000. Araras – SP, Brasil, 199-?. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm. Arquivo.
- _____. Foto do início da obra da Cervejaria KAISER no município de Araraquara – SP. Brasil, 1995. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm.
- _____. Foto do término da obra da Cervejaria KAISER no município de Araraquara – SP. Brasil, 1996. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm.
- _____. Foto da perfuratriz MH 500. Araras – SP, Brasil, 1996. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm.
- _____. Foto da perfuratriz HT 7 10. Araras – SP, Brasil, 1997. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm. Arquivo.
- _____. Foto da perfuratriz HC 9 18. Araras – SP, Brasil, 1997. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm. Arquivo.
- _____. Foto da perfuratriz HC 9 20. Araras – SP, Brasil, 1999. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm. Arquivo.
- _____. Foto da perfuratriz HT 9 16. Araras – SP, Brasil, 1999. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm. Arquivo.
- _____. Foto da perfuratriz HC 9 16. Araras – SP, Brasil, 2001. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm. Arquivo.
- _____. Foto da perfuratriz HT 18 22A. Execução de estacas escavadas com utilização de trado oco (*hollow-auger*). Araras – SP, Brasil. 1 fotografia, color; 10 cm x 15 cm. Arquivo.
- _____. Relatório do monitoramento da execução de estaca hélice segmentada. Araras, 2010. 1 p.
- _____. Coroa do tubo de revestimento de execução de estaca raiz. 2005. 1 fotografia, color., 7,1 cm x 5,4 cm. Ferramenta. Arquivo.
- _____. Posicionamento e introdução do tubo de revestimento no terreno. 2005. 1 fotografia, color., 7,0 cm x 5,3 cm. Ferramenta. Arquivo.
- _____. Broca de três asas. 2010. 1 fotografia, color., 3,9 cm x 4,0 cm. Ferramenta. Arquivo.

_____. Três martelos de fundo. 2010. 1 fotografia, color., 4,9 cm x 7,6 cm. Ferramenta. Arquivo.

_____. Dois bits de botão. 2010. 1 fotografia, color., 4,9 cm x 4,1 cm. Ferramenta. Arquivo.

_____. Armadura de estaca raiz. 2007. 1 fotografia, color., 3,6 cm x 6,5 cm. Obra. Arquivo.

_____. Injeção da argamassa. 2007. 1 fotografia, color., 6,4 cm x 4,8 cm. Obra. Arquivo.

_____. Desacoplamento do tubo de revestimento. 2007. 1 fotografia, color., 8,7 cm x 7,5 cm. Obra. Arquivo.

ENGESTRAUSS ENGENHARIA E FUNDAÇÕES LTDA. Bomba de concreto montada sobre caminhão. 2005. 1 fotografia, color., 10 cm x 8,7 cm.

_____.Ponteira da hélice com vista da tampa. 2005. 1 fotografia, color., 9 cm x 9 cm.

_____. Perfuratriz de estaca hélice segmentada MD 3000. 2002. 1 fotografia, color., 8,4 cm x 8,3 cm.

FALCONI, F. F.; GOTLIEB, M. I. D.; GRANDIS, I. Projeto. In: FALCONI, F. F. et al. Estacas Raiz: projeto, execução e controle. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 2000. Capítulo 2, p. 6-10.

FHWA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Geotechnical Engineering Circular No. 8: Design and Construction of Continuous Flight Auger (CFA) Piles. 1. ed. Washington D.C.: FHWA. 2007. 293 p.

FAIRES, V.M. Design of machine elements. Revised Edition, Macmillan Company, 490 p., New York, 1965.

FAIRES, V.M. Elementos Orgânicos de Máquinas. Tradutor: Humberto César Tavares Gonçalves. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., v.2., 1976.

FLETCHER, G.F.A. Standard penetration test: its uses and abuses. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.91, s. SM4, p. 67-77, 1965.

FLODIN, N., BROMS, B. Historical Development for Civil Engineering in Soft Clay Engineering, Elsevier, 1981. p. 27-156.

FUNDESP - Fundações Especiais Ltda. (Jandira, Brasil) Apresentação da Empresa: catálogo. Brasil, 2001. 62 p. Catálogo de equipamentos e obras.

GEAX S.R.L. DRILLING MACHINES. Perfuratriz modelo EK90 CFC. Catálogo. Italy, 2009. 2p.

_____. EK60 *multi-purpose drilling rig*. Itália, 200-?. Catálogo. Disponível em: <<http://www.geax.it>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. EK90 *multi-purpose drilling rig*. Itália, 200-?. Catálogo. Disponível em: <<http://www.geax.it>>. Acesso em 14 set. 2010.

GENNARO, N.N. Inventor. Equipamento para cravação de estacas pré-moldadas a percussão com deslocamento hidráulico. PI 9700343. 19970304.

_____. Vista da ligação do mangote ao tubo central da hélice. 2010. 1 fotografia, color., 10 cm x 7,5 cm.

GEOESP - Engenharia e Fundações Ltda. Arquivo fotográfico. Americana, SP, 2009.

_____. Arquivo fotográfico. Americana, SP, 2010.

GHALY, A.; HANNA, A. Experimental and theoretical studies on installation torque of screw anchors. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 28, n.3, p. 353 – 364, 1991.

GHALY, A.; HANNA, A.; HANNA, M. Installation torque of screw anchors in sand. *Soils and Foundations*, v.31, n.2, p. 77 – 92, 1991b.

GIACHETI, H.L. Os ensaios de campo na investigação do subsolo: Estudos e considerações quanto à aplicação em solos tropicais. 2001. 301p. Livre Docência – Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru, 2001.

GOULART, M. R. M.; KOPPE, J. C.; MÁNTARAS, F. M.; LIMA, S. C.; ZÍNGANO, A. C.; COSTA, J. F. C. L. Instrumentação de uma estaca raiz em solo residual com embutimento em granito, carregada à compressão axial. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. 5., 2004, São Paulo. Anais... Vol. 2. São Paulo: ABEF/ABMS, 2004. p. 353-360.

GUTYAR, E.M. Elementarnaya teoriya vertikalnovo vintovovo transportera (Teoria básica de transportador vertical). *Trudy Mosk. Inst. Mekh. I Elekt. Selsk. Kohz. Im. M. Molotov*. 2, 1956. p. 102-120.

HALL, H.L. Elementos Orgânicos de Máquinas. Tradução: Paulo Murilo A. da Rocha. Mc. Rio de Janeiro: Ed. Mc. Graw Rio, 1968.

HAYES, J.A. Comparison of flat dilatometer test results with observed settlement of structures and earthwork. In: 39th Canadian Geotechnical Conference *In Situ Testing and Field Behaviour*, p. 311-316. Ottawa, Ontario, 1986.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sinopse do Censo Demográfico 2010 – Brasil. Rio de Janeiro. Disponível em: [http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=00\\$dados=1](http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=00$dados=1). Acessado em 30 de julho de 2014.

JOPPERT JÚNIOR, I. O. Fundações e contenções de edifícios. 1a Ed. São Paulo: Pini, 2007. 221 p.

KAREZ, M; ROCHA, E.A.C. Estaca tipo hélice contínua previsão da capacidade de carga. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS – SEGE IV, 40, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo, A.B.M.S., 2000. V.1, p. 274-278.

KONRAD, J.M. & LAW, K.T. Preconsolidation pressure from piezocone test in marine clays. In: GEOTECHNIQUE, v.37, p.177 - 190, 1987.

KORMANN, A.C.M.; CHAMECKI, P.R.; RUSSO NETO, L.; ANTONIUTTI NETO, L.; BERNARDES, G.P. Estacas hélice contínua em argila sobre adensada: comportamento em provas de carga estáticas e dinâmicas. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 4, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo, 2000. v1. p. 58 – 70.

LACASSE, S. & LUNNE, T.; Calibration of dilatometer correlations. In: INT. SYMP. ON PENETRATION TESTING, 1, 1988, Orlando. Proceedings...Orlando, 1988, v.1, p 539 – 548, 1988.

LADD, C.C.; FOOTT, R.; ISHIHARA, K.; SCHLOSSER, F.; POULOS, H. Stress deformation and strength characteristics. In: Proc. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3, 421-494. Tóquio, 1977.

LAMARE NETO, A.; BERNARDES, G. P.; COSTA FILHO, L. M. Resultados de provas de cargas executadas sobre estacas injetadas de pequeno diâmetro. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. 1., 1985, São Paulo. Anais... Vol. 1. São Paulo: ABEF/ABMS, 1985. p. 163-177.

LEITE, F. C.; GIRARDI, S; G; SOUZA, T. D.; ECV5135 – Fundações: trabalho de graduação referente à disciplina de Fundações da Universidade Federal de Santa Catarina. 2007. Disponível em: <<http://fundacoes5135.googlepages.com/index.htm>>. Acesso em: 26 abr. 2011.

LIZZI, F. The Static Restoration of Monuments. Sagep Editrice, Genova. 1982. 146 p.

LLAMADA. CONSTRUCCIONES MECÁNICAS. Perforatriz P-135 *Evolution*. Catálogo. Cardedeu (Barcelona), Espanha, 2009. 8p.

_____. Perforatriz P-90TT. Catálogo. Cardedeu (Barcelona), Espanha, 2009. 8p.

_____. Perforatriz P140TT. Catálogo. Cardedeu (Barcelona), Espanha, 2009. 6p.

_____. *P-90TT CFA PILING RIG*. Espanha, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.cm-llamada.es>>. Acesso em 6 dez. 2010.

_____. *P-90TT CFA PILING RIG*. Espanha, 200-?. 6 p. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.cm-llamada.es>>. Acesso em 6 dez. 2010.

_____. *P-105TT CFA PILING RIG*. Espanha, 200-?. 6 p. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.cm-llamada.es>>. Acesso em 6 dez. 2010.

_____. *P-135TT CFA PILING RIG*. Espanha, 200-?. 6 p. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.cm-llamada.es>>. Acesso em 6 dez. 2010.

_____. *P-140TT CFA PILING RIG*. Espanha, 200-?. 6 p. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.cm-llamada.es>>. Acesso em 6 dez. 2010.

_____. *P-150TT CFA PILING RIG*. Espanha, 200-?. 4 p. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.cm-llamada.es>>. Acesso em 6 dez. 2010.

LUND, S.A.; SOARES, J.M.D. & SCHNAID, F. Ensaio de palheta e sua aplicação na determinação de propriedades de argilas moles. In: Caderno de Engenharia, CE-51/95. Porto Alegre: UFRGS, 1996.

LUNNE, T.; POWELL, J.J.M.; HAUGE, E.; UGLOW, I.M. & MOKKELBOST, K.H. Correlations of dilatometer reading with lateral stress in clays. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute (NGI) Papers, 1990.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P.K.; POWELL, J.J.M. Cone Penetration Testing IN Geotechnical Practice. London: Spon Press, 1997.

LUTENEGGER, A.J. & TIMIAN, D.A. Flat-plate dilatometer tests in marine clays. In: 39th Canadian Geotechnical Conference.. Ottawa, 1986. p. 301-309.

LUTENEGGER, A.J. Current status of the Marchetti dilatometer test. In: Proc. 1st International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, v.1, p. 137-156. Orlando, 1988.

LUTENEGGER, A.J. & KELLEY, S.P. Standard Penetration Tests With Torque Measurement. In: GEOTECHNICAL SITE CHARACTERIZATION. 1998. Proceeding... Balkema. Atlanta, USA, 1998, p. 939 – 945.

LUTENEGGER, A.J. & KELLEY, S.P. Estimating pile skin friction in clay and sand using SPT– torque tests, 2001. In: Proceedings of the INTERNATIONAL CONFERENCE ON IN-SITU MEASUREMENT OF SOIL PROPERTIES AND CASE HISTORIES. Editor: P.P.Rahardjo e T. Lunne. Parahyangan Catholic University, Bandung, Indonésia, 2001. p. 495-499.

LUKIANCHUKI, J.A. Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos (SP), 2013.

MAIT- MACHINE INDUSTRIALI TRIVELLATRIA. Perfuratriz CFA 24. Catálogo. Osimo, Itália, 1998. 2p.

_____. Perfuratriz HR 120 CFA. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.mait.it>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. Perfuratriz HR 130 CFA. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.mait.it>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. Perfuratriz HR 180 CFA. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.mait.it>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. Perfuratriz HR 260 CFA. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.mait.it>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. Perfuratriz HR 300-570 CFA. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.mait.it>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. Perfuratriz HR 800 CFA. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.mait.it>>. Acesso em 14 set. 2010.

MARCHETTI, S. *In situ* tests by flat dilatometer. In: J. Geotechnical Engineering Division, 106, GT3, p. 299-321, 1980.

MARCHETTI, S & CRAPPS, D.K. Flat dilatometer manual. Gainesville: Int. Report Schmertmann & Crapps Inc. Gainesville, E.U.A., 1981.

MARCHETTI, S. The flat dilatometer - design applications. Keynote Lecture, In: 3th Geotechnical Engineering Conference Cairo: Cairo University, 1997.

MARCHETTI, S. Flat Dilatometer (DMT) Papers, Disponível em: <<http://www.marchetti-dmt.it>>. Acesso em 08 de julho de 2013. Italy, 2010.

MAYNE, P.W. & KULHAWY, F.H. Ko - OCR relationship in soil. In: Journal Geotechnical Engineering, 108 (GT[^]), 851-872. New York: ASCE, 1982.

MAYNE, P.W. & MITCHELL, J.K. Profiling of Overconsolidation in Clays by Field Vane. In: Canadian Geotech. Journal., v.25, p.150 – 157, 1988.

MAYNE, P.W. & BACHUS, R.C. Profiling OCR in Clays by Piezocone Soundings. In: Proceeding... INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, Orlando, 1988.

MASSAD, F.; NIYAMA, S.; ROCHA, R. Vertical load tests on instrumental root-piles. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 10., 1981, Stockholm. Anais... Vol. 2. Stockholm. p. 771-775.

MASSARSCH, K.R. & TANCRE, E. Displacement auger piles with compacted base. Proceeding... INT. CONF. ON DEEP FOUNDATION ON BORED AND AUGERED PILES, Ghent, Balkema, 1988.

MAZURKIEWICZ, B.K. Test loading of piles according to Polish regulation, Preliminary Report n. 35, Commission on Pile Research, Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, Stockholm, 1972.

MDT MC DRILL TECHNOLOGY. Multipurpose Drills MDT 80B. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.mdtspa.it>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Multipurpose Drills MDT 140B. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.mdtspa.it>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. Multipurpose Drills MDT 180B. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.mdtspa.it>>. Acesso em 13 set. 2010.

MEIGH, A.C. Cone Penetration Testing: Methods and Interpretation. London: Construction Industry Research and Information Association, London: Butterworths, 1987.

MENZIES, B.K.; MERRIFIELD, C.M. Measurements of Shear Stress Distribution on the Edges of a Shear Vane Blade. In: GÉOTECHNIQUE, v.30, p.314 – 318, 1980.

MOHR, H.A. Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, v.92, n. SM1, p. 196-199, 1966.

MONACCI, M.D. Estudo da Colapsibilidade de um Solo do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

MORI FOUNDATION TECHNOLOGY. Perfuratriz BR6000. Catálogo. Campofilone, Itália. 4p.

MUCHETI, A. S. Estacas hélice segmentada: execução, verificação de integridade e estudo de comportamento. 2008. 123 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, 2008.

NIEMANN, G. Maschinenelemente. Munique: Springer-Verlag, 1960. Tradução: Elementos de Máquinas. Tradutores: Carlos Van Langendonck, Universidade de São Paulo e Otto Alfredo Rehder, Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 6. ed. São Paulo – SP: Editora Edgard Blucher Ltda. , 1971. v.2. p. 86.

ODEBRECHT, E. Medidas de Energia no Ensaio SPT. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2003.

OLIVEIRA, J. R. M. S.; SILVA, M. R. L.; CABRAL, D. A.; ANTUNES, W. R. Reforço do cais do porto de São Francisco do Sul. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. 6., 2008, São Paulo. Anais... Vol. 2. São Paulo: ABEF/ABMS, 2008. p. 133-143.

O’NEILL, M.W.; REESE, L.C. Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods, 1999, FHWA.

ORTIGÃO, J.A.R., Collet, H.B. A Eliminação de erros de Atrito em Ensaios de Palheta. Solos e Rochas, v.2, n.2, 1986. p.33-45.

ORTIGÃO, J.A.R. Dilatômetro em argila porosa. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 7; 1993, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 1993. v. 5, p. 309-320.

PAULA, M.C.; MINETTE, E.; LOPES, G.S. & LIMA, D.C. Ensaios dilatométricos em um solo residual de gnaiss. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Brasília, 1998. v. 2, p. 811-818.

PEIXOTO, A.S.P. Estudo do Ensaio SPT-T e sua Aplicação na Prática de Engenharia de Fundações. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 468p.

PENNA, A. S. D.; CAPUTO, A. N.; MAIA, C.; PALERMO, G.; GOTLIEB, M.; PARAÍSO, S. C.; ALONSO, U. R. A estaca hélice contínua: a experiência atual. 1a Ed., 1999, São Paulo: ABMS/ABEF/IE, 162 p.

PENNA, A.S.D. Damasco Penna – Engenharia Geotécnica. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.damascopenna.com.br/ensaios-dilatometricos-dmt/>>. Acesso em: 15 nov. 2013.

PERKO, H.A. Energy method for predicting the installation torque of helical foundations and anchors. *New Technology and Design Developments in Deep Foundation Technologies*, ASCE, 2000. p. 342-352.

PERKO, H.A.; RUIPIPER, S.J. *Helix Pier Engineering Handbook 2000*. Ingal Precision Foundation, INC. Worldwide Helix Pier Distributers. 2000.

PEREIRA, A.C. & COUTINHO, R.Q. Ensaios dilatométricos em um depósito de argila mole do bairro Ibura, Recife, PE. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Brasília, 1998. v. 2, p. 937-946.

POLIDO, U. F.; CASTELLO, R. R.; ALLEDI, C. T. D. B. Comportamento de estacas tubadas injetadas a alta pressão. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. 4., 2000, São Paulo. Anais... v.1. São Paulo: ABEF/ABMS, 2000. p. 403-415.

POULOS, H.G; DAVIS, E.H. The settlement behavior of single axially loaded incompressible piles and piers. *Geotechnique*, v8, n.3, p. 351-371, set, 1968.

PROVENZA, F. *Mecânica Aplicada*. São Paulo – SP: Centro de Comunicação Gráfica da “PRO-TEC”, 1986, v.1. p. 2.3.

PROVENZA, F. *Mecânica Aplicada*. São Paulo – SP: Centro de Comunicação Gráfica da “PRO-TEC”, 1987, v.2. p. 8.12.

ROBERTSON, P.K. & CAMPANELLA, R.G. Estimating liquefaction potential of sands using the flat dilatometer. In: *Geotechnical Testing Journal*, 9 (1), 38-40, 1983.

QUARESMA, A. Sondagens – Discussão. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.4, p. 82-84, 1974.

QUARESMA, A.R.; DECOURT, L.; QUARESMA FILHO, A.R. ALMEIDA, M.S.S.; DANZINGER, F. *Investigações Geotécnicas – Cap.2*. In: *Fundações – Teoria e Prática*. ABMS/ABEF. São Paulo: Editora Pini, 1996.

RANZINI, S.M.T. SPTF. *Solos e Rochas*, São Paulo, v.11, p. 29-30, 1988.

ROBERTSON, P.K.; CAMPANELLA, R.G.; GILLESPIE, D. Excess pore pressure and the flat dilatometer test. In: Proc. 1st International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, v.1, p. 567-576. Orlando , 1988.

ROCHA FILHO, P. Behavior in cone penetration tests in saturated sands. Ph. D. Thesis, University of London, 1979.

ROCHA FILHO, P.; ALENCAR, J.A. Piezocone tests in the Rio de Janeiro soft clay deposit. Proceeding, XI ICSMF, San Francisco, v.2. p. 859-862, 1985.

ROCHA FILHO, P. Determination of the undrained shear strength of two soft clay deposits using piezocone tests. Proceeding, International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, México, p. 125-130, 1987.

ROCHA FILHO, P.; CARVALHO, J.B.Q. Building Foundation in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. In: International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, 2, 1998, Singapore. Proceedings... Singapore, 1988. v.2, p. 587-601.

ROCHA FILHO, P.; SALES, M.M. O uso do piezocone em ensaios offshore em águas profundas. Anais, X COBRAMSEG, Foz do Iguaçu, v.2, p.531-538, 1994.

ROCKSMITH. Drag Bits. Disponível em: < [http:// www.rocksmith.com.au](http://www.rocksmith.com.au)>. Acesso em 26 abr. 2010.

SANDVEN, R.; SENNESSET, K. & JANBU, N. Interpretation of Piezocone Test in Cohesive Soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, v.2, p. 939 – 953. Orlando, 1988.

SAUER-DANFOSS GROUP. Catálogo Técnico dos Motores Orbitais OMS, OMT e OMV. Disponível em: <http://www.suer-danfoss.com>. Acesso em 03 dez. 2013.

SCMERTMANN, J.H. A new method for determining the friction angle in sands from the flat dilatometer test. In: Proc. 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II, 2, 5853-861. Amsterdam, 1982.

SCHMERTMANN, J.H. Past, present and future of the flat dilatometer test. In: Proc. 1st International Conference on the Flat Dilatometer. Edmonton, 1983.

SCHMERTMANN, J.H. Suggested method for performing the flat dilatometer test. In: Geotechnical Testing Journal. n. 9, v. 2, p. 93-101, 1986.

SCHMERTMANN, J.H.; PALACIOS, A. Energy dynamics of SPT. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.105, n.GT8, p. 909-926, august, 1979.

SCHNAID, F. A study of the cone pressuremeter test in sand. D. Phil. Thesis, Oxford University, UK, 1990.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E.; ROCHA, M.M.; BERNARDES, G.P. Prediction of soil properties from the concepts of energy transfer in dynamics penetration tests. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE, v. 135, n.8, p. 1092-1100, 2009.

SCHNAID, F. Ensaios de Campo e suas aplicações à engenharia de fundações. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SEIXAS NEVES, L.F. Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2004.

SILVA, C.M. & CAMAPUM, J.C. Monitoramento e controle de qualidade dos estaqueamentos tipo hélice contínua durante a execução da obra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 15., 2010, Gramado, RS. Anais... Gramado, 2010, Arquivo: id280.pdf. 12p.

SILVA, C.M. Energia e confiabilidade aplicada aos estaqueamentos tipo hélice contínua. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília (DF), 2011.

SIRLEI PERFURAÇÕES. São Carlos, 200-? Fábrica de equipamentos para mineração. Disponível em: <<http://www.sirleiperfuracoes.com.br>>. Acesso em 17 jan. 2011.

SKEMPTON, A.W. “Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation”, *Geotechnique*, v.36, n.3. p. 425-447, 1986.

SLATTER, J.W. The Fundamental Behaviour of Displacement Screw Piles Augers. Thesis of Doctor of Philosophy. Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia, 2000.

SOARES, M.M.; LUNNE, T.; ALMEIDA, M.S.S. & DANZIGER, F.A.B. Ensaio de dilatômetro em argila mole. In: 80 Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. v. 2, p. 89-98. Porto Alegre, 1986.

SOARES, J.M.D; SCHNAID, F; BICA, A.V.D. Propriedades de resistência de um depósito de argilas através de ensaios de campo. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10., 1994, Foz do Iguaçu. Anais...Foz do Iguaçu, 1994. v1. p. 573-580.

SOARES, J.M.D; SCHNAID, F; BICA, A.V.D. Determination of the characteristics of a soft Clay deposit in southern Brazil. In: International Symposium Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, 1997, Amsterdam. Proceedings... Amsterdã, 1997. p. 297-302.

SODRÉ, D. J. R. Análise estatística de métodos de previsão do comportamento de estaca raiz. 1994. 175 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

SOILMEC DRILLING AND FOUNDATION EQUIPMENT. Catálogo Geral. Catálogo. Cesena, Itália, 2009. 44 p. Catálogo de Perfuratriz.

_____. Catálogo Geral de Produtos. Catálogo. Baruerí – SP, Brasil, 2013. 32p.

_____. *CM-48: Attrezzatura idraulica automontante*. Catálogo. Cesena, Itália, 200-?. 8 p.

_____. Perfuratriz Hidráulica SR-55. Catálogo. Barueri – SP, Brasil, 2010. 12p.

_____. Catálogo Geral. Cesena, Itália, 2010. 40p.

_____. Rotary idrauliche R-1240. Catálogo. Cesena – Itália, 2005. 4p.

- _____. Rotary idrauliche R-622. Catálogo. Cesena - Itália, 200-?. 4 p.
- _____. *C.F.A. – Continuous Flight Auger*. Catálogo das perfuratrizes série CM e série R. Disponível em: <http://www.soilmec.com>. Acesso em 12 jun. 2009.
- _____. Catálogo Geral de Produtos. Catálogo. Barueri – SP, Brasil, 2001. 44p.
- _____. PSM-8 Hydraulic Drilling Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. PSM-8b Hydraulic Drilling Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. SM-5 Hydraulic Drilling Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. PSM-20 Hydraulic Drilling Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. SM-14 Hydraulic Drilling Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. SM-18 Hydraulic Drilling Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. SM-21 Hydraulic Drilling Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. SM-30 Hydraulic Drilling Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. ST-30 Hydraulic Drilling Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 13 set. 2010.
- _____. SR-20 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.
- _____. SR-40 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2009. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.
- _____. SR-50 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2009. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.
- _____. SR-65 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2009. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.
- _____. SR-70 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2009. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. SR-80C Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2008. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. SR-100 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2009. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. SF-50 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2012. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 10 out. 2012.

_____. SF-70 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2012. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 10 out. 2012.

_____. SF-120 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2012. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 10 out. 2012.

_____. SF-140 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2012. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 10 out. 2012.

_____. SR-30 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2009. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. SR-60 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2009. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. SR-80 Hydraulic Rotary Rig. Itália, 2009. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.soilmec.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

SOLODRILL IND. E COM. DE MÁQUINAS PERFURATRIZES LTDA. Perfuratriz hidráulica SD40 BR. Jandira – SP, Brasil, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.solodrill.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

SOLODRILL IND. E COM. DE MÁQUINAS PERFURATRIZES LTDA. Perfuratriz hidráulica SD45 BR. Jandira – SP, Brasil, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.solodrill.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

SOLODRILL IND. E COM. DE MÁQUINAS PERFURATRIZES LTDA. Perfuratriz hidráulica SD55 BR. Jandira – SP, Brasil, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.solodrill.com.br>>. Acesso em 13 set. 2010.

STIPKOVIC FILHO, M. Engrenagens Geometria Dimensionamento Controle Geração Ensaios. 2.ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1983.

SULLY, J.P.; CAMPANELLA, R.G. & ROBERTSON, P.K. Overconsolidation Ratio of Clays from Penetration Pore Pressure. In: ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 114 (GT2), p. 209 – 216. ASCE, New York, 1988.

TAROZZO, H.; GRANDIS, I. Sequencia executiva. In: FALCONI, F. F. et al. Estacas Raiz: projeto, execução e controle. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 2000. Capítulo 3, p. 18-28.

TECTOOLS EQUIPAMENTOS PARA MINERAÇÃO (São Paulo, SP). Linha Mineração: catálogo. São Paulo, 200-?. 2 p.

TEIXEIRA, A.H. Um Aperfeiçoamento das Sondagens de Simples Reconhecimento à Percussão. In: SOLOS DO INTERIOR DE SÃO PAULO. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos – Núcleo Regional de São Paulo – ABMS. Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 1993, p. 75-93.

TEIXEIRA, A.H. Sondagens. In: Prospecção do Subsolo. Anais, ABMS – NE, v. único, Recife, 1977, p. 39-61.

TERZAGHI, K.; PECK, R. Soil Mechanics in Engineering Practice. New York, John Wiley and Sons Inc., 1948.

_____. Catálogo Geral de Produtos. Catálogo. Barueri – SP, Brasil, 2001. 44p.

TES CAR SRL – MACCHINE DA TRIVELLAZIONE. Catálogo de Perfuratrizes série CF 6. Osimo, Itália, 200-?. 12p.

_____. Catálogo da Perfuratriz CF 10. Osimo, Itália, 200-?. 4p.

_____. CF4 Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.tescar.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. CF6 Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.tescar.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. CF10 Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.tescar.com>>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. TCA 25 Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <http://www.tescar.com>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. TCA 30 Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <http://www.tescar.com>. Acesso em 14 set. 2010.

_____. TES 20 Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.tescar.com>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. TES 20 Compact Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.tescar.com>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. TES 40 Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.tescar.com>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. TES 40 Compact Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.tescar.com>>. Acesso em 13 set. 2010.

_____. TES 100 Hydraulic Drill. Itália, 200-?. Catálogo de perfuratriz. Disponível em: <<http://www.tescar.com>>. Acesso em 13 set. 2010.

THORBURN, S.; GREENWOOD, D.A. & FLEMMING, W.G.K. The response of sands to the construction of continuous flight auger piles. Proc. INT. CONFERENCE ON DEEP FOUNDATIONS ON BORED AND AUGERED PILES, 2, GHENT, BALKEMA, 1993.

VAN DER VEEN, C. The Bearing Capacity of Piles. In: ICSMFE, 3, 1953.

VAN IMPE, W.F. Two decades of full scale research on screw piles.

VAN IMPE, W.F. Influence of screw pile installation parameters on the overall pile behavior. Workshop Piled Foundations: Full Scale Investigations, Analysis and Design, Napels, 1994.

_____. Considerations on the auger pile design. Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Balkema, 1998. v.1. p. 193 – 218.

VELLOSO, D. A. Fundações: projetos, execução, patologia e reforço. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. 4., 2000, São Paulo. Anais... Vol. 2. São Paulo: ABEF/ABMS, 2000. p. 1-10.

VESIC, A.S. Experiments with instrumented pile group in sand. Performance of Deep Foundation, ASTM – Special Technical Publication, n. 444, p.171-222, 1969.

_____. General report on excavations and deep foundations. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOILS MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5^o, 1975a, Buenos Aires, Proceedings..., Buenos Aires, 1975a. v.5, p.373-387.

VIGGIANI, C. Further experiences with auger piles in Naples area. In: INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SEMINAR ON DEEP FOUNDATIONS ON BORED AND AUGER PILES, 2nd, 1993, Ghent-Belgium. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. P.445-458.

VORCARO, M.C., VELLOSO, D.A. Avaliação da carga última em estacas hélice contínua por regressão linear múltipla. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS – SEFE IV, 4^o, 2000a, São Paulo. Anais... São Paulo, A.B.M.S., 2000a. v.2, p. 315-330.

_____. Avaliação da carga última em estacas escavadas por regressão linear múltipla. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS – SEFE IV, 4^o, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo, A.B.M.S., 2000b, v.2, p.331-344.

WIRTH LATINA S.A. Catálogo de perfuratrizes e ferramentas. São Carlos, 12p., 19--?

WISEL, C.E. Some Factors Influencing in-situ vane test results. Proceedings VIII ICSMFE, Moscow, v.1, 1973, p.475-479.

WROTH, C.P.; HUGHES, J.M.O. An instrument for in situ measurement of the Properties of soft Clays. Tech. Report 13, Cambridge University, 1972.

WROTH, C.P.; The interpretation of in situ soil tests. Geotechnique, v.34, p. 449-489, 1984.

ZUQUETE, L.V. Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras. Tese de Doutorado. EESC/USP, 1987, 3v. 673p.