

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Modelo Reduzido de Linha de Ancoragem *Offshore*: Construção
de um Sistema de Ensaio para Avaliar Atenuação de Cargas
Estáticas**

Helder Mansur Chaves

Porto Alegre
2020

HELDER MANSUR CHAVES

**MODELO REDUZIDO DE LINHA DE ANCORAGEM
OFFSHORE: CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE ENSAIO
PARA AVALIAR ATENUAÇÃO DE CARGAS ESTÁTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre
2020

HELDER MANSUR CHAVES

**MODELO REDUZIDO DE LINHA DE ANCORAGEM
OFFSHORE: CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE ENSAIO
PARA AVALIAR ATENUAÇÃO DE CARGAS ESTÁTICAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, na área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de Março de 2020

Prof. Fernando Schnaid
Ph.D. University of Oxford, Reino Unido
orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
DR. Techn. Universität Innsbruck, Austria
coorientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D pela Concordia University, Canadá
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Ph.D pela Concordia University, Canadá

Prof. Cesar Alberto Ruver (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Edgar Odebrecht (UDESC)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho à minha família por todo apoio, dedicação e incentivo, que me fez perseverar diante de todas as dificuldades, principalmente nos momentos mais difíceis dessa jornada. Vocês são os responsáveis por esse vultoso estado de alegria em que me encontro, ao terminar mais uma etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço à Deus, meu grande provedor, por me sustentar ao longo de toda minha vida, me guardando de todo o mal, iluminando cada decisão tomada e me guiando segundo a sua vontade, toda honra e glória a ti meu senhor!

Agradeço a minha família por toda a educação e valores, que me repassam até os dias de hoje, fundamentais para a minha formação como ser humano. Pai e mãe, sei o valor de cada esforço despendido por vocês, assim como as privações que passaram para sustentar meus estudos. Sem vocês esse momento não seria uma realidade. Amanda e Letícia, vocês são os amores da minha vida, sinto saudades de vocês todos os dias, em breve estaremos juntos novamente, agradeço de coração todo o apoio que vocês me deram ao longo desses anos.

Agradeço especialmente ao grande amor da minha vida e amada esposa Laís Rodrigues da Costa Chaves, que sempre soube contornar com calma e responsabilidade as extremas situações que enfrentamos durante nossa caminhada de vida, dando-me forças para continuar lutando através dos estudos. Obrigado por nunca ter largado minhas mãos e pelo maior presente que já recebi em vida, nossa filha Heloísa da Costa Chaves, à qual dedico essa vitória.

Agradeço aos meus orientadores Fernando Schnaid e Marcelo Maia Rocha por todo apoio, conhecimento transmitido, confiança e disponibilidade em me orientar, mesmo diante de todas as dificuldades.

Agradeço aos professores Gérson Miranda, Nilo Consoli, Karla Heineck, Lucas Festugato, Cesar Ruver, Sérgio Marques e Edgar Odebrecht, pelo apoio, amizade, incentivo, motivação e disponibilidade em ajudar a qualquer momento durante a realização do mestrado.

Agradeço aos amigos que sempre estiveram presentes durante essa caminhada, Samuel Bandeira, Aziz Tebechrani, Gustavo Dias, Luciana Queiroz, Max Deluan, Augusto Borges, Bruna Spricigo, e a todos integrantes da PPGEC, especialmente à família LEGG.

Agradeço à UFRGS pela oportunidade em cursar um mestrado de excelência. Ao GEM, Integrante do LAMEF, que disponibilizou o equipamento para calibrar a instrumentação utilizada na pesquisa. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida, e à Petrobras, pelo financiamento deste trabalho, assim como o fornecimento dos dados utilizados no caso típico.

A educação é a arma mais poderosa que você pode usar
para mudar o mundo.

Nelson Mandela

RESUMO

CHAVES, H. M. **Modelo Reduzido de Linha de Ancoragem *Offshore*: Construção de um Sistema de Ensaio para Avaliar Atenuação de Cargas Estáticas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Este trabalho visa desenvolver um sistema de ensaio reduzido (escala de comprimento 1:10), com o objetivo de simular forças de tração aplicadas às linhas de ancoragem *offshore*. Através do modelo de ensaio, será possível estudar as forças que realmente são transmitidas aos elementos de fundação de sistemas de ancoragem *offshore*, que possibilitará o cálculo da atenuação de carga que ocorre na catenária inversa, formada no trecho da linha embutida no solo. O desenvolvimento da pesquisa foi baseado em um caso típico, fornecido pela empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), referente ao projeto de ancoragem de uma plataforma FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), que utiliza como elemento de fundação estacas torpedo, instaladas em solo marinho argiloso, ligadas à FPSO por linhas de ancoragem em configuração *taut leg*. Para simular a linha de ancoragem embutida no solo, foi utilizada uma corrente de elos, na qual será aplicada cargas de tração, por meio de uma talha manual presa à um tripé de sondagem SPT. Para realizar o embutimento da corrente no solo, será utilizado um conjunto de tubos metálicos de 37 mm e 16 mm de diâmetro externo e interno, respectivamente, que são normalmente utilizados no equipamento de sondagem CPTu. Para impedir grandes deslocamento do conjunto de tubos durante os ensaios e proporcionar a reação necessária às forças aplicadas, realizou-se em um dos seguimentos de tubo o acoplamento de duas aletas laterais, que tiveram suas dimensões determinadas através da modelagem numérica. O sistema de ensaio foi instrumentado com uma célula de carga instalada entre o tubo modificado e o segmento de corrente embutido no solo, e outra célula ligada na porção de corrente acima do solo, quantificando, respectivamente, a solicitação de carga gerada no tubo metálico e a carga externa aplicada. Logo, a atenuação de carga que ocorrer durante o ensaio, será determinada através da diferença das duas leituras.

Palavras-chave: *Atenuação de cargas; catenária invertida; modelo reduzido.*

ABSTRACT

CHAVES, H. M. **Reduced Model of Offshore Anchorage Line: Construction of a Test System for Evaluating Attenuation of Loads Static.** 2020. Master's theses Civil Engineering - Postgraduate program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

This work aims to develop a reduced test system (length scale 1:10), with the objective of simulating tensile forces applied to the offshore anchoring lines. Through the test model, it will be possible to study the forces that are actually transmitted to the foundation elements of offshore anchoring systems, which will enable the calculation of the load attenuation that occurs in the reverse catenary, formed in the stretch of the line embedded in the ground. The development of the research was based on a typical case, provided by the company Petróleo Brasileiro SA (Petrobras), related to the anchoring project of an FPSO platform (Floating, Production, Storage and Offloading), which uses torpedo piles as the foundation element, installed on clayey marine soil, connected to the FPSO by anchoring lines in taut leg configuration. To simulate the anchoring line embedded in the ground, a chain of links was used, in which traction loads will be applied, by means of a manual hoist attached to an SPT sounding tripod. To bury the chain in the ground, will be used a set of metal tubes of 37 mm and 16 mm of external and internal diameter, respectively, which are normally used in the drilling CPTu equipment. To prevent large displacement of the set of tubes during the tests and to provide the necessary reaction to the applied forces, two side fins were coupled in one of the tube segments, which had their dimensions determined through numerical modeling. The test system was instrumented with a load cell installed between the modified tube and the current segment embedded in the ground, and another cell connected in the current portion above the ground, quantifying, respectively, the load demand generated in the metal tube and the external load applied. Therefore, the load attenuation that occurs during the test, will be determined by the difference between the two readings.

Key-words: *Attenuation of loads; reverse catenary; reduced model.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 ASPECTOS GERAIS	11
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 OBJETIVO GERAL	14
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO OFFSHORE	15
2.2 SISTEMA DE ANCORAGEM	18
2.3 PRINCIPAIS ELEMENTOS DAS LINHAS DE ANCORAGEM	18
2.3.1 Amarras	18
2.3.2 Cabos de Aço	19
2.3.3 Cabos sintéticos	20
2.3.4 Boias de Ancoragem	21
2.4 CONFIGURAÇÕES DE LINHAS DE ANCORAGEM	21
2.4.1 Linha de Ancoragem em Catenária	21
2.4.2 Linha de Ancoragem de Raio Curto (<i>Taut Leg</i>)	22
2.4.3 Linha de Ancoragem Vertical	23
2.5 SISTEMAS DE AMARRAÇÃO	24
2.5.1 Ancoragem em Ponto Único (SPM)	24
2.5.2 Amarração com Quadro de Ancoragem (SM)	26
2.5.3 Posicionamento Dinâmico (DP)	27
2.6 FUNDAÇÕES PARA ANCORAGEM DE SISTEMAS FLUTUANTES	28
2.6.1 Estaca Cravada por Sucção	28

2.6.2 Âncora Convencional	28
2.6.3 Âncora Vertical (Vertically Loaded Anchor - VLA)	29
2.6.4 Estaca Torpedo	30
2.7 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CRAVAÇÃO DA ESTACA TORPEDO	33
2.7.1 Taxa de deformação do solo (Se)	34
2.7.2 Forças Resistentes do solo	34
2.7.3 Força inercial de arrasto	35
2.8 EQUILÍBRIO DA CATENÁRIA INVERSA (EMBUTIDA NO SOLO) E ATENUAÇÃO DE CARGAS	36
2.8.1 Reese (1973)	36
2.8.2 Gault e Cox (1974)	37
2.8.3 Vivatrat et al (1982)	37
2.8.4 Degenkamp e Dutta (1989)	38
2.8.5 Amaral e costa (2004)	44
2.8.6 Wang et al (2010)	45
2.8.7 Rocha (2014)	46
2.8.8 Sampa (2015)	50
3 ESTUDO DE CASO: CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO DE ANCORAGEM DE UMA PLATAFORMA FPSO	52
3.1 CASO TÍPICO	52
3.1.1 Características Geotécnicas	52
3.1.2 Características Geométricas e Físicas do Sistema de Ancoragem	56
3.1.3 Características das Cargas Aplicadas ao Sistema	58
4 ESTUDO DO FATOR DE ESCALA	59
4.1 ANÁLISE DO EFEITO DE ESCALA	59
4.1.1 Análise Dimensional	59
4.2 ANÁLISE DIMENSIONAL APLICADA AO CASO TÍPICO	64
4.2.1 Conversão de Escala Aplicada ao Solo	66

4.2.2 Conversão de Escala Aplicada à Linha de Ancoragem	66
3.2.3 Conversão de Escala Aplicada ao Carregamento	66
5 MATERIAIS E MÉTODOS	67
5.1 CAMPO EXPERIMENTAL DE TUBARÃO	67
5.2 DIMENSIONAMENTO DAS ALETAS	73
6 EQUIPAMENTOS	80
6.1 GUIA DE ANCORAGEM	80
6.2 LINHAS DE ANCORAGEM	82
6.3 CÉLULAS DE CARGA	83
6.3.1 Instrumentação das Células de Carga	85
6.3.2 Calibração Das Células de Carga	87
6.4 SISTEMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	89
6.5 SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA	90
7 ROTEIRO DE ENSAIO	91
7.1 ETAPA PRELIMINAR	91
7.2 MONTAGEM DO SISTEMA DE ENSAIO	92
7.3 EXECUÇÃO DO ENSAIO	95
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
8.1 CONCLUSÕES	97
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS	99
ANEXO A	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Geometria das linhas de ancoragem: (a) lançamento da estaca torpedo; (b) linha de ancoragem ligada à plataforma flutuante	11
Figura 2.1: plataformas semissubmersíveis (ASSIS, J. S. de, 2013)	16
Figura 2.2: Plataforma FPSO - P54 (PETROBRAS, 2007)	16
Figura 2.3: SPAR convencional (SAMPA, N. C., 2015)	17
Figura 2.4: SPAR treliçado (VILLELA, M. J. R., 2004)	17
Figura 2.5: Plataforma de pernas atirantadas (DILLINGER, 2006 apud MELO, C. M. de A. R., 2010)	17
Figura 2.6: Representação dos tipos de amarras (LIMA, D. A., 2011)	19
Figura 2.7: Componentes de um cabo multi-strand (LIMA, D. A., 2011)	20
Figura 2.8: Representação dos cabos de aço (API, 2005 apud ROCHA. C. C.M., 2014)	20
Figura 2.9: Composição do cabo de poliéster (LIMA, A. L., 2006)	21
Figura 2.10: Linha de ancoragem em catenária (LARCERDA, T. A. G. de, 2005)	22
Figura 2.11: Comparação entre ancoragem em catenária convencional e ancoragem em <i>taut leg</i>	23
Figura 2.12: Linhas de ancoragem vertical com tendões (KAWASAKI, P. Y., 2010) ..	24
Figura 2.13: sistema SPM com <i>turret</i> externo (ASSIS, J. S. de, 2013)	25
Figura 2.14: sistema CALM. (LIMA, D. A., 2011)	25
Figura 2.15: Sistema SALM com riser pré-tracionado e boia de flutuação (baseado em: LIMA, D. A., 2011)	26
Figura 2.16: Amarração em quadro de ancoragem (LIMA, A. L., 2006)	27
Figura 2.17: Sistema de Posicionamento dinâmico. (KAWASAKI, P. Y., 2010)	27
Figura 2.18: Estacas de sucção. (RANDOLPH <i>et al</i> , 2005)	28
Figura 2.19: Âncora convencional. (KAWASAKI, P. Y., 2010)	29
Figura 2.20: Âncora vertical. (API RP 2 SK, 2005 apud KOCHER, R. M., 2016)	30
Figura 2.21: Estaca torpedo (SAMPA, N. C., 2015)	31

Figura 2.22: Estaca torpedo pronta para lançamento (ROCHA, M. M. <i>et al</i> 2016)	31
Figura 2.23: Procedimento de instalação da estaca torpedo	32
Figura 2.24: Forças que atuam na cravação de um elemento cilíndrico (ROCHA. C. C. M., 2014)	33
Figura 2.25: Equilíbrio de forças de um elemento da linha de ancoragem enterrada no solo (VIVATRAT, V. et al., 1982)	37
Figura 2.26: Diagrama de forças de um elemento da amarra enterrada no solo (DEGENKAMP, G.; DUTTA, A.,1989)	39
Figura 2.27: Representação esquemática da configuração utilizada no teste (DEGENKAMP, G.; DUTTA, A.,1989)	41
Figura 2.28: Ângulo de aplicação de carga - medido versus calculado (DEGENKAMP, G.; DUTTA, A.,1989)	42
Figura 2.29: Tensão aplicada à estaca - medida versus calculada (DEGENKAMP, G.; DUTTA, A.,1989)	43
Figura 2.30: Carga na ancora versus carga no TDP para diferentes penetrações da estaca (AMARAL, C. dos S.; COSTA, A. M. dos, 2004)	45
Figura 2.31: Ângulo de aplicação de carga na ancora x no TDP para diferentes penetrações (AMARAL, C. dos S.; COSTA, A. M. dos, 2004)	45
Figura 2.32: Estrutura metálica e tanque acrílico desenvolvidos para o ensaio (ROCHA, C. C.M., 2014)	47
Figura 2.33: Esquema do sistema de ensaio (ROCHA. C. C.M., 2014)	48
Figura 2.34: Resultados dos ensaios de atenuação nas argilas A e B. (ROCHA. C. C.M., 2014)	49
Figura 2.35: Comparação da atenuação <i>versus</i> ângulo nominal nas diferentes condições de ensaio (ROCHA. C. C.M., 2014)	50
Figura 2.36: Conjunto de equipamentos utilizados para a realização do ensaio de carregamento dinâmico (SAMPA, N. C., 2015)	51
Figura 3.1: Curvas granulométricas do solo marinho do campo Guará (Dados fornecidos pela Petrobras)	53
Figura 3.2: Curvas granulométricas do solo marinho do campo Lula (Dados fornecidos pela Petrobras)	53
Figura 3.3: Curvas granulométricas do solo marinho do campo Lula NE (Dados fornecidos pela Petrobras)	54

Figura 3.4: Variação do teor de umidade em função da profundidade, nos três campos (Dados fornecidos pela Petrobras)	54
Figura 3.5: Variação do peso específico em função da profundidade nos três campos (Dados fornecidos pela Petrobras)	55
Figura 3.6: Limites de Atterberg em função da profundidade nos três campos (Dados fornecidos pela Petrobras)	55
Figura 3.7: Resistência não drenada ao longo da profundidade obtidas nos ensaios de CPTu e DSS (Dados fornecidos pela Petrobras)	56
Figura 3.8: Esquema ilustrativo do caso típico analisado	57
Figura 3.9: Espectro de cargas que atuam no <i>fairlead</i> e no TDP	58
Figura 5.1: Localização do município de tubarão (adaptado de HIGASHI. F. A. dos R., 2006)	67
Figura 5.2: Sistemas deposicionais quaternários do delta do Rio Tubarão (adaptado de GIANNINI. P. C. F., 2010)	69
Figura 5.3: Localização das regiões onde foram realizadas as campanhas de ensaio para definição do local de ensaio desta pesquisa (imagens do Google Earth pro em 15/01/2020)	70
Figura 5.4: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 04 (furo 01)	71
Figura 5.5: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 04 (furo 02)	71
Figura 5.6: Tubos de Shelby com amostras coletadas em campo	72
Figura 5.7: superfícies de escoamento: a) superfície de Tresca no plano - com lei de fluxo associada; b) superfícies de Mohr-Coulomb e Tresca no espaço das tensões principais (adaptado de Systèmes, D., 2016)	74
Figura 5.8: Malhas de elementos finitos: (a) malha aplicada aos tubos metálicos e às aletas; (b) malha aplicada ao maciço de solo	76
Figura 5.9: Condições de contorno aplicadas ao modelo (deformação do maciço de solo aumentada em 2.000 vezes)	77
Figura 5.10: Deslocamentos paralelos ao eixo de aplicação da força	78
Figura 5.11: Esquema da guia de ancoragem modelada	79
Figura 6.1: Projeto da guia de ancoragem	80
Figura 6.2: Guia de ancoragem: (a) tubo metálico com as aletas; (b) detalhe do furo oblongo; (c) detalhe do elo de ligação	81

Figura 6.3: Sistema de cravação (SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E., 2012)	82
Figura 6.4: Geometria/diâmetro das correntes: (a) 13 mm; (b) 11 mm	82
Figura 6.5: Detalhamento da célula de carga (ROCHA, M. M., 2020)	83
Figura 6.6: ábaco de concentração de cargas (ROCHA, M. M., 2020)	84
Figura 6.7: Proteções adicionais às células de carga (ROCHA, M. M., 2020)	85
Figura 6.8: Especificações técnicas da manilha utilizada	85
Figura 6.9: Duas faces instrumentadas de cada célula de carga (ROCHA, M. M.; 2020)	86
Figura 6.10: Prensa utilizada na calibração da célula de carga	87
Figura 6.11: Gráfico de calibração da CCI	88
Figura 6.12: Gráfico de calibração da CCS	88
Figura 6.13: Sistema de aquisição de dados	89
Figura 6.14: Talha manual utilizada para aplicar carga	90
Figura 6.15: Tripé de sondagem SPT	90
Figura 6.16: Especificações técnicas do mosquetão utilizado	90
Figura 7.1: escavação necessária para a realização do ensaio	92
Figura 7.2: Disposição espacial dos equipamentos antes do ensaio	94
Figura 7.3: Tirfor com alavanca manual (2 toneladas)	95
Figura 7.4: Disposição espacial dos equipamentos ao término da primeira etapa do ensaio	96
Figura A.1: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 01 (furo 01), nível de água = -0,5 m	103
Figura A.2: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 02 (furo 01), nível de água = -1,0 m	104
Figura A.3: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 02 (furo 02), nível de água (n.a.) = -1,0 m	105
Figura A.4: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 03 (furo 01), nível de água (n.a.) = -0,55 m	106
Figura A.5: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 03 (furo 02), nível de água (n.a.) = -0,60 m	107

Figura A.6: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 04 (furo 01), nível de água (n.a.) = -0,50 m	108
Figura A.7: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 04 (furo 02), nível de água (n.a.) = -0,50 m	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores de atenuação de cargas em solo argiloso	43
Tabela 3.1: Características da linha de ancoragem	57
Tabela 4.1: Grandezas fundamentais (SI)	60
Tabela 4.2: Expoentes dimensionais de grandezas utilizadas em análise dinâmica estrutural	61
Tabela 4.3: Grandezas de base e suas derivadas a partir da escala de comprimento 1:10	65
Tabela 5.1: Caracterização em laboratório do solo de Tubarão	72
Tabela 6.1: Característica Técnicas do acelerômetro ADXL 203	86

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACISLA	Atenuação de cargas pela interação solo-estrutura em linhas de ancoragem
A_f	Área frontal da estaca
A_L	Área lateral
AP	Antes do presente
API	<i>The American Petroleum Institute</i> - Instituto Americano de Petróleo
B	Base maior da aleta
b	Base menor da aleta
CALM	<i>Catenary Anchor Leg Mooring</i> - Amarração com suporte de ancoragem em catenária
CCI	Célula de carga inferior
CCS	Célula de carga superior
CPTu	<i>Piezcone Penetration Test</i> - ensaio de penetração de cone
C_ϵ	Coefficiente empírico da taxa de deformação
C_0	Constante empírica da taxa de deformação
C_D	Coefficiente de arrasto
D_p	Profundidade de penetração da estaca
d	Diâmetro da estaca
DIGIN	<i>Software</i> de projetos de ancoragens <i>offshore</i> desenvolvido pela DNV
DP	<i>Dynamic Position</i> - Posição dinâmica
DSS	<i>Direct Simple Shear</i> - ensaios de cisalhamento direto simples
DVN	Det Norske Veritas - Empresa que atua no segmento marítimo, petróleo e gás

$d_{\bar{\varepsilon}^p}$	Vetor incremental de deformações plásticas normais à superfície de escoamento
$d_{\varepsilon_v^p}$	Deformações plásticas volumétricas
d_e	Densidade do solo submerso
dS	Unidade de comprimento
D	Diâmetro nominal da linha ou de um elo da amarra
e	Tempo
EWB	Fator de conversão de diâmetro equivalente para força normal
EWS	Fator de conversão de diâmetro equivalente para força tangencial
FPSO	<i>Floating, Production, Storage and Offloading</i> - Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e transbordo.
f_h	Componente horizontal da força máxima aplicada à corrente
F_a	Força aplicada à corrente
<i>fairlead</i>	Ponto de conexão entre a linha de ancoragem e a plataforma flutuante
F_D	Força inercial de arrasto
F_L	Força de atrito latera
F_p	Resistência de ponta
f	Resistência tangencial por unidade de comprimento
g	Aceleração da gravidade
G	Módulo cisalhante
GEM	Grupo de Ensaio Mecânicos
h	Altura da aleta
I_r	Índice de rigidez
k	Fator de carregamento
K_0	Coefficiente de empuxo em repouso do solo
kN	Kilonewton
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física

LEGG	Laboratório de Ensaio Geotécnicos e Geoambientais
M'	Massa efetiva
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEMS	<i>Micro-Electromechanical System</i> - Sistema Micro-Eletromecânico
N_c	Fator de capacidade de carga
ORQ	<i>Oil Rig Quality</i> - Qualidade de plataforma petrolífera
<i>padeye</i>	Ponto de ligação entre a estaca e a linha de ancoragem
PROCAP	Programa de capacitação tecnológica em águas profundas
PROJETIL	Programa computacional para cálculo de profundidade de cravação da estaca
p	Resistência normal do solo por unidade de comprimento
q	Resistência normal por unidade de comprimento
ROV	<i>Remote Operated Vehicle</i> - Veículo operado remotamente
SALM	<i>Single Anchor Leg Mooring</i> - Amarração com suporte de ancoragem única
Sc	Estado de Santa Catarina
S_e	Fator empírico da máxima taxa de deformação do solo em altas velocidades
SI	Sistema Internacional de Grandezas
S_{ti}	Perda de resistência ao cisalhamento de argilas almogadas
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada
SM	<i>Spread Mooring</i> - Amarração em quadro de ancoragem
SPM	<i>Single Point Mooring</i> - Amarração de ponto único
SPT	<i>standard penetration test</i> - Teste de penetração padrão
T	Força de tração
TDP	<i>Touch down point</i> - ponto em que a linha de ancoragem toca o leito marinho
TLP	<i>Tension Leg Platform</i> - Plataformas de pernas atirantadas
T_i	Força de tração na extremidade superior do segmento da amarra
T_{i+1}	Força na extremidade inferior do segmento da amarra
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

v	Velocidade da estaca
VLA	<i>Vertical Load Anchor</i> - Âncora Vertical
W_s	Peso submerso da estaca
w	Peso da corrente por unidade de comprimento
Z	Profundidade
z	Comprimento
ΔZ	Varição da profundidade
α	Fator de adesão do solo
θ	Ângulo formado entre a corrente e o eixo vertical
θ_0	Ângulo na extremidade superior do segmento da amarra
θ_i	Ângulo inicial considerado na extremidade superior do segmento da amarra
θ_{i+1}	Ângulo final considerado na extremidade inferior do segmento da amarra
ρ	Massa específica
ν	Coefficiente de Poisson
ϕ	Ângulo de atrito interno
Ω	Resistência elétrica
Δs	Comprimento do segmento da corrente

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será discutido o foco central do trabalho, referente ao cálculo da atenuação de carga que ocorre devido a interação entre o solo e o segmento de amarra embutido nele. Desta forma, será descrito de forma breve os aspectos gerais deste estudo, a relevância e a justificativa para sua realização. Além disso, serão definidos os objetivos geral e específicos que se deseja alcançar.

1.1 ASPECTOS GERAIS

Na instalação de sistemas de ancoragem *offshore* que utilizam suas linhas de ancoragem (amarras) na configuração *taut leg* e estacas torpedo como elementos de fundação, ocorre a formação de uma catenária invertida dentro do solo. Durante o lançamento e a cravação do torpedo, a linha de ancoragem permanece na posição vertical (figura 1.1-a), sendo posteriormente tracionada para ser ligada à plataforma flutuante (figura 1.1-b), formando ângulos que variam entre 40° e 45° , em relação ao eixo vertical. É exatamente durante esse processo que ocorre a formação da catenária invertida, devido à resistência perpendicular que o solo oferece ao movimento de corte da linha.

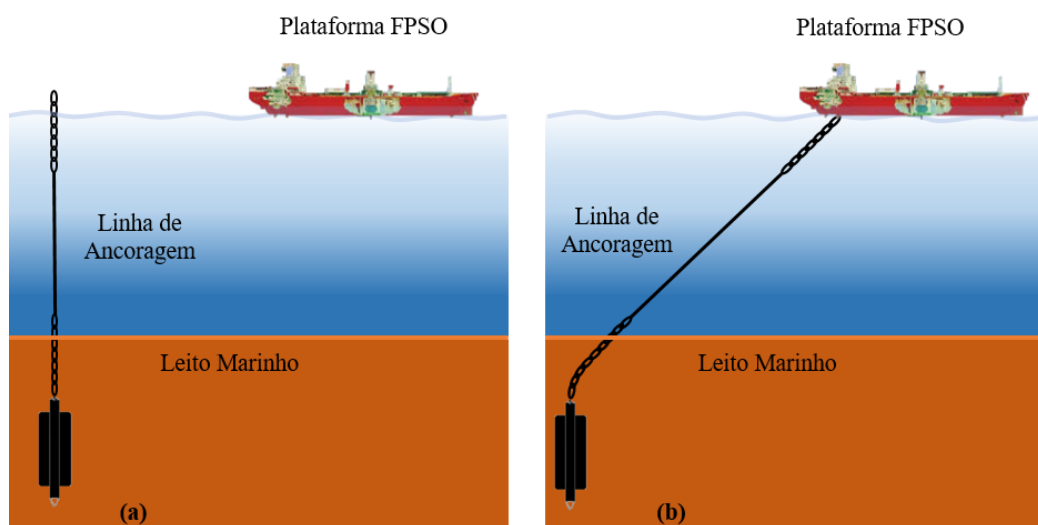


Figura 1.1: Geometria das linhas de ancoragem: (a) lançamento da estaca torpedo; (b) linha de ancoragem ligada à plataforma flutuante.

Diversos pesquisadores têm estudado esse sistema de ancoragem, visando estimar a dissipação de carga que ocorre no trecho da linha de ancoragem embutido no solo, devido ao mecanismo de interação entre o solo e a amarra. Dessa forma, busca-se entender a distribuição de carga ao longo da catenária embutida, assim como a configuração geométrica assumida por ela dentro do solo, o que possibilitará determinar as variáveis e os parâmetros que regem essa interação.

O presente trabalho faz parte do projeto: **atenuação de cargas pela interação solo-estrutura em linhas de ancoragem (ACISLA)**, criado a partir de uma parceria entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), conduzido no intuito de se elaborar um sistema de ensaio reduzido na escala de comprimento 1:10, que permite determinar a atenuação de cargas que ocorre em linhas de ancoragem embutidas no solo. Esse sistema, baseado nos dados de um projeto de ancoragem *offshore* fornecido pela Petrobras, é composto por: correntes de elo, que simulam a amarra utilizada na linha de ancoragem, embutida no solo; um conjunto de tubos mecânicos de 37 mm e 16 mm de diâmetro externo e interno, respectivamente, utilizado para embutir a corrente ensaiada no solo; e uma talha manual, que será utilizada na aplicação progressiva de cargas (tração) à corrente, durante a realização do ensaio.

A aquisição de dados será feita através de uma célula de carga superior (CCS), ligada na porção livre da corrente ensaiada, disposta acima da superfície, possibilitando o controle da carga aplicada; e uma célula de carga inferior (CCI), instalada no ponto de ligação entre a corrente e o tubo metálico, quantificando as forças que são transmitidas à extremidade inferior da corrente. Logo, os resultados dos ensaios permitirão quantificar a atenuação de cargas que ocorreram no trecho da amarra enterrada no solo, através da diferença entre a força aplicada na extremidade superior da corrente, medida pela CCS, e a força que chega à extremidade inferior, medida pela CCI.

Diante do exposto, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de metodologias de análise do desempenho geomecânico das linhas de ancoragem em depósitos argilosos, submetidas a carregamentos estáticos, que buscam quantificar a atenuação de carga ocorrida na interação solo-amarra. Colaborando com os estudos anteriores, de Rocha (2014) e Sampa (2015), realizados através de ensaios de laboratório com o emprego de modelo reduzido na escala 1:40, nos quais os autores encontraram atenuações máximas de 14 % e 18,3 %, respectivamente.

1.2 JUSTIFICATIVA

A grande necessidade de fontes energéticas no mundo, em escala doméstica e industrial, tornou a exploração de petróleo, principal fonte utilizada, mais intensa em depósitos *onshore* e *offshore* de águas rasas. Com a crescente diminuição desses tipos de reservas, a exploração avançou para campos marítimos *offshore* de águas profundas e ultraprofundas, com lâminas de água próximas aos 3.000 m de profundidade, tornando as estruturas utilizadas em águas rasas, como as plataformas fixas e auto-eleváveis, limitadas tecnicamente e economicamente, pois são recomendados para profundidades máximas de aproximadamente 500 m.

Frente a esse cenário, introduziu-se os sistemas flutuantes, que são estruturas ligadas, através de linhas de ancoragem, à âncoras ou estacas inseridas no subleito marinho. Elas são utilizadas, principalmente, para bombeamento, processamento e armazenamento de petróleo. As linhas de ancoragem são compostas por amarras e/ou cabos de aço (ou sintéticos), que podem ser organizados em diferentes arranjos geométricos, dependendo do tipo de fundação. As principais configurações utilizadas são: a ancoragem em catenária, a vertical e a *taut leg*.

Envolvida no processo de avanço tecnológico, a Petrobras desenvolveu um elemento de fundação, denominado estaca torpedo, que consiste em uma estaca cilíndrica tubular, de aço, preenchida com material de alta densidade. A estaca apresenta em sua extremidade inferior uma ponta cônica, que facilita a cravação da mesma por ação da gravidade, através da energia cinética adquirida durante o lançamento, resultante do seu peso próprio. Com esse elemento de fundação, geralmente utiliza-se linhas de ancoragem em configuração *taut leg*, que durante o seu processo de instalação, formam uma catenária invertida dentro do solo, por conta das cargas de tração que são aplicadas pela estrutura flutuante.

Esse sistema de ancoragem tem sido validado e aprimorado por meio da combinação de análises teóricas e ensaios experimentais, que comprovam sua eficiência quanto a penetração da estaca e capacidade de carga. Recentemente, tem-se estudado de maneira aprofundada a magnitude das cargas, geradas pela plataforma flutuante, que realmente são transmitidas aos elementos de fundação, pois sabe-se que devido a interação entre o solo marinho e parte da amarra embutida nele, ocorre uma relevante dissipação de parte das cargas aplicadas às linhas de ancoragem. Se essa atenuação for devidamente compreendida e quantificada, poderá ser incorporada nas rotinas de cálculo dos projetos, que passarão a apresentar estimativas mais precisas, resultando

em projetos mais econômicos, devido à redução do tamanho das estacas e/ou da profundidade de cravação.

Diante disso, esta dissertação representa um importante avanço no conhecimento da interação solo-estrutura em linhas de ancoragem, através do desenvolvimento de um aparato experimental para quantificar e avaliar a atenuação de carga que ocorre nesse processo, retornando um ganho de experiência importante para a comunidade acadêmica e mercado petrolífero.

1.3 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem por objetivo principal, confeccionar os componentes de um sistema de ensaio em modelo reduzido 1:10, que permitirá avaliar e quantificar a atenuação das cargas que solicitam os elementos de fundação das linhas de ancoragem em configuração *taut leg*, devido a dissipação de forças que ocorre na interação solo-amarra.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) realizar a análise dimensional para a definição do fator de escala.
- b) realizar o dimensionamento de aletas laterais, através de modelagem numérica, que serão acopladas ao tubo metálico.
- c) validar a instrumentação desenvolvida especialmente para o ensaio.
- d) desenvolver um roteiro voltado para a execução do ensaio em campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO *OFFSHORE*

A exploração *offshore* é realizada por plataformas marítimas que, geralmente, têm como função a extração, processamento e armazenamento do petróleo. Elas estão divididas em dois grandes grupos, as fixas e flutuantes, onde a escolha de cada tipo depende de aspectos técnicos, principalmente da finalidade da unidade e da profundidade de lâmina d'água, aliados ao fator econômico.

As plataformas fixas apresentam-se como uma solução tradicional para a exploração de petróleo em águas rasas, com lamina d'água inferiores a 500 m de profundidade, elas englobam as plataformas de aço (jaqueta), torres complacentes, plataformas de gravidade e plataformas auto-elevatórias. Conforme a exploração avança para águas profundas e ultraprofundas seu emprego torna-se inviável, pois nessas situações as estruturas sofrem solicitações extremas provocadas pelas forças ambientais, logo seria imprescindível a utilização de estruturas de grandes dimensões para resisti-las, o que elevaria o custo de projeto e as dificuldades técnicas para a sua implantação.

Diante da necessidade de avanço tecnológico para atender esse cenário, foram desenvolvidas as plataformas flutuantes, estruturas que mantêm o seu posicionamento através de elementos de ancoragem, que se comportam como um sistema complacente permitindo a ocorrência de deslocamentos horizontais e verticais resultantes das solicitações ambientais, garantindo dessa forma estabilidade e segurança para as operações diárias da exploração de recursos energéticos em águas profundas e ultraprofundas. Os tipos de plataformas mais utilizados são:

- a) plataformas semissubmersíveis: é uma estrutura apoiada em flutuadores submersos vazados, denominados de *pontoons* (figura 2.1). O sistema de linhas de ancoragem responsável pelo posicionamento da unidade flutuante é constituído de 12 a 16 âncoras, que se ligam à estrutura através de cabos e/ou amarras, que podem apresentar configuração no tipo convencional (catenária livre) ou *taut leg*;



Figura 2.1: plataformas semissubmersíveis (ASSIS, J. S. de, 2013).

- b) plataforma FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading): são navios (figura 2.2) que realizam o processamento, armazenamento e transbordo do petróleo e/ou gás natural. O navio apresenta uma planta de processo para separar e tratar a matéria extraída dos poços (SILVA, 2017);



Figura 2.2: Plataforma FPSO - P54 (PETROBRAS, 2007).

- c) plataforma Spar: É composta de um casco de seção transversal cilíndrica que é posicionado verticalmente na água e apresentam tanques de flutuação acoplados na parte superior da estrutura. A plataforma é ancorada através do sistema tipo catenária ou *taut leg*. As duas configurações mais utilizadas são a do SPAR convencional (figura 2.3) e SPAR treliçado (figura 2.4);



Figura 2.3: SPAR convencional.
(SAMPA, N. C., 2015).



Figura 2.4: SPAR treliçado.
(VILLELA, M. J. R., 2004).

d) plataformas de pernas atirantadas (*Tension Leg Platform-TLP*): É bastante semelhante à plataforma semisubmersível, sendo ancorada principalmente através de tirantes instalados no leito marinho (figura 2.5), ligados às plataformas por meio de tubos de metal ou materiais compósitos. Apresentam alta rigidez no eixo vertical do sistema, gerando movimentos com amplitudes reduzidas;

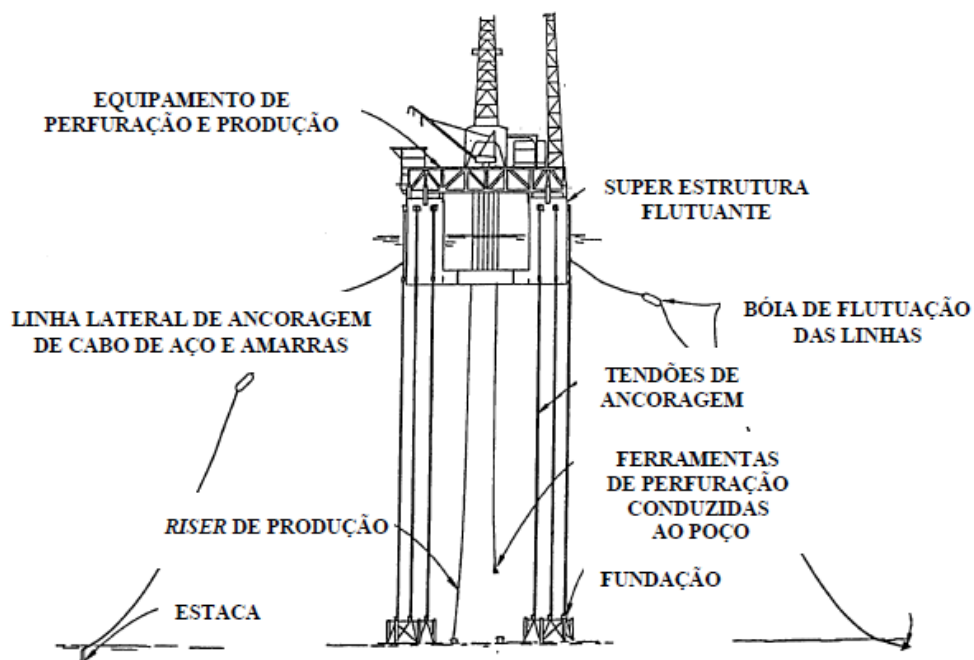


Figura 2.5: Plataforma de pernas atirantadas (DILLINGER, 2006 apud MELO, C. M. de A. R., 2010).

2.2 SISTEMA DE ANCORAGEM

O sistema tem por finalidade a restrição dos movimentos da unidade flutuante, conforme os limites de deslocamentos previstos em projeto, que são gerados por conta dos diversos carregamentos ambientais que solicitam a estrutura. Ele funciona fornecendo forças de restauração para manter em posição os sistemas flutuantes, garantindo a viabilidade e segurança das atividades de exploração.

Basicamente os sistemas de ancoragem são compostos por um conjunto de linhas de ancoragem, que ligam a estrutura flutuante a um determinado ponto no elemento de fundação, âncoras ou estacas presentes no leito marinho, principal responsável pela transferência dos esforços ambientais, sofridos pela plataforma, para o solo.

As linhas de ancoragem podem apresentar diversas configurações espaciais e ponto de amarração, variando de acordo com o tipo de fundação, profundidade da lâmina d'água, tipo de operação, custo de implantação e etc. Geralmente elas são compostas de amarras, cabos de aço e/ou cabos de poliéster.

2.3 PRINCIPAIS ELEMENTOS DAS LINHAS DE ANCORAGEM

2.3.1 Amarras

As amarras são correntes de alta resistência, composta por elos fabricados com aço, e são o tipo de elemento mais comumente empregado na ancoragem convencional. As dimensões de um elo da corrente são múltiplas do seu diâmetro e podem ser do tipo com ou sem malhete (Figura 2.6), sendo o primeiro tipo mais utilizado na ancoragem de plataformas flutuantes (KOCHEM, 2016).

Geralmente as amarras são utilizadas em conjunto com outro componente, pois somente o emprego delas não é viável, devido ao seu alto peso linear, o que afeta a flutuabilidade da plataforma e a capacidade de restauração da linha (ROCHA, 2014). Elas são utilizadas nos trechos iniciais e finais das linhas, por ser um material mais resistente ao desgaste e abrasão decorrente do contato com o leito marinho e dos guinchos presentes nas unidades flutuantes. Outro benefício, é o fato da amarra ligada ao elemento de fundação não aplicar cargas verticais nele, devido ao seu alto peso que faz com que ela fique apoiada no leito marinho.

Elas podem ser classificadas, conforme a resistência ao escoamento do aço utilizado na fabricação, em R3 (grau 3), ORQ (*Oil Rig Quality*) e R4 (mais resistente). Para conectar duas partes de correntes deve-se utilizar um componente metálico, e o mais empregado é o elo Kenter, que apresenta resistência à ruptura igual ou superior a uma corrente com a mesma dimensão, porém possui menor resistência à fadiga, sendo recomendado a utilização do menor número possível deles na linha de ancoragem.

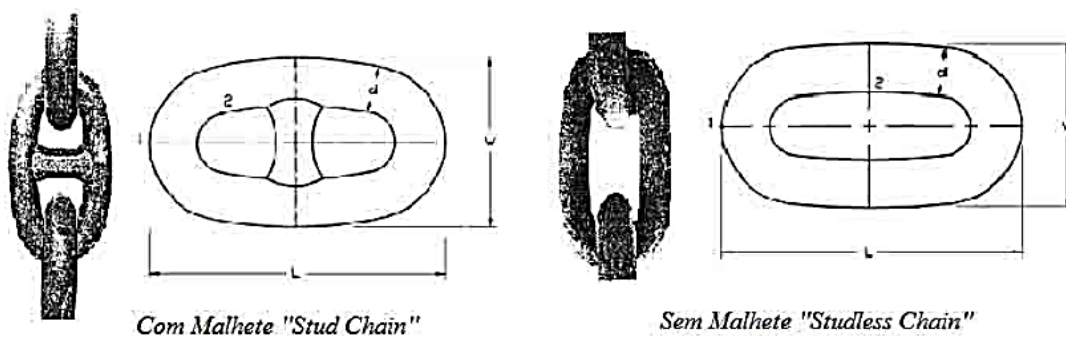


Figura 2.6: Representação dos tipos de amarras (LIMA, D. A., 2011).

2.3.2 Cabos de Aço

Os cabos de aço são constituídos por diversos fios enrolados, em forma helicoidal, em um componente central. Esse conjunto é denominado de perna, e apresenta elevada rigidez axial e flexibilidade. De maneira geral, eles são divididos em dois tipos, o *single-strand*, que possui apenas uma perna, e os *multi-strand*, formados por diversas pernas em um único cabo (figura 2.7). Eles são especificados através de dois números, o primeiro representa a quantidade de pernas torcidas e o segundo a quantidade de fios em cada perna.

As tranças metálicas que compõem os cabos de aço são mais suscetíveis à corrosão do que as amarras, apresentando vida útil inferior, logo para maior durabilidade o aço empregado deve passar por um tratamento de galvanização durante sua fabricação.

A figura 2.8 mostra os dois principais cabos utilizados para ancorar unidades flutuantes, o *six-strand* e o *spiral-strand*. O primeiro tipo é amplamente empregado em unidades de perfuração, por apresentar fácil manuseio. Já o segundo, por possuir alta resistência e durabilidade, é mais comumente utilizado nas unidades de produção, porém ele apresenta maior custo se comparado com o anterior.

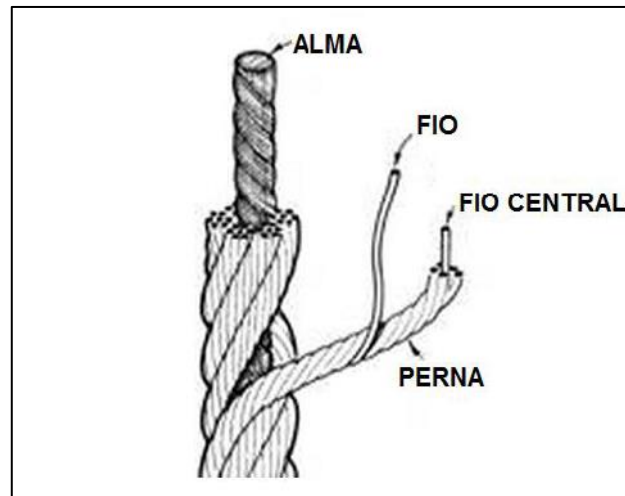


Figura 2.7: Componentes de um cabo multi-strand (LIMA, D. A., 2011).

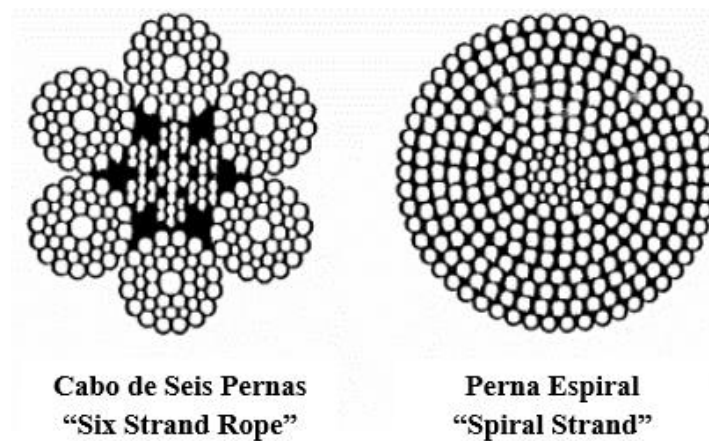


Figura 2.8: Representação dos cabos de aço (API, 2005 apud ROCHA. C. C.M., 2014).

2.3.3 Cabos Sintéticos

O principal cabo sintético utilizado em linhas de ancoragem é o de poliéster (figura 2.9), que possui a mesma carga de ruptura nominal, maior flexibilidade axial e menor peso submerso quando comparados com os cabos de aço e amarras, o que viabiliza seu emprego em laminais d'água ultraprofundas.

Os cabos de poliéster se apresentaram como uma solução viável em sistemas de ancoragem do tipo *taut leg*, utilizados em conjunto com as amarras e os cabos de aço, tendo em vista que esse tipo de ancoragem permite um grande alongamento da linha, papel desempenhado pelo cabo poliéster, responsável pela absorção da energia gerada pelos movimentos dinâmicos que solicitam a estrutura flutuante.

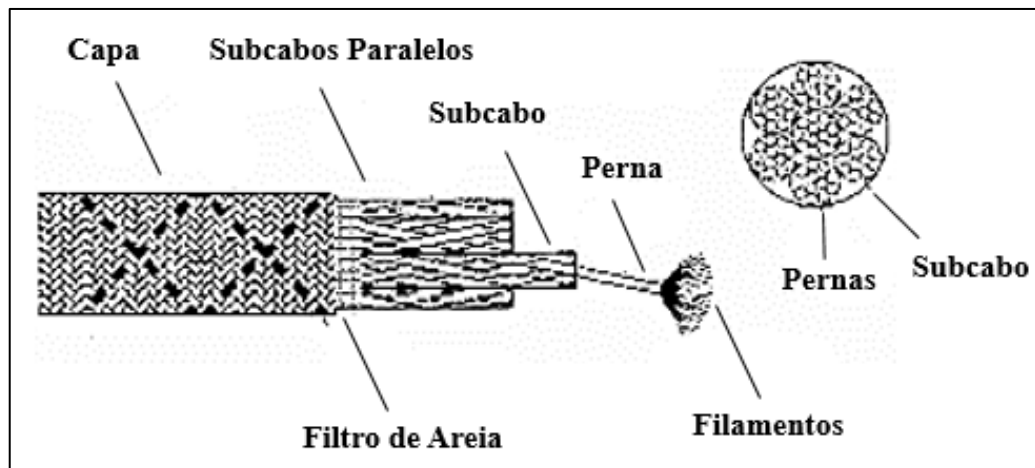


Figura 2.9: Composição do cabo de poliéster (LIMA, A. L., 2006).

2.3.4 Boias de Ancoragem

As boias possuem um formato cilíndrico e são projetadas para resistir à pressão hidrostática, seu emprego visa aliviar o peso da linha de ancoragem que é transferido para a estrutura flutuante, diminuir o seu nível de tração, assim como o passeio de um dado comprimento de linha. Elas podem ser de superfície ou submersas, ressalta-se que o primeiro tipo serve também como indicador da localização das linhas de ancoragem, e são fabricadas em aço, material sintético ou uma combinação de ambos.

2.4 CONFIGURAÇÕES DE LINHAS DE ANCORAGEM

As linhas de ancoragem são classificadas conforme sua disposição geométrica no espaço, e podem ser denominadas de ancoragem em catenária (convencional), ancoragem de raio curto (*taut leg*) e ancoragem vertical. Cada configuração será detalhada nas seções seguintes.

2.4.1 Linha de Ancoragem em Catenária

Na ancoragem em catenária, também denominada convencional, as linhas são suspensas pelas suas extremidades formando uma curva, devido à ação do seu peso próprio, ficando parte delas apoiada sobre o leito marinho (figura 2.10). Essa configuração, é utilizada comumente em plataformas semissubmersíveis e navios FPSO, ela apresenta como principal característica a maior liberdade de deslocamento da estrutura flutuante, sem gerar grandes esforços nas fundações, por conta do grande raio de ancoragem utilizado no sistema e ao atrito produzido

pelo trecho da linha apoiada no solo marinho, responsável por absorver grande parte das solicitações geradas pelos esforços ambientais.

Sua principal desvantagem é o grande comprimento do raio de ancoragem necessário, cerca de duas a três vezes o comprimento da lamina d'água, o que eleva o custo de implantação e gera congestionamento com linhas de unidades próximas e equipamentos submarinos, interferindo no posicionamento de cada elemento.

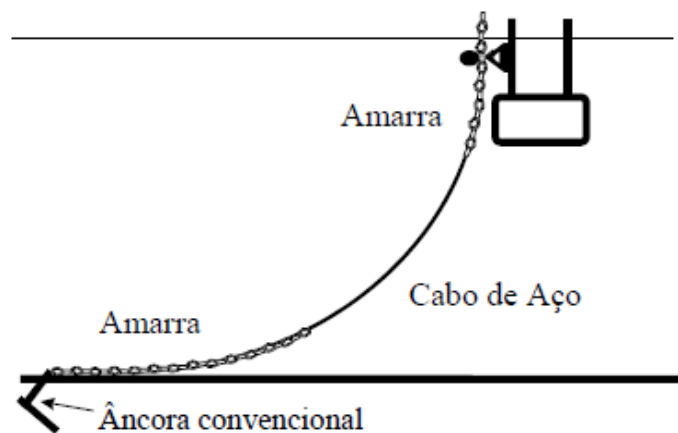


Figura 2.10: Linha de ancoragem em catenária (LARCERDA, T. A. G. de, 2005).

2.4.2 Linha de Ancoragem de Raio Curto (*Taut Leg*)

A ancoragem *taut leg* é constituída por linhas inclinadas e tracionadas, formando ângulos de aproximadamente 40° a 45° com a vertical, gerando um menor comprimento e projeção horizontal das linhas de ancoragem em relação a ancoragem em catenária, para um mesmo comprimento de lâmina d'água (Figura 2.11). Essa configuração proporciona uma maior rigidez ao sistema, limitando o passeio da estrutura flutuante.

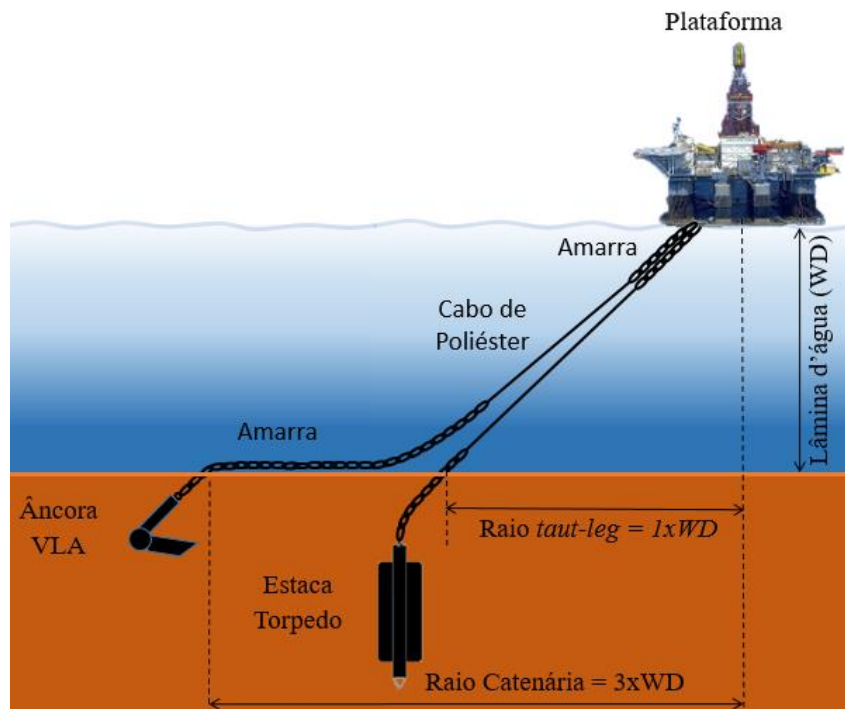


Figura 2.11: Comparação entre ancoragem em catenária convencional e ancoragem em *taut leg*.

As linhas são constituídas por cabos de aço ou amarras nas suas extremidades e cabo de poliéster no seu trecho intermediário. Nelas são utilizadas âncoras resistentes a altas cargas verticais, podendo ser as estacas de sucção, VLA (*Vertical Load Anchor*) ou estacas torpedos (Rocha,2014).

As principais vantagens da adoção desse sistema é a diminuição de custos, pelo fato de requerer menor comprimento da linha de ancoragem, assim como um menor raio de instalação, possibilitando-a em áreas congestionadas.

2.4.3 Linha de Ancoragem Vertical

Neste tipo de ancoragem são utilizados tendões verticais, tracionados pela ação do empuxo proveniente da parte submersa da unidade flutuante (figura 2.12), essa configuração é empregada principalmente em plataformas de pernas atirantadas (TLP). Os tendões geram uma alta rigidez no plano vertical e reduzida rigidez no plano horizontal, resultando em um componente horizontal, de força de tração, que proporciona a restauração da posição da plataforma, após o seu deslocamento.

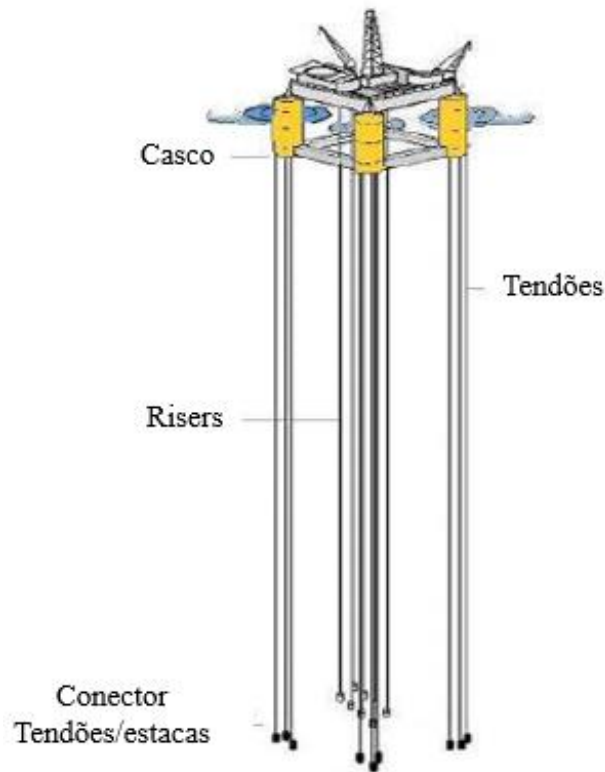


Figura 2.12: Linhas de ancoragem vertical com tendões. (KAWASAKI, P. Y., 2010).

2.5 SISTEMAS DE AMARRAÇÃO

Os sistemas de amarração são utilizados para garantir a estabilidade das estruturas flutuantes, e podem ser de diferentes tipos, os principais são a ancoragem em ponto único - SPM (*Single Point Mooring*), amarração com quadro de ancoragem - SM (*Spread Mooring*) e o posicionamento dinâmico - DP (*Dynamic Position*). Esses sistemas serão detalhados a seguir.

2.5.1 Ancoragem em Ponto Único (SPM)

Neste sistema, todas as linhas de ancoragem são conectadas em um único ponto da estrutura flutuante. É mais utilizado em unidades em unidades FPSO, pois permitem que a embarcação estacione em paralelo com o carregamento ambiental, minimizando as forças sobre o casco. Existem diversos tipos de ancoragem em um único ponto, os três principais são:

- a) ancoragem com *turret*: neste sistema todas as linhas de ancoragem e *risers* (tubos responsáveis pela condução de fluidos entre o leito marinho e a plataforma) são conectadas em uma estrutura denominada *turret*, que faz parte da estrutura ancorada (figura 2.13), podendo ser interna ou externa.



Figura 2.13: sistema SPM com *turret* externo (ASSIS, J. S. de, 2013).

b) sistema CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*): ele é composto por uma boia, ancorada por linhas em catenária, onde o sistema flutuante liga-se à ela através de um cabo sintético (figura 2.14). Esse sistema é mais afetado por carregamentos ambientais, devido as diferentes respostas da boia e do navio. Logo, quando os carregamentos alcançam certa magnitude, é necessário desconectar o navio.



Figura 2.14: sistema CALM. (LIMA, D. A., 2011).

c) sistema SALM (*Single Anchor Leg Mooring*): utiliza um sistema de *risers* rígidos pré-tensionados verticalmente, que possuem ampla capacidade de flutuação próxima à superfície ou apresentam uma boia flutuadora (figura 2.15). O sistema é conectado à embarcação através de estruturas rígidas de acoplamento dotadas de articulações (*yoke*).

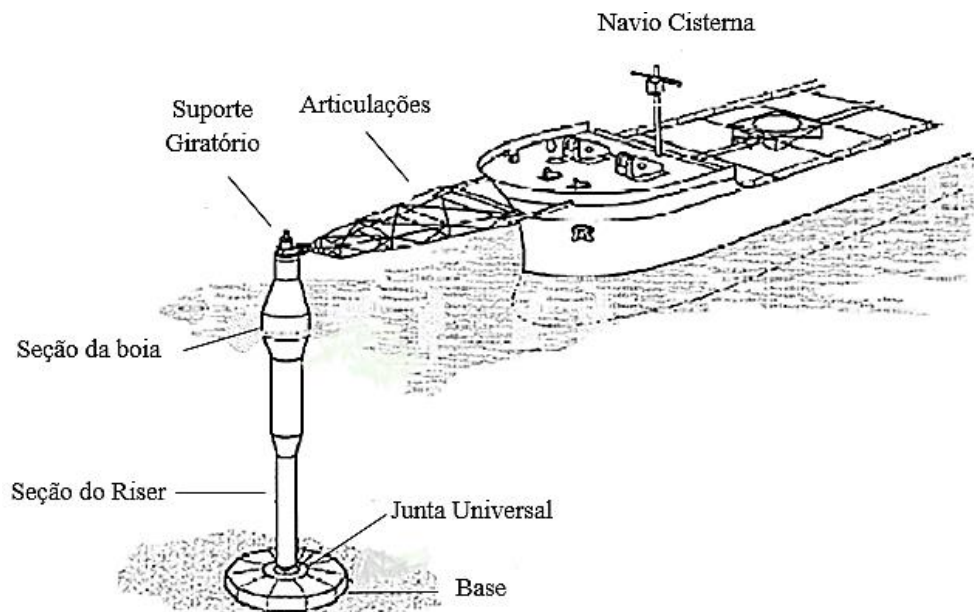


Figura 2.15: Sistema SALM com *riser* pré-tracionado e boia de flutuação (baseado em: LIMA, D. A., 2011).

2.5.2 Amarração com Quadro de Ancoragem (SM)

Neste sistema, as linhas de ancoragem são distribuídas em torno da estrutura flutuante, visando resistir a carregamentos ambientais em quaisquer direções (figura 2.16). Ela é utilizada, geralmente, em plataformas semissubmersíveis em operações de perfuração e produção, podendo também ser empregada em unidades FPSO.

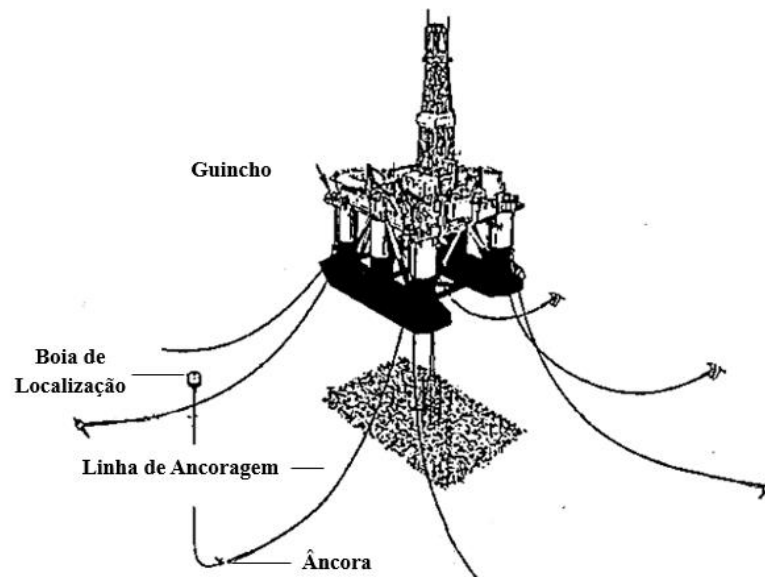


Figura 2.16: Amarração em quadro de ancoragem (LIMA, A. L., 2006).

2.5.3 Posicionamento Dinâmico (DP)

Neste sistema, a unidade flutuante mantém sua localização com o auxílio de um conjunto de propulsores, controlados através de sonares e GPS (figura 2.17). O sistema pode ser utilizado de forma isolada ou em conjunto com outros tipos de ancoragem. Quando as unidades são ancoradas próximas a outras, utiliza-se âncoras para assegurar a estabilidade da estrutura flutuante em caso de falha nos sistemas propulsores.

Esse sistema é indicado principalmente para estruturas que tenham uma estadia curta no local de ancoragem, sendo bastante utilizado em atividades de perfuração e intervenção em poços de petróleo.



Figura 2.17: Sistema de Posicionamento dinâmico. (KAWASAKI, P. Y., 2010).

2.6 FUNDAÇÕES PARA ANCORAGEM DE SISTEMAS FLUTUANTES

2.6.1 Estaca Cravada por Sucção

Este tipo de estaca é um elemento cilíndrico oco de aço, aberto no fundo e fechado no topo (figura 2.18), que é cravado primeiramente através do seu peso próprio e posteriormente com o auxílio de uma bomba sucção acoplada na sua extremidade superior. A bomba aplica um diferencial de pressão hidrostática no topo da estaca, através da drenagem da água presente no seu interior, excedendo a resistência do solo e viabilizando a penetração da estaca. Para argilas moles, a taxa de penetração pode ultrapassar 20 m por hora, entretanto, essa taxa é em média de 10 m por hora. Essas estacas permitem aplicação de cargas em qualquer ângulo.



Figura 2.18: Estacas de sucção. (RANDOLPH *et al*, 2005).

2.6.2 Âncora Convencional

Ela é instalada por arrasto, através de uma embarcação responsável por lançá-la e puxá-la. Este elemento de fundação é constituído por uma haste fixa ou articulada, que fornece o ângulo de ataque com o qual irá penetrar no solo; uma garra, que mobiliza a capacidade de carga do solo, quando a âncora é solicitada; um cepo, que mantém a estabilidade, restringindo a rotação após

sua instalação no solo marinho; e uma coroa, que interliga as outras peças, sendo responsável pela rigidez do sistema. A figura 2.19 apresenta o esquema dos componentes descritos acima.

Esses tipos de âncoras não resistem a carregamentos verticais (*uplift*), por isso são utilizadas em linhas de ancoragem em catenária, necessitando de um longo trecho de linha apoiado no fundo do mar, para não ocorrer solicitações no eixo vertical.

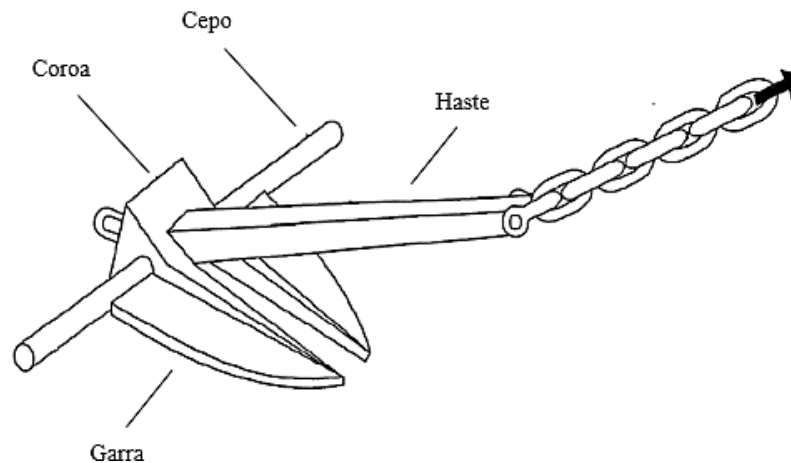


Figura 2.19: Âncora convencional. (KAWASAKI, P. Y., 2010).

2.6.3 Âncora Vertical (*Vertically Loaded Anchor - VLA*)

É um elemento de fundação que suporta cargas atuantes no eixo vertical. Esse modelo é uma variação das âncoras convencionais, que tiveram a haste rígida substituída por um conjunto de cabos associados a um dispositivo que permite a mudança do ângulo de aplicação da carga, sendo possível configurá-lo paralelo ao eixo vertical.

A instalação desse elemento é semelhante à da âncora convencional, feita pela técnica de arrasto, com auxílio de uma embarcação. Nesse processo, a âncora é solicitada por um carregamento inclinado, que atua nos eixos vertical e horizontal, porém ao se atingir o local determinado para a instalação e a carga prevista em projeto, a direção da aplicação de carga é alterada para a posição vertical (figura 2.20).

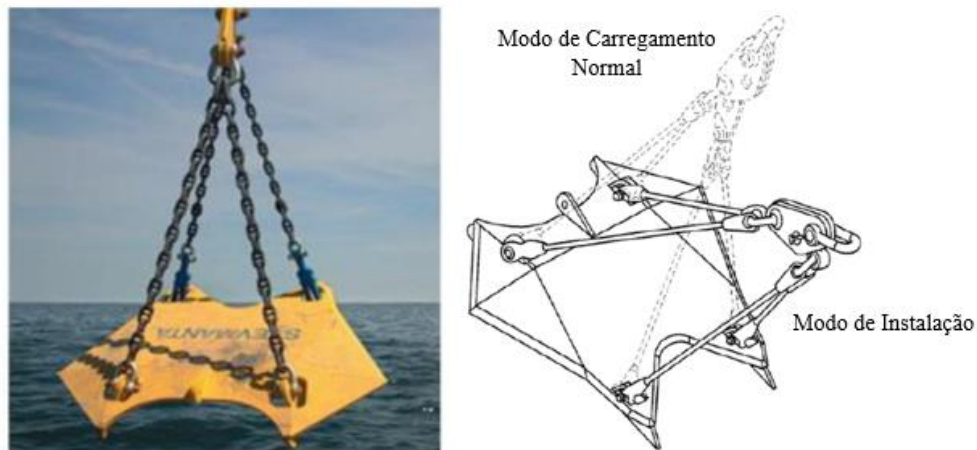


Figura 2.20: Âncora vertical. (API RP 2 SK, 2005 apud KOICHEM, R. M., 2016).

Kunitaki (2006), frisa que é interessante que a instalação seja realizada com a linha de ancoragem definitiva, visando a permanência da ligação entre a âncora e a plataforma. No entanto, para o sistema de linhas de ancoragem do tipo *taut leg*, que utiliza o cabo de poliéster, essa operação não é possível, pois se ele for utilizado no arrasto irá absorver grande parte da carga. Nesse caso, são usadas duas linhas de instalação, uma é conectada à embarcação que realiza a instalação, e a outra fica de espera em outro barco, para posteriormente ser conectada à estrutura flutuante.

2.6.4 Estaca Torpedo

O conceito de estaca torpedo foi desenvolvido pela Petrobras, em 1996, através do programa de capacitação tecnológica em águas profundas (PROCAP 2000), que tinha o objetivo de diminuir os custos de fabricação e instalação de fundações em águas profundas.

Ela é uma estaca cilíndrica de aço, preenchida com uma mistura de sucata de aço e concreto, cuja dosagem é efetuada com o objetivo de se atingir a maior massa específica possível, e deixar o centro de gravidade o mais próximo possível de sua ponta, que apresenta um formato cônico (figura 2.21) (KUNITAKI, 2016). Seu comprimento é cerca de 10 vezes o seu diâmetro e apresenta o comportamento de um corpo rígido.



Figura 2.21: Estaca torpedo (SAMPA, N. C., 2015).

A estaca geralmente apresenta aletas em sua superfície lateral, no máximo quatro formando entre si ângulos de 90° , que auxiliam em sua verticalidade durante o lançamento, geram maior rigidez axial para o corpo e aumentam o contato estaca-solo, contribuindo com a capacidade de carga da estaca. Medeiros (2002), descreve que no ponto de ligação entre a estaca e a linha de ancoragem (*padeye*), existe um olhal que permite a carga aplicada solicitar a fundação em qualquer direção (figura 2.22).



Figura 2.22: Estaca torpedo pronta para lançamento (ROCHA, M. M. *et al* 2016).

A instalação da estaca é feita de maneira simples, em comparação com as âncoras, pois não requer operações de arraste, podendo ser instalada em áreas congestionadas sem que ocorra a interferência das linhas de ancoragem presentes na região. O aumento da lâmina d'água não causa influência significativa no procedimento de instalação dessas estacas, pois elas não necessitam de equipamentos submarinos especiais ou embarcações de grande porte para apoio, possibilitando sua instalação em águas ultra-profundas.

O processo de instalação é feito com um rebocador, utilizado para transporte e lançamento da estaca e uma embarcação dotada de um veículo submarino operado remotamente (*Remote Operated Vehicle - ROV*), para o acompanhamento e monitoramento do processo. A estaca torpedo é ligada à embarcação por uma linha de ancoragem, com comprimento suficiente para alcançar a profundidade de cravação (figura 2.23). Depois que o rebocador chega ao local de cravação a estaca é baixada até a profundidade de lançamento e solta em queda livre, atingindo a velocidade de cravação prevista em projeto, e ao entrar em contato com o leito marinho ocorre a penetração. A velocidade que a estaca atinge no momento do contato com o solo deve ser suficiente para garantir a penetração prevista em projeto, porém deve ser em uma magnitude que não cause danos à estrutura dela.

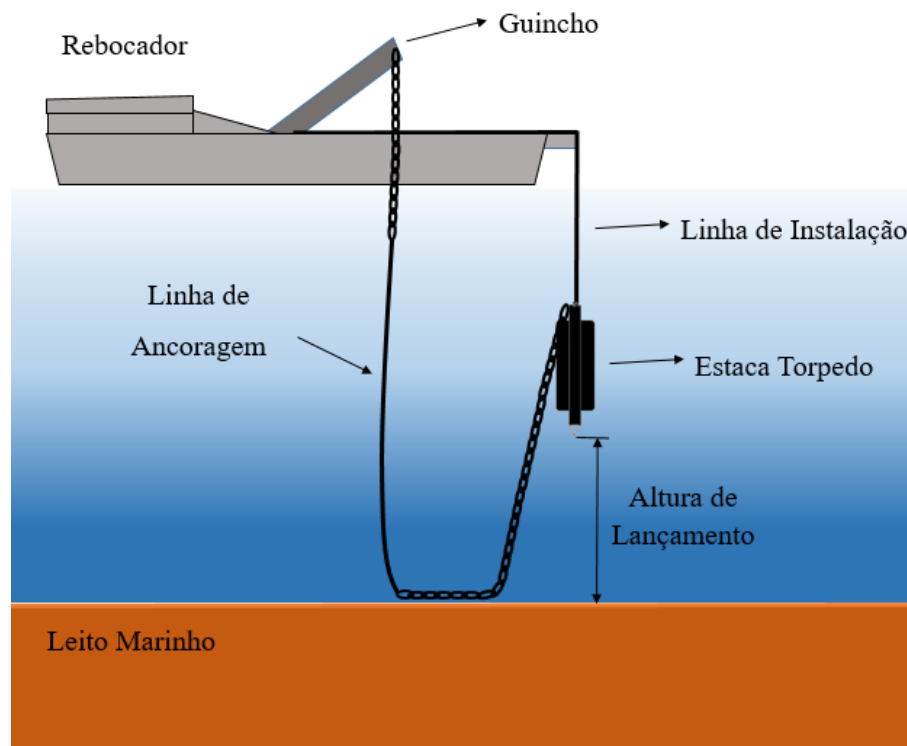


Figura 2.23: Procedimento de instalação da estaca torpedo.

2.7 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CRAVAÇÃO DA ESTACA TORPEDO

True (1976) desenvolveu um modelo analítico de penetração para âncoras em solos coesivos, sob condições não drenadas, calibrado através de ensaios em modelos reduzidos realizados por ele em 1974. A solução do modelo é idealizada no domínio do tempo, através da proposta de uma equação diferencial baseada na segunda lei de Newton (equação 2.1). A figura 2.24 demonstra as forças envolvidas na cravação de um elemento cilíndrico.

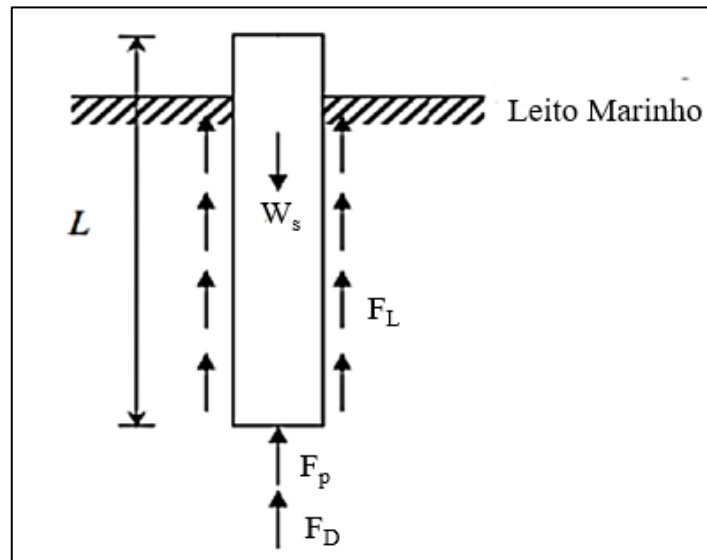


Figura 2.24: Forças que atuam na cravação de um elemento cilíndrico (baseado em ROCHA. C. C. M., 2014).

$$M' \cdot \frac{dv}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = W_s - F_D - F_P - F_L \quad (2.1)$$

Onde:

M' : Massa efetiva;

v : Velocidade da estaca;

Z : Profundidade;

t : Tempo;

W_s : Peso submerso da estaca;

F_P : Resistência de ponta;

F_L : Força de atrito lateral;

F_D : Força inercial de arrasto.

2.7.1 Taxa de deformação do solo (S_e)

Esta taxa traduz a deformação que o solo sofre ao longo do tempo durante a cravação, ela é afetada pela velocidade de cravação da estaca e pela resistência ao cisalhamento não drenada (S_u). Ela é dada pela equação 2.2.

$$S_{\dot{\epsilon}} = \frac{S_e}{1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{C_{\dot{\epsilon}} \cdot v}{S_u \cdot d} + C_0}}} \quad (2.2)$$

Onde:

S_e : Fator empírico da máxima taxa de deformação do solo em altas velocidades;

$C_{\dot{\epsilon}}$: Coeficiente empírico da taxa de deformação;

C_0 : Constante empírica da taxa de deformação;

d : Diâmetro da estaca.

2.7.2 Forças Resistentes do solo

As forças dinâmicas de resistência do solo consideradas no modelo de True (1976) são as forças de ponta (F_P) e lateral (F_L). Através da inclusão da taxa de deformação do solo ($S_{\dot{\epsilon}}$) e de um fator de redução da adesão lateral (δ), obtém-se as formulações de resistência estática. Logo, resistência e ponta (F_P) e lateral (F_L) é dada pelas equações 2.3 e 2.4.

$$F_P = (S_u \cdot N_c \cdot A_f) S_{\dot{\epsilon}} \quad (2.3)$$

$$F_L = \left(\frac{S_u \cdot A_L \cdot \delta}{S_{ti}} \right) S_{\dot{\epsilon}} \quad (2.4)$$

Onde:

N_c : Fator de capacidade de carga;

A_f : Área frontal da estaca;

A_L : Área lateral;

S_{ti} : Perda de resistência ao cisalhamento de argilas amolgadas.

2.7.3 Força inercial de arrasto

Esta representa a força que acelera as partículas do solo durante a cravação até uma velocidade suficiente para movê-las para fora do caminho da estaca, superando a resistência inercial das partículas em repouso (BEZERRA, 2017). Ela é calculada através da equação 2.5:

$$F_D = \frac{1}{2} v \cdot |v| \cdot A_f \cdot C_D \cdot d_e \quad (2.5)$$

Onde:

C_D : Coeficiente de arrasto (em função da velocidade de impacto da estaca);

d_e : Densidade do solo submerso;

d: Diâmetro da estaca.

Substituindo as equações 2.2 a 2.5 em 2.1, obtém-se equação 2.6. True (1976) apresenta a solução para equação 2.6 através do desenvolvimento de um algoritmo incremental, baseado no método das diferenças finitas.

$$v_{i+1} = v_{i-1} + \frac{2\Delta z}{v_i \cdot M'} \left[(W_S) - \left(\frac{1}{2} v_i^2 \cdot A_f \cdot C_D \cdot d_{e_i} \right) - S_{ui} \cdot \left(A_f \cdot N_C + \frac{A_L \cdot \delta}{S_{ti}} \right) \cdot \left(S_e = \frac{S_e}{1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{C_e \cdot v_i}{S_{ui}} + c_0}}} \right) \right] \quad (2.6)$$

A resolução da equação 2.6 é feita através de um processo iterativo, primeiramente considera-se $i=1$, logo teremos $v_i = v_1$; $v_{i-1} = v_0$ e $v_{i+1} = v_2$, então adota-se um valor inicial igual para v_1 e v_0 e um valor para a variação da profundidade (ΔZ). Com o resultado de v_2 , faz-se a média entre ele e o valor de v_0 , adotado anteriormente, e recalcula-se v_1 . Com o novo valor de v_1 , e mantendo o valor de v_0 adotado inicialmente, repete-se o cálculo para encontrar o novo valor de v_2 . As iterações são repetidas para diferentes valores de i , adotados em ordem crescente, sendo finalizada quando a velocidade ($v_{i+1} = v_2$) for menor que zero, ou seja, quando não há mais deslocamentos. A profundidade de penetração é calculada, através da multiplicação do número de incrementos pelo valor da profundidade analisada para o último incremento, dada pela fórmula 2.7.

$$D_p = i(\Delta Z) \quad (2.7)$$

Vale ressaltar, que posteriormente foram desenvolvidos programas computacionais baseados em modelos visco-elastoplásticos em conjunto com o modelo sugerido por True (1976), capazes de analisar a penetrabilidade da estaca torpedo e simular a interação estaca-solo.

2.8 EQUILÍBRIO DA CATENÁRIA INVERSA (EMBUTIDA NO SOLO) E ATENUAÇÃO DE CARGAS

Durante a cravação da estaca torpedo a linha de ancoragem permanece na posição vertical, após a estaca atingir a profundidade final aplica-se à linha de ancoragem uma carga de pré-tração até se atingir a inclinação e o nível de tensão desejado, durante essa aplicação o segmento enterrado no solo assume uma posição de catenária invertida, devido à resistência perpendicular que o solo oferece ao ser solicitado pela amarra. Nessa catenária ocorre a atenuação das cargas aplicadas pela estrutura flutuante ao elemento de ancoragem, pois ocorre a dissipação de forças no contato entre a linha embutida e o solo.

Sampa (2015), descreve que o mecanismo de falha da estaca torpedo depende da carga que chega à ela e da direção da aplicação da carga, sendo assim, conhecendo-se a geometria que a amarra assume dentro do leito marinho e a real carga que chega à estaca, pode-se projetar as âncoras de maneira mais eficiente e econômica.

Diante disso, diversos pesquisadores têm desenvolvido trabalhos para caracterizar o mecanismo de ocorrência dessa atenuação, empregando soluções analíticas e numéricas em conjunto com testes realizados em diferentes escalas, visando estimar a distribuição de carga ao longo da catenária, assim como a configuração geométrica assumida por ela dentro do solo. A seguir são descritas as principais referências encontradas na literatura nacional e internacional.

2.8.1 Reese (1973)

Em 1973, Reese apresentou um procedimento de cálculo para previsão da configuração geométrica da catenária enterrada, assim como a distribuição de carga que ocorre ao longo dela. O processo consiste em dividir o solo em diversas zonas de forças, que se iniciam no leito marinho e vão até o ponto de ligação entre a amarra e a estaca, para os cálculos ele assume as seguintes hipóteses: em cada zona de solo a amarra forma um arco circular; em cada arco a resistência não drenada do solo é constante; o solo ao redor da corrente atinge sua tensão limite; e o ângulo entre a amarra e a superfície marinha é nulo. Ressalta-se que o autor não considera

nos cálculos as forças tangenciais que solicitam a amarra nem as forças geradas devido ao peso próprio da mesma.

2.8.2 Gault e Cox (1974)

Gault e Cox (1974), fizeram análises com base no trabalho de Reese (1973). Porém, levaram em consideração o peso próprio da amarra e a resistência tangencial que atua no sistema, e demonstraram que a carga estimada que chega à estaca é menor do que a encontrada para a análise sem essas duas variáveis. Além disso, variaram o comprimento, o peso da amarra enterrada e a resistência do solo (normal e tangencial), os autores concluíram que o parâmetro com maior impacto na atenuação de carga é a resistência do solo, sendo a variação do peso da amarra e o comprimento insignificante.

2.8.3 Vivatrat et al (1982)

Em 1982, Vivatrat *et al* propuseram uma solução analítica bidimensional capaz de avaliar a configuração geométrica da catenária invertida e a variação de tensão atuante nela. Porém, diferente dos pesquisadores citados anteriormente, eles não fizeram divisões no perfil do solo, e sim na amarra enterrada, que foi dividida em diversos segmentos infinitesimais com o mesmo comprimento. Isolando-se um elemento infinitesimal é possível realizar o equilíbrio de forças tangenciais e normais que estão atuando sobre ele (figura 2.25), obtendo-se equações diferenciais ordinárias (equação 2.8 e 2.9). Através dessas equações é possível calcular a distribuição de tensões atuantes na amarra (T) e sua configuração espacial (θ).

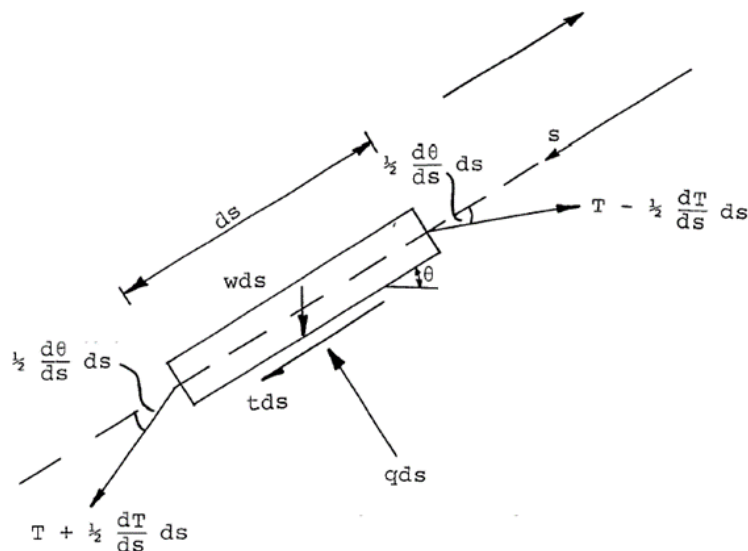


Figura 2.25: Equilíbrio de forças de um elemento da linha de ancoragem enterrada no solo (VIVATRAT, V. *et al.*, 1982).

a) equação de equilíbrio na direção tangencial ($\sum F_t = 0$);

$$\frac{dT}{dS} = -f - w \operatorname{sen}\theta_0 \quad (2.8)$$

b) equação de equilíbrio na direção normal ($\sum F_n = 0$).

$$\frac{d\theta}{dS} = \frac{q - w \cos\theta_0}{T} \quad (2.9)$$

Onde:

T : Força de tração (aplicada no trecho final do segmento da amarra);

f : Resistência tangencial por unidade de comprimento;

q : Resistência normal por unidade de comprimento;

w : Peso da corrente por unidade de comprimento;

θ_0 : Ângulo na extremidade superior do segmento da amarra;

dS : Unidade de comprimento.

O autor determina a resistência normal por unidade de comprimento (q) e resistência tangencial por unidade de comprimento (f) conforme as fórmulas 2.10 e 2.11:

$$q = N_c \cdot S_u \cdot 2,6D \quad (2.10)$$

$$f = S_u \cdot 10D \quad (2.11)$$

Onde:

N_c : Fator de capacidade de carga (o autor recomenda valores entre 9 e 11);

S_u : Resistência ao cisalhamento não drenada;

D : Diâmetro nominal da linha ou de um elo da amarra.

2.8.4 Degenkamp e Dutta (1989)

Degenkamp e Dutta (1989), também desenvolveram uma técnica de análise estática bidimensional, através da integração incremental, os autores também fazem divisões diretamente na amarra, considerando cada segmento como um elemento de barra curva sem

rigidez á flexão. Para a obtenção das equações de equilíbrio, logo antes das condições de ruptura do solo, os autores adotam as seguintes hipóteses básicas: (1) os elementos da corrente são inexistentes; (2) devido o deslocamento da corrente o solo sofre uma solicitação não drenada; (3) na vizinhança da corrente, o solo atinge o estado limite de tensão, desenvolvendo sua resistência última; (4) a força de cisalhamento e o peso do solo sobre um elemento da corrente são constantes. A figura 2.26 demonstra o equilíbrio de forças normais e tangenciais analisadas pelos autores, e a seguir são apresentadas a equações diferenciais obtidas (equação 2.12 e 2.14):

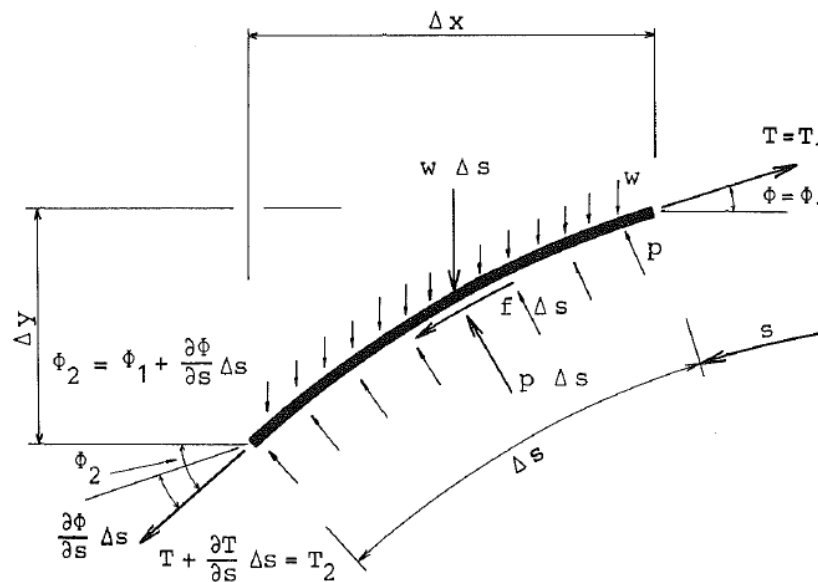


Figura 2.26: Diagrama de forças de um elemento da amarra enterrada no solo (DEGENKAMP, G.; DUTTA, A.,1989).

a) equação de equilíbrio na direção tangencial ($\sum F_t = 0$);

$$\frac{dT}{ds} = -(t w \operatorname{sen}\theta_1) \quad (2.12)$$

Realizando-se a Integração incremental da equação, obtém-se a equação 2.13, que permite estimar a tração que atua na extremidade inferior do elemento da amarra.

$$T_{i+1} = T_i - \Delta s (f + w \operatorname{sen}\theta_i) \quad (2.13)$$

b) equação de equilíbrio na direção normal ($\sum F_n = 0$):

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{p-w \cos\theta}{T + \frac{dT}{ds} \Delta s} \quad (2.14)$$

Realizando-se a Integração incremental da equação, obtém-se a equação 2.15, que permite estimar o ângulo formado na extremidade inferior.

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \frac{(p-w \cos\theta_i) \Delta s}{T_i} \quad (2.15)$$

Onde:

T_{i+1} : Força na extremidade inferior do segmento da amarra;

T_i : Força na extremidade superior do segmento da amarra;

Δs : Comprimento do segmento da corrente;

f : Resistência tangencial por unidade de comprimento;

w : Peso da corrente por unidade de comprimento;

θ_i : Ângulo inicial considerado na extremidade superior do segmento da amarra.

θ_{i+1} : Ângulo final considerado na extremidade inferior do segmento da amarra;

p : Resistência normal por unidade de comprimento.

As projeções horizontal e vertical de cada elemento podem ser determinadas a partir das equações 2.16 e 2.17, demonstradas abaixo.

$$dx = ds \cdot \left(\frac{\cos\theta_i + \cos\theta_{i+1}}{2} \right) \quad (2.16)$$

$$dy = ds \cdot \left(\frac{\sin\theta_i + \sin\theta_{i+1}}{2} \right) \quad (2.17)$$

O comprimento total da amarra enterrada no solo é estimado através do somatório dos elementos discretizados.

Os autores determinam a resistência tangencial por unidade de comprimento (f), considerando que a resistência ao cisalhamento não drenado é totalmente solicitada, conforme a fórmula 2.18:

$$f = EWS \cdot D \cdot \alpha \cdot S_u \quad (2.18)$$

A resistência normal do solo por unidade de comprimento (p) é estimada a partir da resistência última do solo, conforme a equação 2.19:

$$p = EWB \cdot D \cdot N_c \cdot S_u \quad (2.19)$$

Onde:

EWB : Fator de conversão de diâmetro equivalente para força normal;

N_c : Fator de capacidade de carga do solo;

EWS : Fator de conversão de diâmetro equivalente para força tangencial;

D : Diâmetro nominal da linha ou do elo da amarra;

α : Fator de adesão do solo;

S_u : Resistência ao cisalhamento não drenada do solo.

Para validar suas equações, os autores realizaram uma série de ensaio em laboratório, com correntes de diferentes diâmetros, determinando os parâmetros presentes na atenuação de carga do trecho da amarra embutida no solo. A figura 2.27 mostra o modelo esquemático do equipamento utilizado por eles.

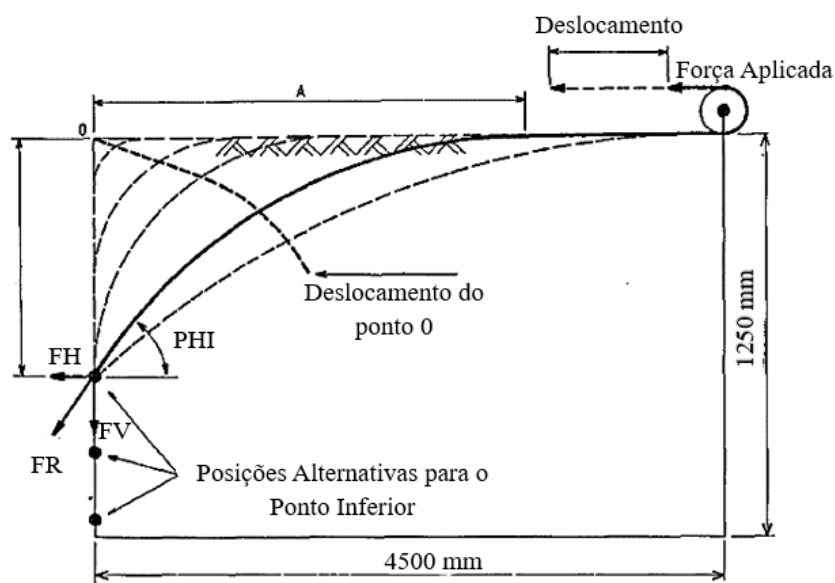


Figura 2.27: Representação esquemática da configuração utilizada no teste (DEGENKAMP, G.; DUTTA, A., 1989).

A ponta inferior da amarra foi ligada a uma célula de carga presente na lateral do tanque, onde as forças verticais e horizontais foram medidas. A amarra foi mantida na posição vertical e o tanque foi preenchido por uma argila saturada, com peso específico de $18,8 \text{ kN/m}^3$. A parte superior da amarra foi conectada a um cilindro hidráulico, responsável pela aplicação da força de tração no sistema, o qual aplicava uma tração a uma velocidade de $0,002 \text{ m/s}$, garantindo a condição não drenada.

No ensaio mediu-se o deslocamento, o comprimento de projeção (A) e a força aplicada na amarra, assim como a força horizontal (FH) e a força vertical (FV) aplicadas na célula de carga presente no tanque. Através das FH e FV foi possível calcular a força resultante no sistema (FR) e o ângulo de aplicação de carga (PHI). As figuras 2.28 e 2.29 apresentam as comparações entre os valores calculados, através das equações de equilíbrio propostas por eles, e os medidos nos ensaios de laboratório, referentes à tensão transmitida à estaca e o ângulo de aplicação em relação a horizontal.

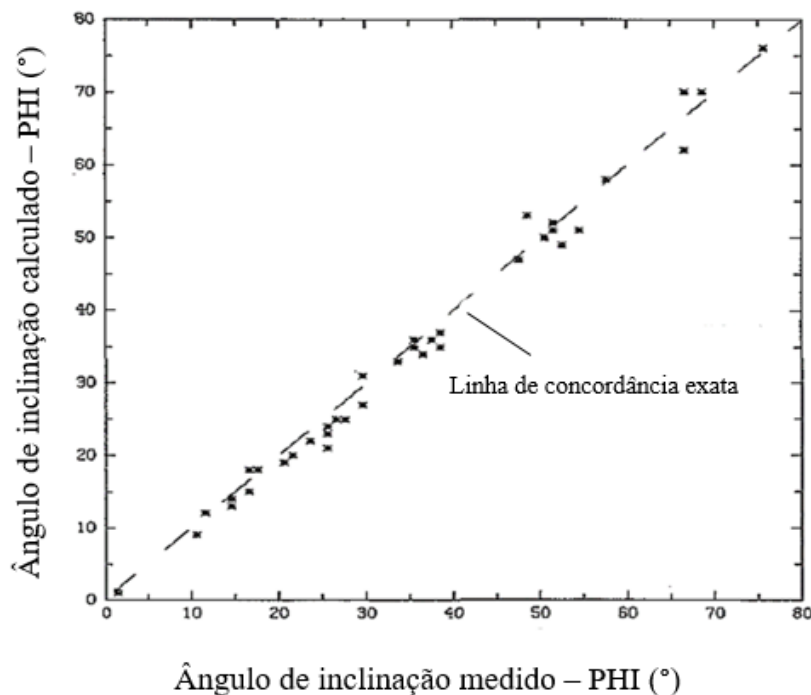


Figura 2.28: Ângulo de aplicação de carga - medido versus calculado (DEGENKAMP, G.; DUTTA, A., 1989).

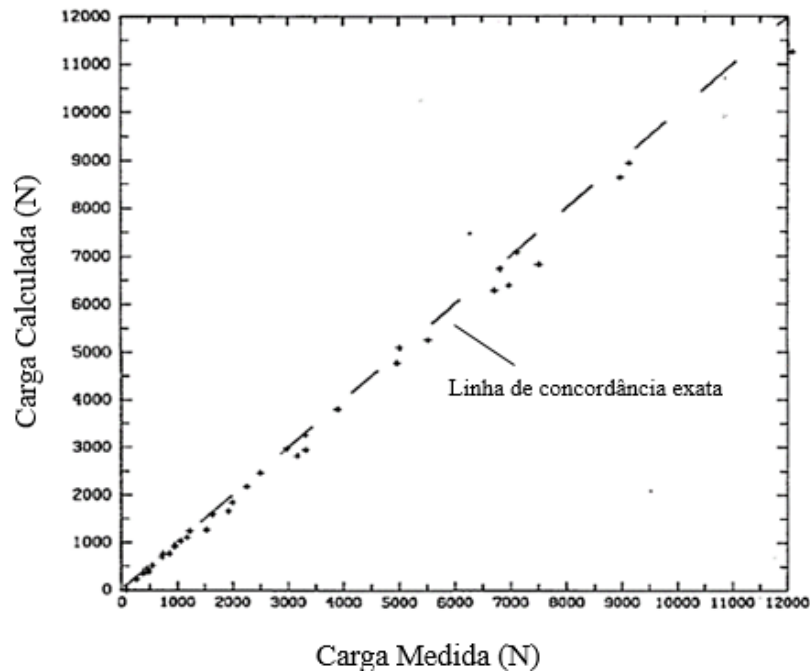


Figura 2.29: Tensão aplicada à estaca - medida versus calculada (DEGENKAMP, G.; DUTTA, A.,1989).

A partir dos resultados presentes na pesquisa foi possível determinar os valores de atenuação de carga, conforme demonstrado na tabela 2.1, com valores de EWB em torno de 2,5 e EWS de 8,2, para solos argilosos. Ressalta-se que para um mesmo diâmetro de amarra e altura de solo, quanto menor a força aplicada no sistema, maior é sua atenuação ao longo do trecho enterrado, por conta da parte que independe da capacidade de carga do solo somada ao maior ângulo de aplicação de carga formado com a horizontal.

Tabela 2.1: Valores de atenuação de cargas em solo argiloso

Diâmetro Nominal da Amarra (m)	Profundidade até o Topo da Estaca (m)	Força Aplicada - PULLF (N)	Força Resultante Transmitida à Estaca - FLM (N)	Ângulo de aplicação de carga - PHI (°)	Atenuação (%)
0,0064	0,135	465	305	35	34,41
		1091	867	22,7	20,53
		2758	2422	14	12,18
	0,27	380	175	66,4	53,95
		541	305	50,3	43,62
		942	648	38,1	31,21
	1,008	1889	1447	51	23,40
		3694	3081	35,8	16,59
		7461	6632	25,2	11,11

Tabela 2.1: Valores de atenuação de cargas em solo argiloso

Diâmetro Nominal da Amarra (m)	Profundidade até o Topo da Estaca (m)	Força Aplicada - PULLF (N)	Força Resultante Transmitida à Estaca - FLM (N)	Ângulo de aplicação de carga - PHI (°)	Atenuação (%)
0,0095	0,204	672	364	46,7	45,83
		1335	974	29,2	27,04
		3466	2897	17,4	16,42
	0,407	708	404	68,2	42,94
		1161	773	49,7	33,42
		2417	1911	33,1	20,94
	0,612	1268	658	65,8	48,11
		1841	1140	52,1	38,08
		2932	2171	38,5	25,95
0,016	0,336	1490	878	47,8	41,07
		10042	8890	15,7	11,47
	0,672	1797	866	74,6	51,81
		2628	1553	56,8	40,91
		10961	9053	25,5	17,41
	1,008	2989	1835	65,9	38,61
		4567	3233	50,6	29,21
		8564	6890	37	19,55

(Fonte: baseada em: DEGENKAMP, G.; DUTTA, A.,1989)

2.8.5 Amaral e costa (2004)

Os autores realizaram um trabalho de avaliação dos fatores de segurança das estacas torpedos do navio AVARÉ situado no campo de coral no Paraná. Eles avaliaram a magnitude da carga que chega à estaca e o ângulo de aplicação, formado em relação ao eixo horizontal. Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado o programa DIGIN, *software* de projetos criado pela *Det Norske Veritas* - DNV, amplamente difundido na indústria petrolífera, pois através dele é possível determinar a profundidade de penetração de uma estaca torpedo no solo marinho, a configuração da catenária formada na água e/ou no solo e as cargas transmitidas para a estaca.

Com os resultados, os autores concluíram que as cargas transmitidas ao topo da estaca dependem linearmente das cargas aplicadas no ponto em que a linha de ancoragem toca o leito marinho (*Touch down point* - TDP), independente da profundidade de cravação, conforme figura 2.30. Porém, o ângulo que a catenária inversa forma com o eixo horizontal depende fortemente da carga aplicada no leito marinho e da profundidade de cravação, conforme figura 2.31.

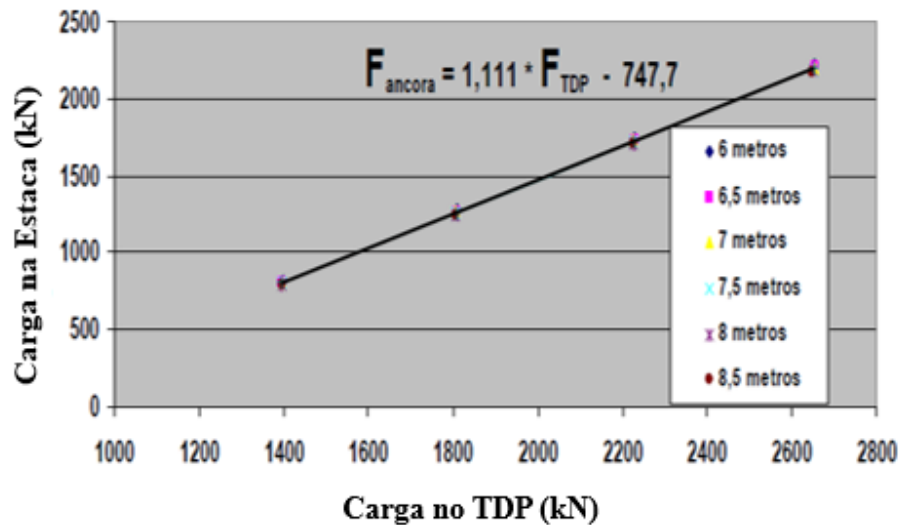


Figura 2.30: Carga na ancora versus carga no TDP para diferentes penetrações da estaca (AMARAL, C. dos S.; COSTA, A. M. dos, 2004).

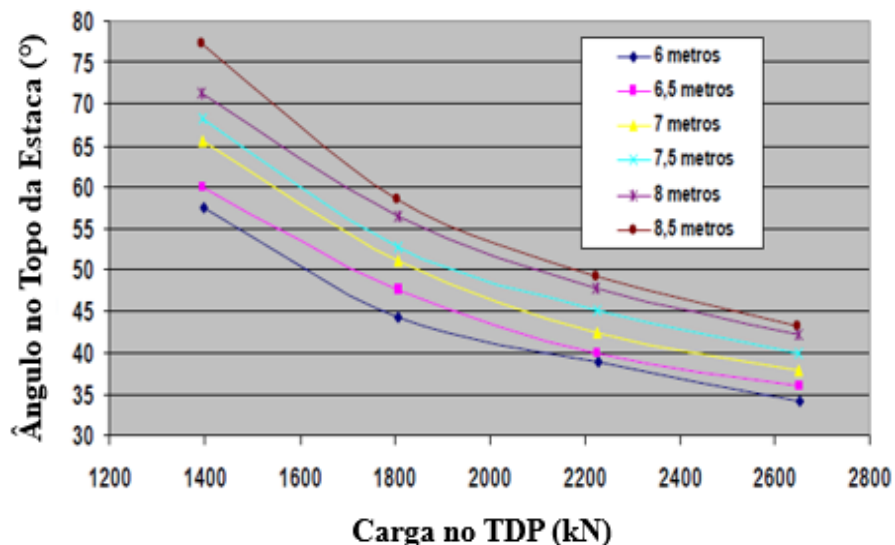


Figura 2.31: Ângulo de aplicação de carga na ancora x no TDP para diferentes penetrações (AMARAL, C. dos S.; COSTA, A. M. dos, 2004).

2.8.6 Wang *et al* (2010)

Wang *et al* (2010), estudaram o sistema de interação entre o solo e a amarra, através de um modelo quase-estático considerando as três dimensões da geometria do problema, visando uma previsão mais precisa do comportamento da amarra embutida no solo. O trabalho foi realizado em três etapas de estudo, primeiramente foi estudado o perfil de distribuição de tensão e a configuração da amarra dentro de um solo argiloso, devido a aplicação de uma carga de pré-

tração. Posteriormente, avaliaram a amarra com grandes cargas aplicadas, e por último analisaram a catenária invertida, em serviço, submetida a diferentes níveis de pré-tração.

Os autores observaram que, quanto maior o nível de tração na amarra, considerando o mesmo ângulo de incidência em relação ao leito marinho, maior é o seu deslocamento horizontal, tornando o ângulo de incidência na estaca menor. O mesmo aconteceu quando a carga foi mantida constante e o ângulo de incidência no leito marinho foi reduzido. Logo, quanto maior for o nível de carga e/ou menor for seu ângulo de incidência em relação ao leito, maior será o deslocamento horizontal da amarra dentro do solo. Eles concluíram também que a carga e o ângulo de incidência atuante sobre a estaca, são menores quando a carga de pré-tração é aplicada com um ângulo menor em relação ao leito do mar.

2.8.7 Rocha (2014)

Rocha (2014), projetou e construiu um sistema para a realização de ensaios de carregamento estático (tração axial) em linhas de ancoragem embutidas em solo argiloso, com o objetivo de estudar a configuração geométrica da linha e a atenuação das cargas que são transmitidas para a estaca torpedo. O sistema é demonstrado na figura 2.32.

Os estudos foram baseados em um caso típico, fornecido pela Petrobras, de um sistema de ancoragem de uma plataforma FPSO, que utiliza a configuração da linha de ancoragem em *taut leg*, e estacas torpedo como elemento de fundação. O exemplo foi reproduzido em laboratório na escala 1:40, respeitando-se os princípios de escala e similaridade, a partir da construção de um tanque de acrílico, no qual foi acoplada uma célula de carga no fundo. Para simular a amarra do caso real, foi utilizada uma corrente de aço, que foi ligada à célula de carga do tanque.

As forças aplicadas à corrente, foram medidas com o auxílio de uma célula de carga, instalada na extremidade superior dela. Já com as leituras da célula de carga acoplada ao tanque, foi possível medir as forças verticais e horizontais transmitidas ao ponto que representou a ligação entre a amarra e elemento de fundação, assim como calcular o ângulo de incidência da força. Através da diferença dos valores medidos nas células de carga, a autora obteve o valor da atenuação de cargas, que ocorreu durante o ensaio. A figura 2.32 demonstra a estrutura de ensaio desenvolvida.

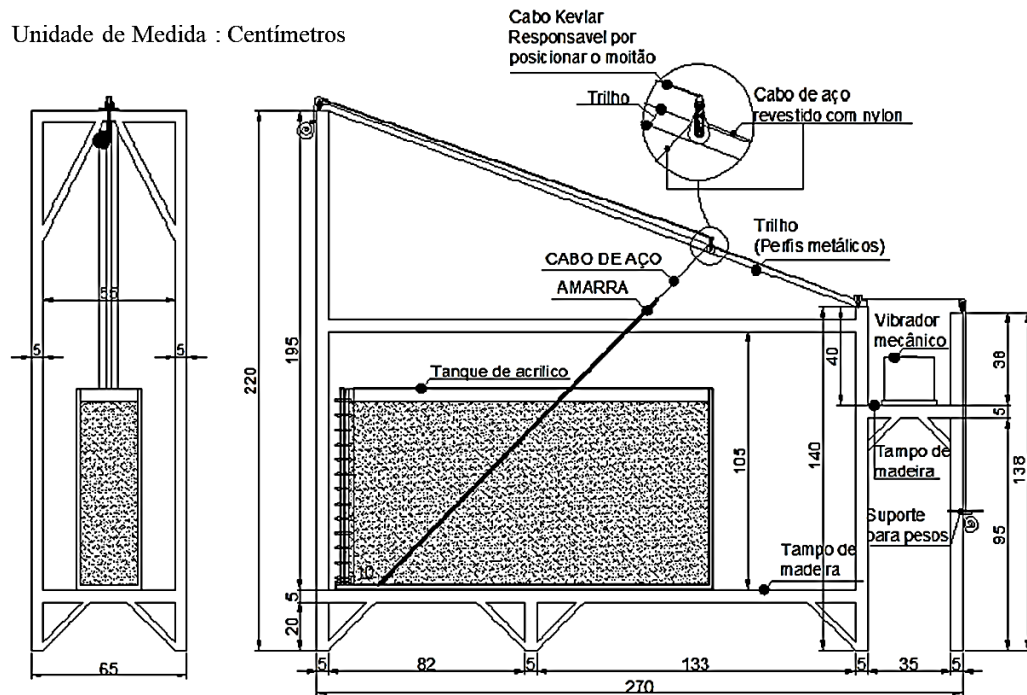


Figura 2.32: Estrutura metálica e tanque acrílico desenvolvidos para o ensaio (ROCHA, C. C.M., 2014).

O solo argiloso utilizado para o preenchimento do tanque foi obtido de forma artificial, de maneira a reproduzir as propriedades físicas das argilas marinhas típicas da costa brasileira. Para obtê-la foi feita uma mistura de caulim (85% de massa seca), bentonita (15% de massa seca) e água, com teores de umidade de 100% (argila A) e 120% (argila B). Ressalta-se, que a argila A apresentou um valor de s_u maior em comparação com a argila B, para uma mesma profundidade. Em relação à altura de solo acima da célula de carga, foram utilizados na argila B três níveis diferentes, 72 cm, 48cm e 24cm, porém a amostra A foi ensaiada apenas na altura de 72 cm. Para cada nível, foram realizados quatro ensaios, exceto para a amostra A, que foram realizados apenas três, totalizando 15 ensaios.

O ensaio foi realizado empregando-se carregamento e descarregamento para diferentes ângulos de incidência formados entre a corrente e o eixo vertical, iniciando em 0° com acréscimos de 5° em 5° até o ângulo máximo de 55° , conforme figura 2.33. As cargas foram aplicadas através de incrementos de pesos de 1kgf (9,81 N) até atingir 14 kgf (137,34 N), representado 9.000 kN na conversão de escala. Esse valor foi além da carga máxima estimada para o caso típico (7.100 kN), pois desejava-se determinar a influência de carregamentos superiores sobre a atenuação. Na pesquisa, também foi utilizado o programa DIGIN, com o objetivo de proceder análises comparativas entre os resultados obtidos em laboratório e os gerados a partir do programa.

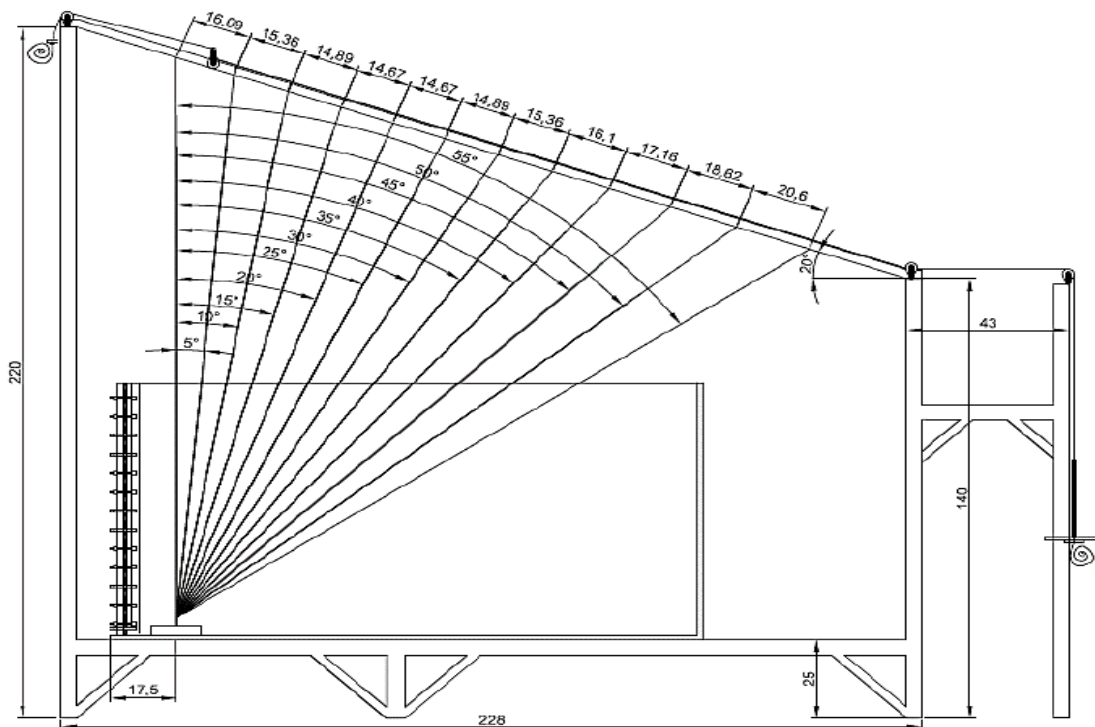


Figura 2.33: Esquema do sistema de ensaio (ROCHA, C. C.M., 2014).

Com os resultado obtidos, a autora conclui que: os deslocamentos horizontais das amarras embutidas no solo foram menores para os resultados experimentais em comparação com os obtidos pelo software; a atenuação de carga prevista pelo programa (0,7% - 2,2%) foi menor em comparação com os obtidos no experimento (6% - 14%), que é compatível com a literatura (vale ressaltar que essa comparação considera apenas a argila B, pois essa refletia as características de resistência da argila marinha do caso típico); a amostra de argila A, com 72 cm de altura, teve uma tendência de estabilização da atenuação em 24%. Já para as amostras da argila B, as atenuações se estabilizaram em torno de 14%, 6% e 0%, para as alturas de solo respectivas de 72cm, 48cm e 24cm. A figura 2.34 exemplifica os resultados de atenuação obtidos pela autora.

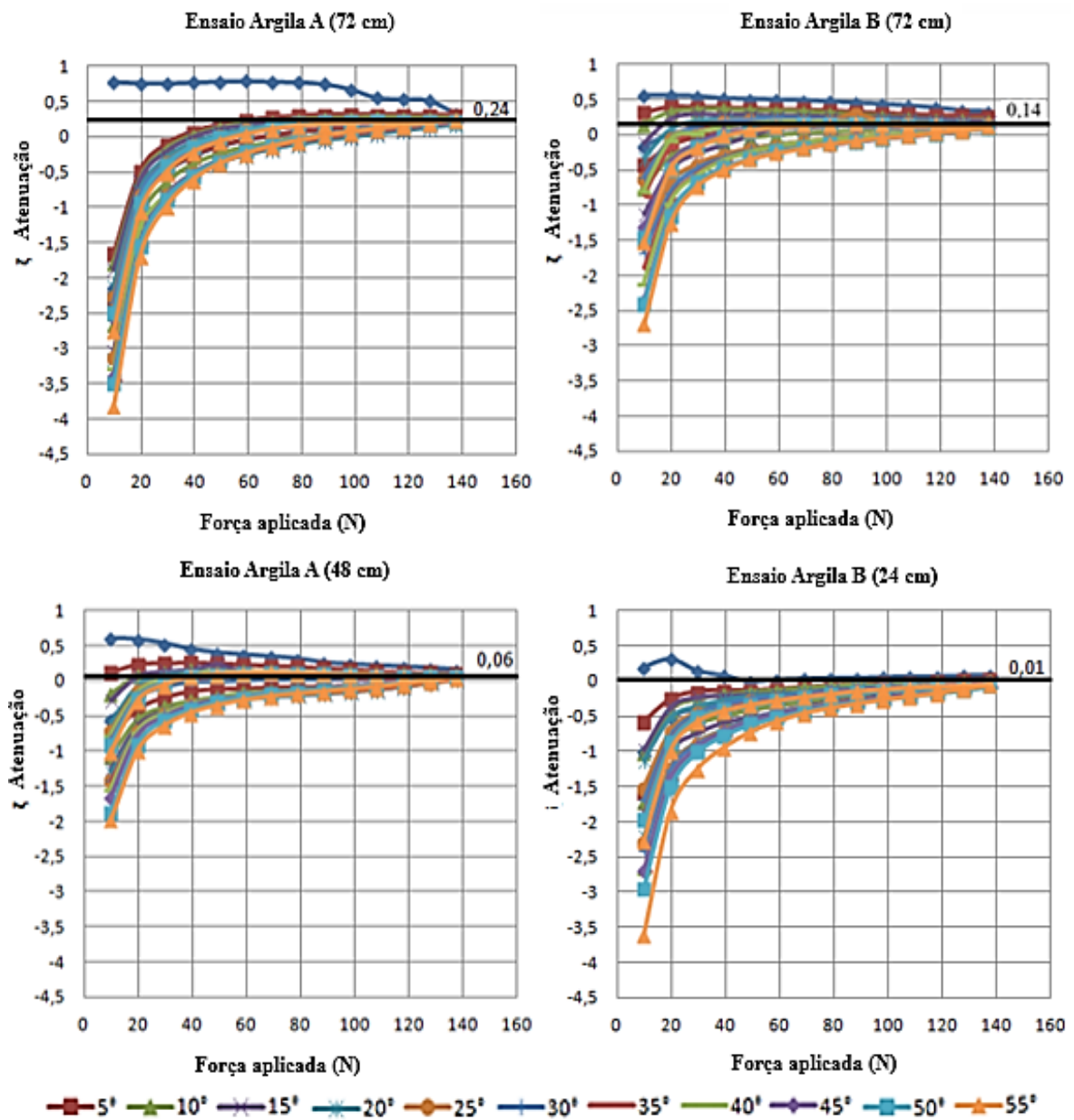


Figura 2.34: Resultados dos ensaios de atenuação nas argilas A e B. (ROCHA, C. C.M., 2014).

Além disso, o estudo demonstrou que a atenuação de carga que ocorre na interação entre o solo e a amarra é diretamente proporcional à altura do solo e à resistência ao cisalhamento não drenada do solo. Porém, ela é inversamente proporcional à magnitude da força aplicada na linha e ao ângulo de aplicação da carga na linha, conforme figura 2.35.

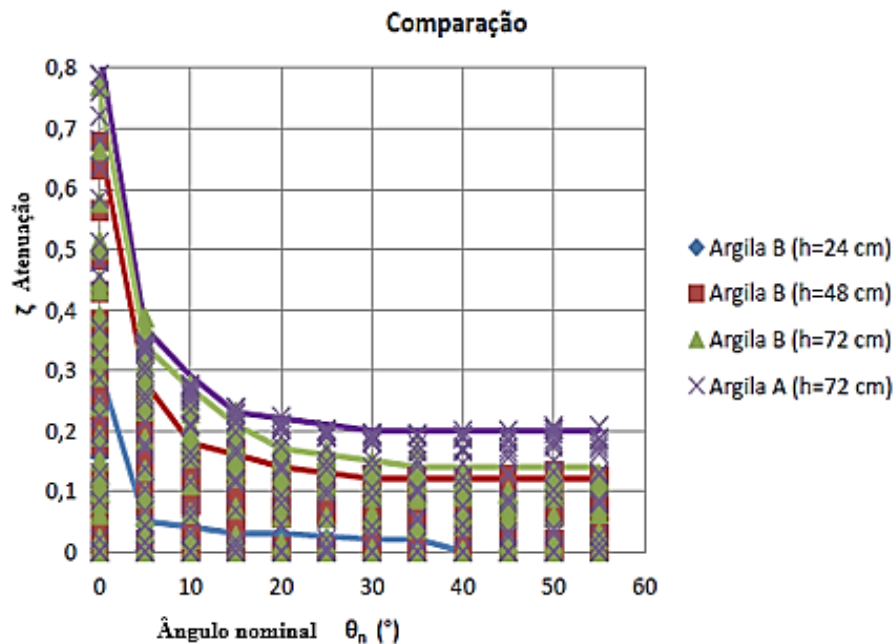
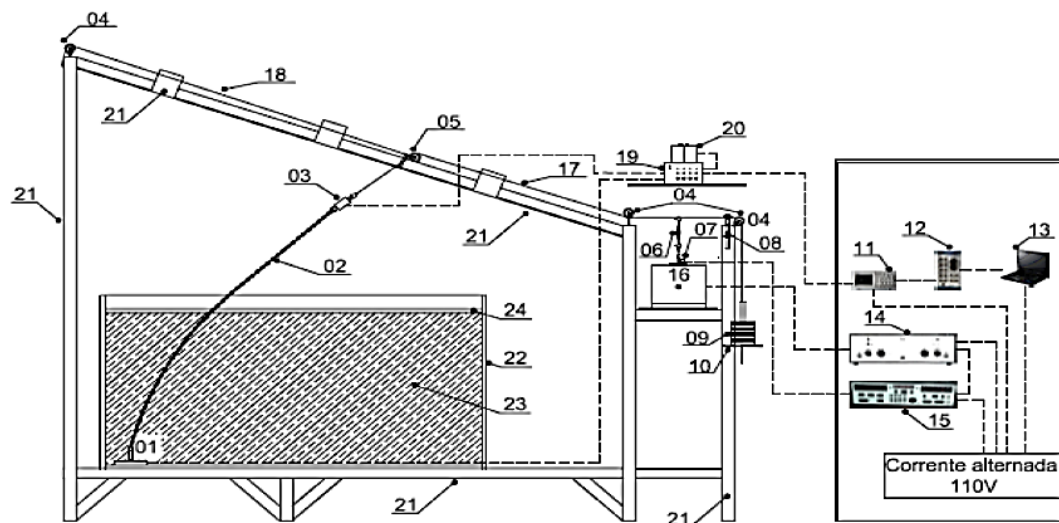


Figura 2.35: Comparação da atenuação *versus* ângulo nominal nas diferentes condições de ensaio (ROCHA, C. C.M., 2014).

2.8.8 Sampa (2015)

Sampa (2015), realizou a continuação do trabalho desenvolvido por Rocha (2014), procedendo uma análise voltada para a atenuação de cargas estáticas e dinâmicas no trecho da linha de ancoragem embutida no solo. A pesquisa também foi baseada no caso típico, fornecido pela Petrobras, referente ao sistema de ancoragem de uma plataforma FPSO, com fator de redução de escala (1:40). Para realizar os ensaios de carregamento estático, o autor utilizou o aparato desenvolvido por Rocha (2014), porém para os ensaios de carregamentos dinâmicos, o equipamento passou por adaptações, as quais possibilitaram a aplicação de vibrações condizentes com as faixas de aceleração e frequência desejadas. A figura 2.36 demonstra o esquema de ensaio utilizado nos ensaios de carregamento dinâmico.



01 - Célula de carga inferior; 02 - Amarra e conectores; 03 - Célula de carga superior; 04 - Moltes fixos; 05 - Molte móvel triplo e sargentos; 06 - Esticador forjado e acessórios; 07 - Acelerômetro piezoelétrico; 8 - Sistema de trava; 09 - Pesos; 10 - Base para pesos; 11 - Osciloscópio; 12 - Bloco conector BNC; 13 - Placa de aquisição, software e computador; 14 - Amplificador de potência; 15 - Controlador de excitador de vibração; 16 - Excitador de vibração; 17 - 2 Cabos de aço; 18 - Cabo de Kevlar; 19 - Amplificador; 20 - 2 baterias de 12V; 21 - Estrutura metálica; 22 - Tanque de acrílico; 23 - Mistura caulim e bentonita; 24 - Lâmina de água

Figura 2.36: Conjunto de equipamentos utilizados para a realização do ensaio de carregamento dinâmico (SAMPA, N. C., 2015).

O autor realizou ensaios em solos argilosos, obtidos a partir de misturas no laboratório de caulim (85% em massa seca), bentonita (15% em massa seca) e água, que apresentou teores de umidade em torno de 120%. Na realização dos ensaios de carregamentos estáticos e dinâmicos, com variação do ângulo de referência de 0° a 55° , foram utilizadas duas células de cargas para medir as forças aplicadas na extremidade superior e inferior da corrente que representou a amarra. Como resultado, observou-se uma atenuação estática variando de 12,9 a 18,3%, em função da variação de profundidade de embutimento da linha de ancoragem, do ângulo de aplicação de carga, da resistência não drenada da argila e do nível de força de pré-tração aplicada. Já para os ensaios de carregamento dinâmico, verificou-se que os valores de atenuação de cargas dinâmicas ficaram na faixa de 24 a 26%, valores levemente influenciados pela variação da força de pré-tração e frequência de vibração, devido à parcela viscosa da argila.

3 ESTUDO DE CASO: CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO DE ANCORAGEM DE UMA PLATAFORMA FPSO

Neste capítulo, serão apresentados os dados utilizados como base para esta pesquisa. O caso típico consiste em um projeto de ancoragem de uma estrutura flutuante, que será parcialmente reproduzido em escala de comprimento 1:10.

3.1 CASO TÍPICO

Os dados utilizados nessa pesquisa foram fornecidos pela Petrobras, e são referentes ao projeto de ancoragem de uma plataforma FPSO, que utiliza linhas de ancoragem em configuração *taut leg*, e estacas torpedo como elementos de fundação. A partir deles, foi possível obter os critérios de similaridade entre as escalas do projeto e do modelo reduzido (escala de comprimento 1:10), utilizados para calcular os níveis equivalentes de cargas que atuam no sistema de ancoragem, configurar a geometria espacial e projetar os equipamentos utilizados nos ensaios experimentais.

A seguir são demonstrados os dados referentes às características geotécnicas do solo marinho, as características geométricas e físicas do sistema de ancoragem, assim como as cargas aplicadas a ele.

3.1.1 Características Geotécnicas

Os parâmetros geotécnicos apresentados neste item, são referentes a ensaios de campo e laboratório, realizados a partir de três campos de prospecção de petróleo explorados pela Petrobras: Lula, Lula NE e Sapinhoá (denominado de Guará até 2012). O campo de Lula, está localizado na porção central da bacia de Santos, a cerca de 230 km da costa do município do Rio de Janeiro, e apresenta lâmina d'água de aproximadamente 2.200 m de profundidade (ANP, 2018). O campo de Lula NE situa-se a nordeste do campo Lula, a cerca de 300 km da costa, com lâmina d'água de aproximadamente 2.120 m (SAMPA, 2015). O Campo de Sapinhoá localiza-se também na porção central da Bacia de Santos, a cerca de 360 km da costa do estado de São Paulo e 290 km da cidade do Rio de Janeiro, com lâmina d'água de 2.140 m (ANP, 2017).

Os solos dessas regiões foram classificados, através de uma série de ensaios, como uma argila siltosa com pequenos fragmentos de conchas, normalmente adensado. As figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam os resultados de ensaios granulométricos, de amostras coletadas em diferentes localidades e profundidades.

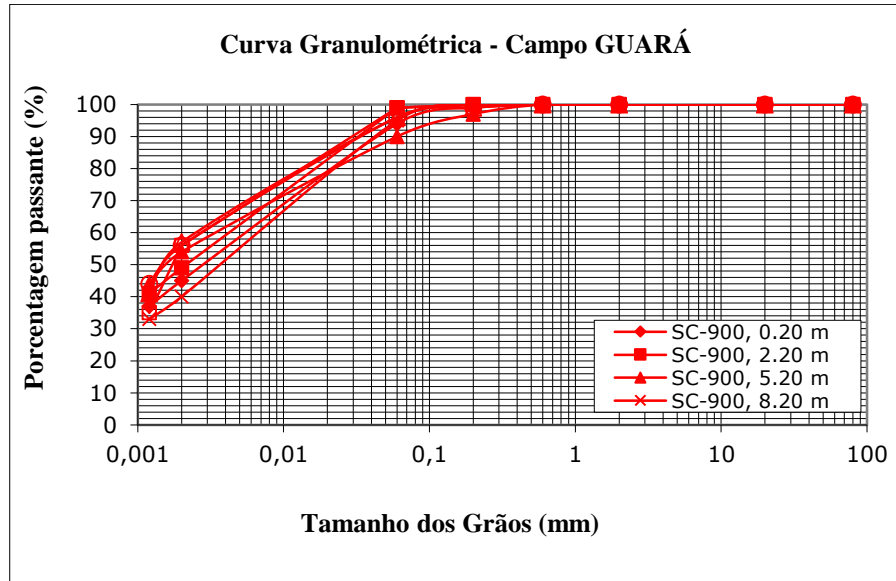


Figura 3.1: Curvas granulométricas do solo marinho do campo Guará (Dados fornecidos pela Petrobras).

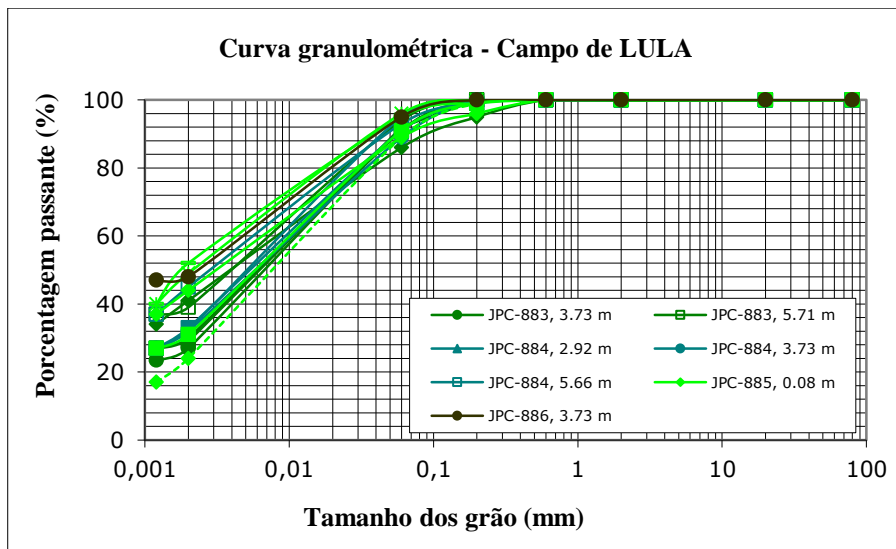


Figura 3.2: Curvas granulométricas do solo marinho do campo Lula (Dados fornecidos pela Petrobras).

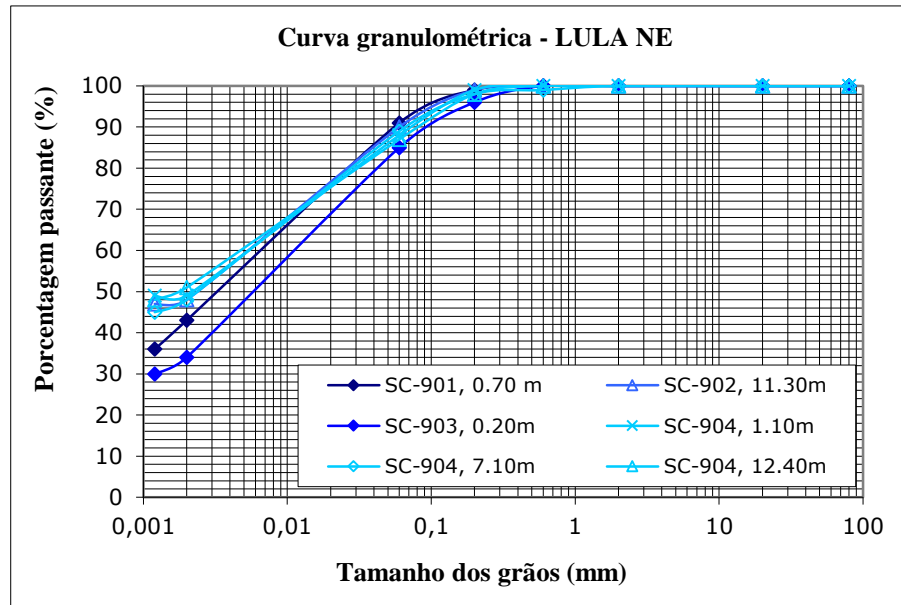


Figura 3.3: Curvas granulométricas do solo marinho do campo Lula NE (Dados fornecidos pela Petrobras).

Abaixo é apresentada a variação do teor de umidade ao longo dos primeiros 25m de profundidade (figura 3.4), assim como a variação dos valores do peso específico (figura 3.5), referente aos três campos.

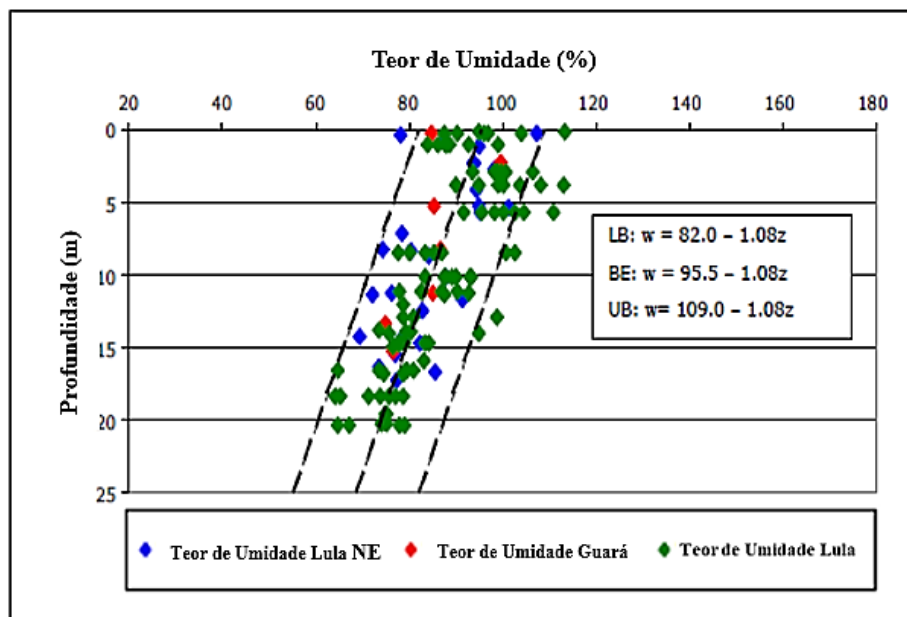


Figura 3.4: Variação do teor de umidade em função da profundidade nos três campos (Dados fornecidos pela Petrobras).

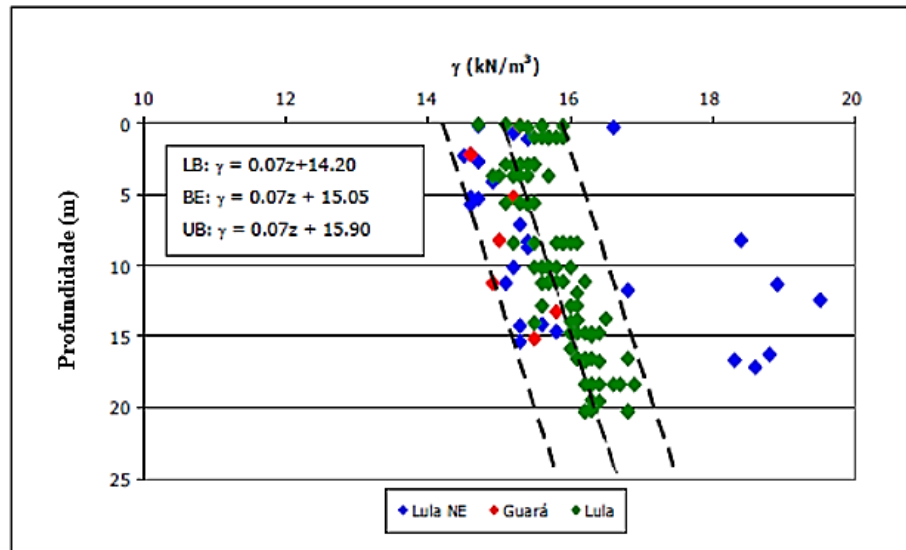


Figura 3.5: Variação do peso específico em função da profundidade nos três campos (Dados fornecidos pela Petrobras).

A figura 3.6 apresenta os limites de Atterberg para diferentes profundidades em cada um dos campos.

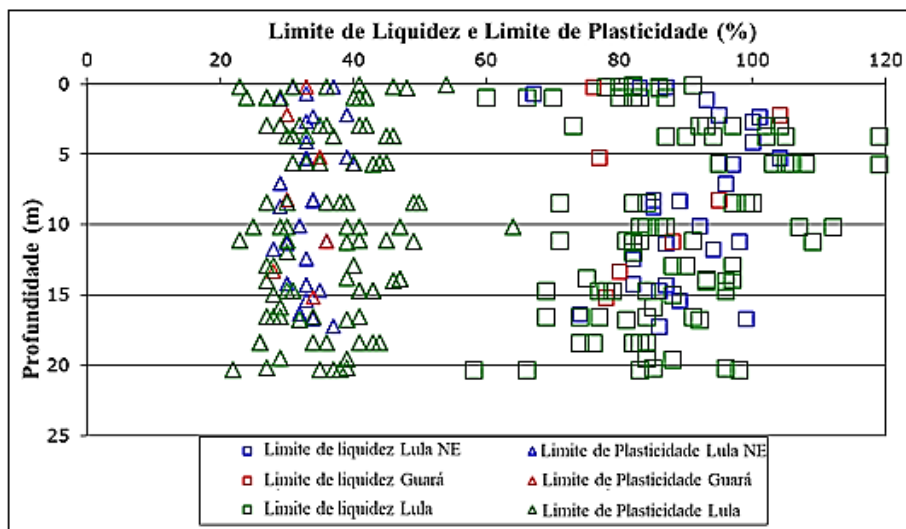


Figura 3.6: Limites de Atterberg em função da profundidade nos três campos (Dados fornecidos pela Petrobras).

Para a obtenção da resistência ao cisalhamento não drenada ao longo da profundidade, foram realizados ensaios de cisalhamento direto simples (*Direct Simple Shear - DSS*) e ensaios de piezocone (*Piezocone Penetration Test - CPTu*). A figura 3.7 demonstra os resultados obtidos.

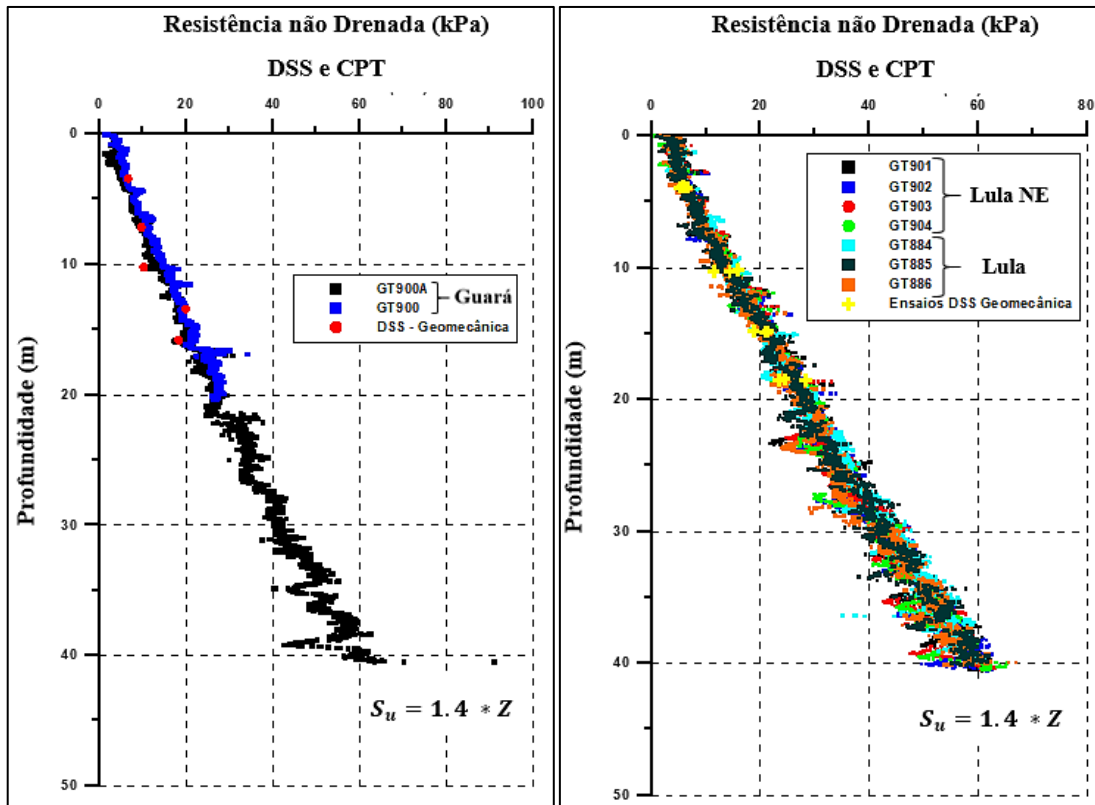


Figura 3.7: Resistência não drenada ao longo da profundidade, obtidas nos ensaios de CPTu e DSS (Dados fornecidos pela Petrobras).

Conforme os resultados demonstrados, a resistência ao cisalhamento não drenada, em função da profundidade, para os três campos, pode ser representada pela equação 3.1:

$$S_u \text{ (kPa)} = 1,4 \cdot z \quad (3.1)$$

Onde:

z: Profundidade do solo em metros.

3.1.2 Características Geométricas e Físicas do Sistema de Ancoragem

O sistema de ancoragem em análise, foi utilizado em uma plataforma FPSO ancorada na bacia de Santos, em uma região com lâmina d'água de aproximadamente 2.135m. O sistema é composto por 24 linhas em configuração *taut leg*, ancoradas no solo marinho através de estacas torpedo. Para simplificar a análise, considerou-se o mesmo comprimento e características físicas para as 24 linhas de ancoragem, o que possibilitou a utilização de apenas uma linha no modelo reduzido.

A linha de ancoragem é composta por três trechos distintos, que vão do ponto de ligação na plataforma flutuante ao ponto de conexão na estaca torpedo, conforme figura 3.8. O primeiro trecho, a partir da FPSO, é uma amarra de 550 m de comprimento e 0,120 m de diâmetro; o segundo trecho, intermediário, é um cabo de poliéster de 2.636 m de comprimento e 0,206 m de diâmetro; o terceiro e último trecho é uma amarra de 140 m de comprimento e 0,120 m de diâmetro, totalizando 3.326 m de comprimento da linha de ancoragem. As propriedades físicas e geométricas estão resumidas na tabela 3.1.

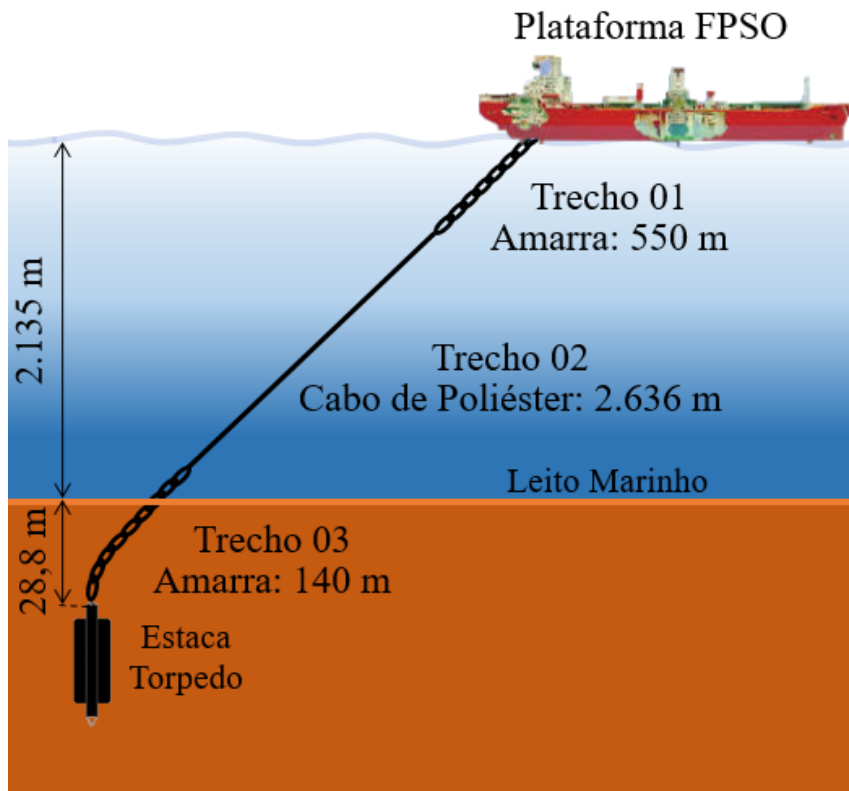


Figura 3.8: Esquema ilustrativo do caso típico analisado.

Tabela 3.1: Características a linha de ancoragem

Trecho	Material	Diâmetro Nominal (mm)	Comprimento (m)	Peso Seco (kg/m)	Peso Submerso (kg/m)
1	R4 Studless Chain	120	550	288,1	250,65
2	Cabo Poliéster	206	2636,46	27,91	7,34
3	R4 Studless Chain	120	140	288,1	250,65

(Fonte: elaborada pelo autor)

Os elementos de fundação do sistema são estacas torpedo T-120, que apresentam como características: 120 toneladas de peso, 1,219 m de diâmetro e 20,583 m de comprimento. Para a obtenção da profundidade de cravação da estaca, a Petrobras utilizou o programa computacional PROJÉTIL, que é baseado no modelo analítico proposto por True (1976), descrito no item 2.7. A distância calculada entre o leito marinho e o topo da estaca foi de 28,8m.

3.1.3 Características das Cargas Aplicadas ao Sistema

As cargas usuais que atuam na conexão entre a linha de ancoragem e a plataforma flutuante (*fairlead*) variam entre 4.000 e 7.000 kN, gerando cargas no TDP (ponto em que a linha de ancoragem toca o leito marinho) que variam de 2.600 a 6.000 kN, em torno da média aproximada de 4.000 kN, conforme mostrado na figura 3.9. Observa-se ainda, que as cargas que atuam no *fairlead* e no TDP, apresentam uma defasagem média de 1.000 kN.

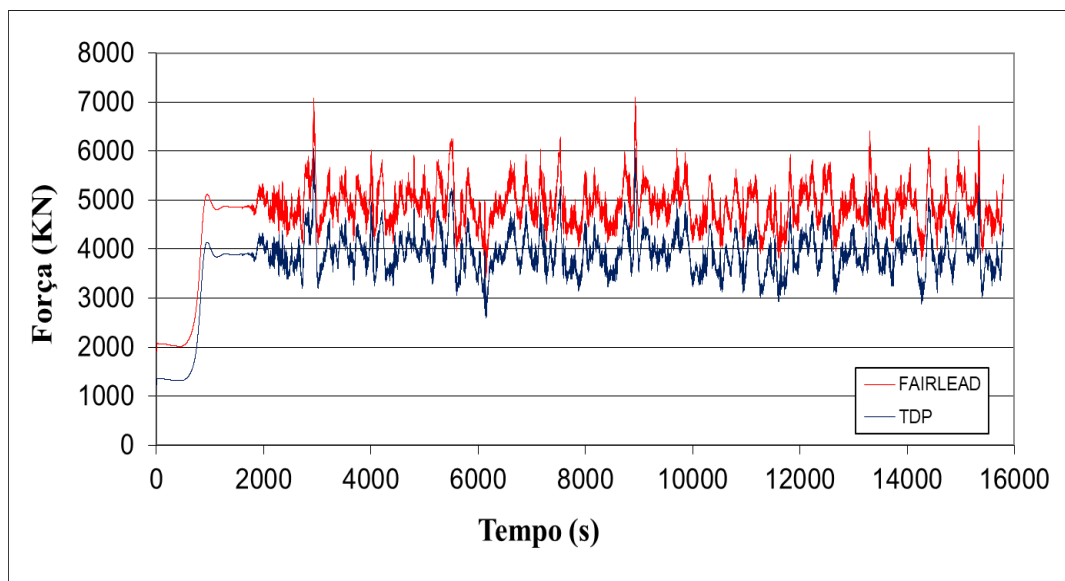


Figura 3.9: Espectro de cargas que atuam no *fairlead* e no TDP do caso típico (Dados fornecidos pela Petrobras).

4 ESTUDO DO FATOR DE ESCALA

Neste capítulo, será demonstrado de forma sucinta, o estudo que embasa a redução de escala de modelos físicos, que segue os princípios preconizados na teoria da semelhança. A partir da teoria, será procedida a análise física correspondente à redução de escala do caso típico, especificando-se as grandezas físicas que terão suas escalas alteradas e as que serão fixadas, durante a construção do modelo.

4.1 ANÁLISE DO EFEITO DE ESCALA

O modelo reduzido é a representação simplificada de um caso típico, ou de um fragmento dele, utilizado para facilitar a compreensão e a visualização dos fenômenos intervenientes, embasando amplos estudos de fenômenos físicos, por conta da facilidade de mudança nas condições de ensaio e parâmetros de entrada. Ele permite medições indiretas da magnitude dos fenômenos físicos em escala real, desde que a semelhança física seja respeitada, através de uma criteriosa análise dos parâmetros que envolvem o sistema (CARNEIRO, 1993).

A redução da escala de um caso real é regida pela teoria da semelhança, composta por um conjunto de leis, que devem ser consideradas para tornar viável a representação simplificada da realidade. O modelo deve respeitar as condições básicas de similaridade física, atendendo as condições de semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica. Na similaridade geométrica, o modelo e o caso típico devem possuir o mesmo formato, e serem relacionados por um fator de escala constante. Na cinemática, as relações de espaço-tempo devem ser empregadas seguindo uma mesma escala. A similaridade dinâmica, requer que as forças que agem em pontos homólogos mantenham relações constantes, para que as resultantes apresentem direção e sentido iguais.

4.1.1 Análise Dimensional

A análise dimensional é um recurso utilizado para simplificar um problema real através da redução do número de variáveis que fazem parte de um fenômeno físico, o qual será retratado em escala reduzida. A análise é baseada no teorema de Vaschy-Bucknghan, que considera toda relação homogênea com n parâmetros dimensionais, possível de ser substituída por outra contendo um número menor de parâmetros adimensionais, resultantes dos produtos de potências dos n parâmetros originais. Logo, através do tratamento de variáveis é possível

reduzir o número total de parâmetros de n para $n-r$, onde r é o número de unidades fundamentais. Esse tratamento de variáveis torna a análise dimensional adequada à interpretação de resultados experimentais e à elaboração de modelos paramétricos (CARNEIRO, 1993).

CARNEIRO (1993), descreve que uma variável física expressa numericamente grandezas divididas em primárias e derivadas. Segundo o autor, as grandezas primárias são medidas de grandezas fundamentais, independentes das unidades escolhidas, como o tempo, comprimento e massa. Já as grandezas derivadas são aquelas formadas por combinações de grandezas primárias, como a velocidade, força, volume e etc. A tabela 4.1 demonstra as grandezas fundamentais, definidas no Sistema Internacional de Unidades (SI).

Tabela 4.1: Grandezas fundamentais (SI)

Grandeza Fundamental (SI)	Unidades (SI)	Símbolo nas Fórmulas Dimensionais
Comprimento	Metro (m)	L
Massa	Quilograma (kg)	m
Tempo	Segundo (s)	T
Corrente elétrica	Ampére (A)	I
Quantidade de Substância	Mol (mol)	mol, N
Intensidade luminosa	Candela (cd)	Iv
Temperatura termodinâmica	Kelvin (K)	θ

(Fonte: elaborada pelo autor)

Supondo-se um sistema físico qualquer, que apresenta como parâmetros básicos A, B e C, Pode-se determinar uma relação entre os três a partir de uma análise das unidades de medidas dessas três grandezas, através da matriz dimensional mostrada abaixo:

$$[A] = L^{(a)}M^{(b)}T^{(c)} \quad (4.1)$$

$$[B] = L^{(a)}M^{(b)}T^{(c)} \quad (4.2)$$

$$[C] = L^{(a)}M^{(b)}T^{(c)} \quad (4.3)$$

Onde os colchetes representam as unidades de medida do parâmetro estudado, escritas em função de três unidades fundamentais: comprimento L (metros), massa M (quilograma), e tempo T (segundos), escolhidas por representarem a maior parte dos princípios utilizados na dinâmica estrutural. Ressalta-se, que as grandezas subordinadas às unidades fundamentais, são denominadas de grandezas fundamentais (L, M e T), e as demais são denominadas de unidades e grandezas derivadas. O expoente de cada unidade fundamental é denominado dimensão ou expoente de dimensão, determinado de acordo com as grandezas fundamentais. Abaixo é demonstrado um exemplo aplicado ao parâmetro de frequência (f):

$$[f] = m^0kg^0s^{-1} = 1/s = \text{Hz} \quad (4.4)$$

Dessa forma, conhecendo-se os parâmetros que constituem o processo físico estudado, é possível formar a matriz dimensional, utilizada para se efetuar a mudança de escala do modelo, onde os elementos que a constituem são os expoentes dos parâmetros derivados das grandezas fundamentais. A tabela 4.2 apresenta os expoentes dimensionais de algumas grandezas que fazem parte da dinâmica estrutural.

Tabela 4.2: Expoentes dimensionais de grandezas utilizadas em análise dinâmica estrutural.

Grandezas Derivadas	Unidades	Símbolos	Grandezas Fundamentais		
			L	M	T
Comprimento	Metro (m)	L	1	0	0
Massa	Quilograma (kg)	m	0	1	0
Tempo	Segundo (s)	T	0	0	1
Força	Newton (N)	F	1	1	-2
Momento	Newton Metro (Nm)	M	2	1	-2
Frequência	Hertz (Hz)	f	0	0	-1
Módulo de Elasticidade	Pascal (Pa)	E	-1	1	-2
Tensão (pressão, coesão, etc.)	Pascal (Pa)	σ	-1	1	-2
Massa por Unidade de Comprimento	Quilograma/Metro (Kg/m)	-	-1	1	0

(Fonte: elaborada pelo autor)

De acordo com Rocha (2013), para o cálculo da nova escala física que pretende-se utilizar, deve-se realizar primeiramente a mudança de base do sistema físico estudado, procedida através da substituição das grandezas de base L, M e T, por novas grandezas de base compostas por A, B e C. Dessa forma, as escalas das novas grandezas de base podem ser escritas em função das grandezas fundamentais, conforme a matriz dimensional demonstrada abaixo:

$$[A] = L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T} \quad (4.5)$$

$$[B] = L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T} \quad (4.6)$$

$$[C] = L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T} \quad (4.7)$$

Onde, os expoentes dimensionais constituem a matriz dimensional da nova base:

$$D = \begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Ressalta-se, que para a substituição de grandezas ser válida, a nova base deve ter o mesmo número de grandezas que a base fundamental, as dimensões entre os novos parâmetros devem ser independentes e o determinante da matriz diferente de zero.

Tomando-se agora o logaritmo de todos os termos, tem-se:

$$\log A = (L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T}) = a_L \log L + a_M \log M + a_T \log T \quad (4.9)$$

$$\log B = (L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T}) = b_L \log L + b_M \log M + b_T \log T \quad (4.10)$$

$$\log C = (L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T}) = c_L \log L + c_M \log M + c_T \log T \quad (4.11)$$

Ao se reescrever a equação na forma matricial, temos:

$$\begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Invertendo a equação:

$$\begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Onde:

$$\begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} a_A & b_A & c_A \\ b_A & b_B & c_B \\ c_A & c_B & c_C \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Substituindo-se a equação 4.14 na equação 4.13, e retornando-se à forma polinomial, tem-se:

$$\log L = \log A^{a_A} + \log B^{a_B} + \log C^{a_C} = (A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C}) \quad (4.15)$$

$$\log M = \log A^{b_A} + \log B^{b_B} + \log C^{b_C} = (A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C}) \quad (4.16)$$

$$\log T = \log A^{c_A} + \log B^{c_B} + \log C^{c_C} = (A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C}) \quad (4.17)$$

Retornando-se às grandezas fundamentais calculadas a partir das novas grandezas de base obtemos:

$$L = A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C} \quad (4.18)$$

$$M = A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C} \quad (4.19)$$

$$T = A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C} \quad (4.20)$$

Com o resultado, é possível calcular qualquer escala de grandeza derivada em relação às escalas das novas grandezas de base. De forma genérica, dada uma grandeza X cuja unidade tenha expoentes dimensionais α , β e γ em relação às grandezas fundamentais (equação 4.21):

$$[X] = L^\alpha M^\beta T^\gamma \quad (4.21)$$

Podemos substituir os termos L, M e T, pelas equações 4.18, 4.19, 4.20, obtendo-se:

$$[X] = (A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C})^\alpha (A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C})^\beta (A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C})^\gamma \quad (4.22)$$

Ao se fatorar as bases da equação 4.22, chega-se na equação 4.23

$$[X] = A^{(\alpha a_A + \beta b_A + \gamma c_A)} B^{(\alpha a_B + \beta b_B + \gamma c_B)} C^{(\alpha a_C + \beta b_C + \gamma c_C)} \quad (4.23)$$

Essa equação representa uma fórmula geral para se calcular a escala de qualquer grandeza derivada, através da matriz dimensional inversa do novo conjunto de grandezas de base escolhidas (Rocha, 2013).

4.2 ANÁLISE DIMENSIONAL APLICADA AO CASO TÍPICO

Rocha *et al* (2013), apresentam em seu estudo considerações sobre leis de semelhança em modelos reduzidos, aplicadas aos fenômenos geotécnicos. Segundo os autores, tais modelos devem obedecer hipóteses claras em relação as leis de semelhanças empregadas para representar o fenômeno que ocorre em escala real. Assim, cada parâmetro deve ter uma regra de correspondência, resultando em uma correlação direta com o fenômeno físico estudado. Na prática, tenta-se ajustar ao máximo o modelo reduzido ao caso típico estudado, porém é muito difícil uma condição de semelhança completa entre eles, tendo em vista principalmente, o fato de algumas grandezas físicas não serem ajustadas corretamente quando se trabalha em determinadas escalas.

Os autores descrevem que é essencial definir quais são as grandezas físicas possíveis de serem controladas e quais são relevantes ou não ao fenômeno estudado, para que seja escolhida a lei de semelhança mais adequada ao estudo. As grandezas fundamentais, ou de base, apresentadas no sistema internacional de unidades, mais relevantes aos fenômenos mecânicos da geotecnia são: comprimento; massa e tempo.

Tratando-se de fenômenos geotécnicos, sabe-se que os mecanismos que envolvem a ruptura do solo dependem primordialmente da tensão vertical efetiva (equação 4.24). Então, baseando-se na Teoria de Análise Dimensional (CARNEIRO, 1993), pode-se definir um sistema de grandezas de base constituído por três parâmetros: o comprimento (z), de escala livre; a massa

específica (ρ) de escala fixa; e a aceleração da gravidade (g) também de escala fixa. Todas as outras grandezas envolvidas no fenômeno podem ser derivadas delas.

$$\sigma'_{v0} = \rho \cdot g \cdot z \quad (4.24)$$

Rocha *et al* (2013) justificam a escolha desse conjunto de grandezas pelos seguintes fatos: pode-se realizar o ensaio sem a necessidade do emprego de uma centrífuga, devido a aceleração da gravidade se manter inalterada; e com a massa específica inalterada, em muitos casos, é possível utilizar no modelo reduzido o próprio material do caso típico (solo, estruturas metálicas, materiais cimentados, etc).

A elaboração do modelo reduzido apresentado nessa dissertação, foi baseada nos parâmetros obtidos a partir da planilha de cálculo de escalas, elaborada por Rocha *et al* (2013). A tabela 4.3 apresenta o resultado da análise, feita através da planilha, para a escala de comprimento 1:10, utilizada nessa pesquisa.

Tabela 4.3: Grandezas de base e suas derivadas a partir da escala de comprimento 1:10.

Grandezas de Base	Símbolo	Unidade	L	M	T	Escala Inversa
Comprimento	\mathcal{L}	m	1	0	0	10
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	1
Aceleração (da gravidade)	g	m/s ²	1	0	-2	1
Grandezas Derivadas	Símbolo	Unidade	L	M	T	Escala Inversa
Comprimento	\mathcal{L}	m	1	0	0	10
Massa	\mathcal{M}	kg	0	1	0	1000
Tempo	\mathcal{T}	s	0	0	1	3,16
Aceleração (da gravidade)	g	m/s ²	1	0	-2	1
Força	\mathcal{F}	N	1	1	-2	1000
Momento	\mathcal{M}	Nm	2	1	-2	10000
Tensão (pressão, módulos, coesão, etc.)	σ	Pa	-1	1	-2	10
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	1
Massa por Unidade de Comprimento	-	Kg/m	-1	1	0	100

(Fonte: Adaptado de ROCHA *et al*, 2013)

4.2.1 Conversão de Escala Aplicada ao Solo

Em solos argilosos a resistência ao cisalhamento não drenado (S_u) é representada por uma unidade de tensão. Logo, com o sistema de escalas proposto, o valor de S_u segue a mesma escala de conversão do comprimento (1:10). Dessa forma, o solo onde será feito o ensaio experimental, deverá apresentar resistência proporcional à conversão de escala utilizada, com características geotécnicas similares as das argilas encontradas na bacia de Santos.

No caso típico, a distância entre o leito marinho e o *padeye* é de 28,8 m, e a resistência ao cisalhamento não drenada nessa profundidade, de acordo com a equação 3.1, é de 40,32 kPa. Aplicando-se a conversão de escala (1:10), obtém-se uma distância entre a superfície do terreno e ponto de aplicação de carga, de aproximadamente 2,9 m, com resistência ao cisalhamento não drenada em torno de 4 kPa. Porém, o ponto de aplicação de carga será adotado na profundidade de 3 m durante o ensaio, visando facilitar as medições em campo.

4.2.2 Conversão de Escala Aplicada à Linha de Ancoragem

A amarra utilizada no trecho 03 do caso típico, é a R4 *Studless* com 120 mm de diâmetro e peso linear de aproximadamente 288 kg/m. Aplicando-se a conversão de escala do comprimento (1:10) e da massa por unidade de comprimento (1:100), o diâmetro da amarra utilizada no modelo reduzido deve corresponder a 12 mm, com peso linear de 2,88kg/m. Os trechos 01 e 02 não foram analisados, pois o objetivo do ensaio é estudar a atenuação que ocorre no trecho da linha de ancoragem embutida no solo.

4.2.3 Conversão de Escala Aplicada ao Carregamento

Para desenvolver os equipamentos de ensaio, considerou-se o valor de 7.100 kN como carga máxima que atua na linha de ancoragem, de acordo com o espectro de cargas mostrado na figura 3.9. Aplicando-se o fator de escala 1:1.000, essa carga corresponde a 7,1 kN no modelo reduzido. Vale ressaltar, que foi considerado o ângulo máximo de 45° para a aplicação dessa força, valor limite alcançado em sistemas de ancoragem *taut leg*.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será apresentada a modelagem numérica realizada para se determinar a configuração espacial e as dimensões do par de aletas laterais, que serão acopladas ao tubo metálico, utilizado para inserir a corrente ensaiada no solo até a profundidade determinada. As aletas serão utilizadas para garantir a reação necessária à força aplicada na corrente, sem que ocorra deslocamentos excessivos do conjunto de tubos metálicos.

Para se obter comportamentos similares aos que ocorrerão durante os ensaios em campo, optou-se por utilizar na modelagem numérica, as características e parâmetros geotécnicos do campo experimental onde serão realizados os futuros ensaios do projeto ACISLA. Logo, neste capítulo também será apresentado o campo experimental julgado adequado à representar as argilas marinhas.

5.1 CAMPO EXPERIMENTAL DE TUBARÃO

O campo experimental analisado está localizado no município de Tubarão, mais precisamente no delta do Rio Tubarão, entre os municípios de Tubarão, Laguna e Jaguaruna, ao sul do estado de Santa Catarina (A figura 5.1). O local é uma região de depressão, onde se depositam argilas, siltes e sedimentos orgânicos, transportados pelo rio, até às margens da bacia inundada.



Figura 5.1: Localização do município de Tubarão (adaptado de HIGASHI, F. A. dos R., 2006).

Ângulo *et al* (2006), descrevem que os depósitos sedimentares presentes ao longo da costa brasileira são, principalmente, resultado da variação do nível do mar ocorrida durante os últimos 1 milhão de anos, no período quaternário. O autor também estima que o sistema lagunar do delta do Tubarão foi formado pela elevação do nível relativo do mar, que na região atingiu seu máximo a mais de 5.000 anos AP (antes do presente). Estudos realizados por Giannini (1993) e Nascimento (2010), demonstram que os primeiros 20 metros da camada superior do depósito foram formados no período Holoceno, posterior a glaciação mais recente, apresentando predominantemente solos normalmente adensados.

Odebrecht e Schnaid (2018), remontam como ocorreu a evolução da baía ao longo da costa nos últimos 8.000 anos. Segundo os autores, os depósitos sedimentares do Holoceno, presentes no delta do rio Tubarão, começaram com a deposição de lentes transgressivas de sedimentos, correspondentes a superfície de inundação marinha inicial, que se formou durante uma elevação do nível relativo do mar a uma taxa superior a de entrada de sedimentos (figura 5.2a). A aproximadamente 5.500 e 4.000 AP ocorreu no local uma redução do nível do mar, que gerou a formação de uma barreira, levando ao balanceamento entre o nível do mar e a entrada de sedimentos (figura 5.2b), a presença dessa barreira foi acompanhada por uma redução suave do nível do mar, assim ela começou a restringir a circulação hidrodinâmica dentro da baía, transformando-a em uma laguna (figura 5.2c). O estágio final, que vem ocorrendo nos últimos 1700 anos, foi marcado pela expansão da barreira, com sua chegada dela no delta, e o avanço das dunas eólicas nas margens externas da laguna (figura 5.2d). Todas essas condições ambientais resultaram em solos moles que variam entre normalmente adensados a levemente pré-adensados, com elevado teor de umidade, elevada quantidade de matéria orgânica, alta compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento. Os autores também apresentam o valor de índice de rigidez (I_r) do solo de Tubarão estimado em 100, através dos valores de módulo cisalhante (G) obtidos em ensaios triaxiais.

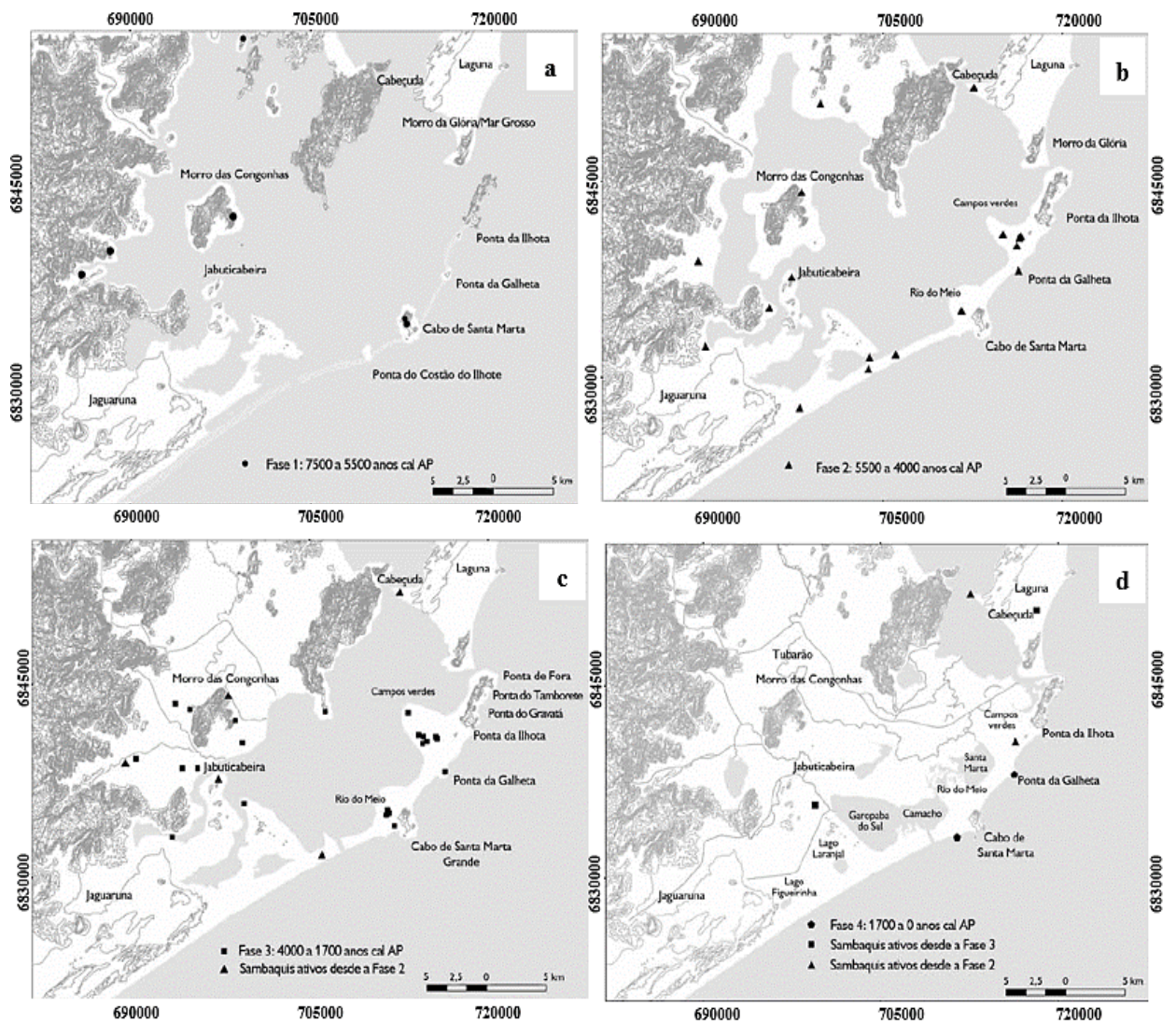


Figura 5.2: Sistemas deposicionais quaternários do delta do Rio Tubarão (adaptado de GIANNINI, P. C. F., 2010).

Para a escolha do campo experimental adequado a representar as argilas marinhas do caso típico, foram realizados ensaios in situ e laboratório, visando analisar o perfil estratigráfico do solo, assim como suas características físicas e geotécnicas. Ao todo foram executadas quatro campanhas de sondagens, em três regiões diferentes do campo experimental (figura 5.3).



Figura 5.3: Localização das regiões onde foram realizadas as campanhas de ensaio para definição do local de ensaio desta pesquisa (imagens do Google Earth pro em 15/01/2020).

Após a análise dos resultados dos ensaios, concluiu-se que a região 02 apresenta um perfil de solo argiloso com características similares à referência fornecidas pela Petrobras. As regiões 01 e 03 foram descartadas por conta dos seus perfis de resistência ao cisalhamento não drenada ao longo da profundidade, apresentarem valores maiores que os de referência da Petrobras. Os resultados completos das sondagens 01, 02, 03 e 04, encontram-se no anexo A.

A realização dos futuros ensaios de atenuação de cargas estáticas em linhas de ancoragem, será procedida no local da sondagem 04 (coordenadas geográficas: 28°33'10.7"S 49°00'04.6"W). Nesse local, os resultados dos ensaios de CPTu e palheta (figuras 5.4 e 5.5), demonstraram que entre 2 m e 9 m os valores de OCR se mantêm próximos de 1; ocorre o aumento de q_t ; e há geração do excesso de poropressão durante a cravação do piezocone. Comportamentos que indicam a presença de depósitos predominantemente argilosos e/ou argilo-siltosos, normalmente adensados, condizente com o solo do caso típico. Porém, Ressalta-se que para a tomada de decisão, também se levou em consideração as condições de acesso ao local e a logística de execução dos ensaios.

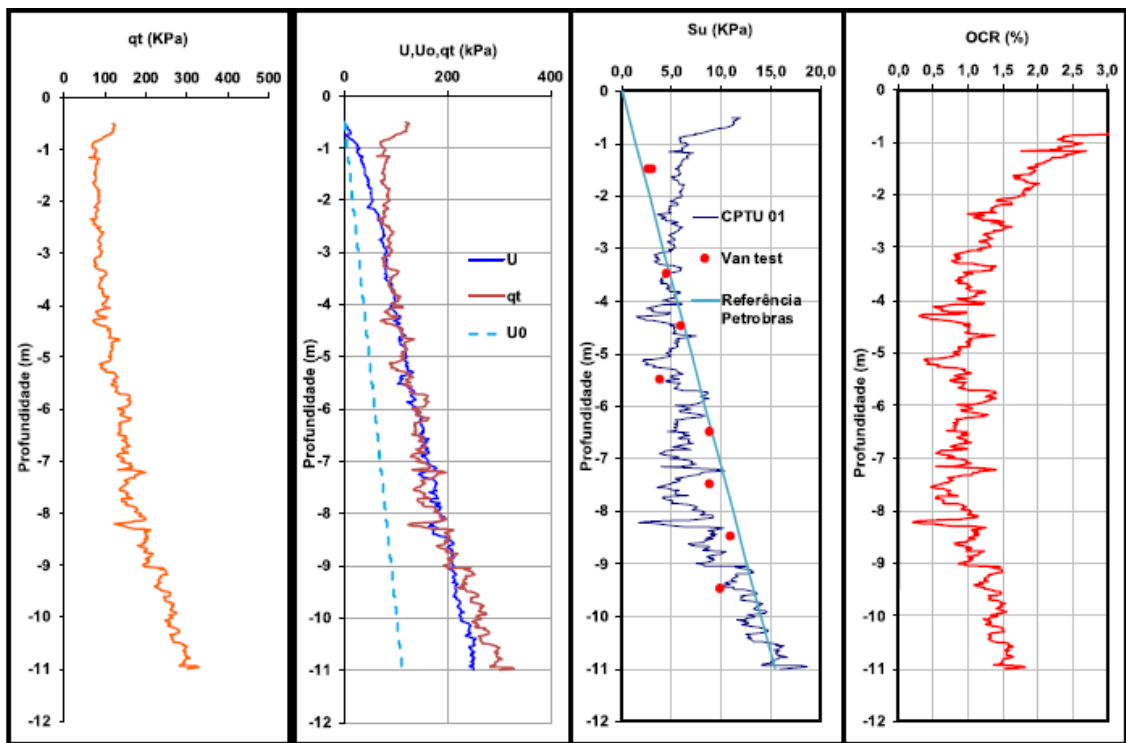


Figura 5.4: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 04 (furo 01).

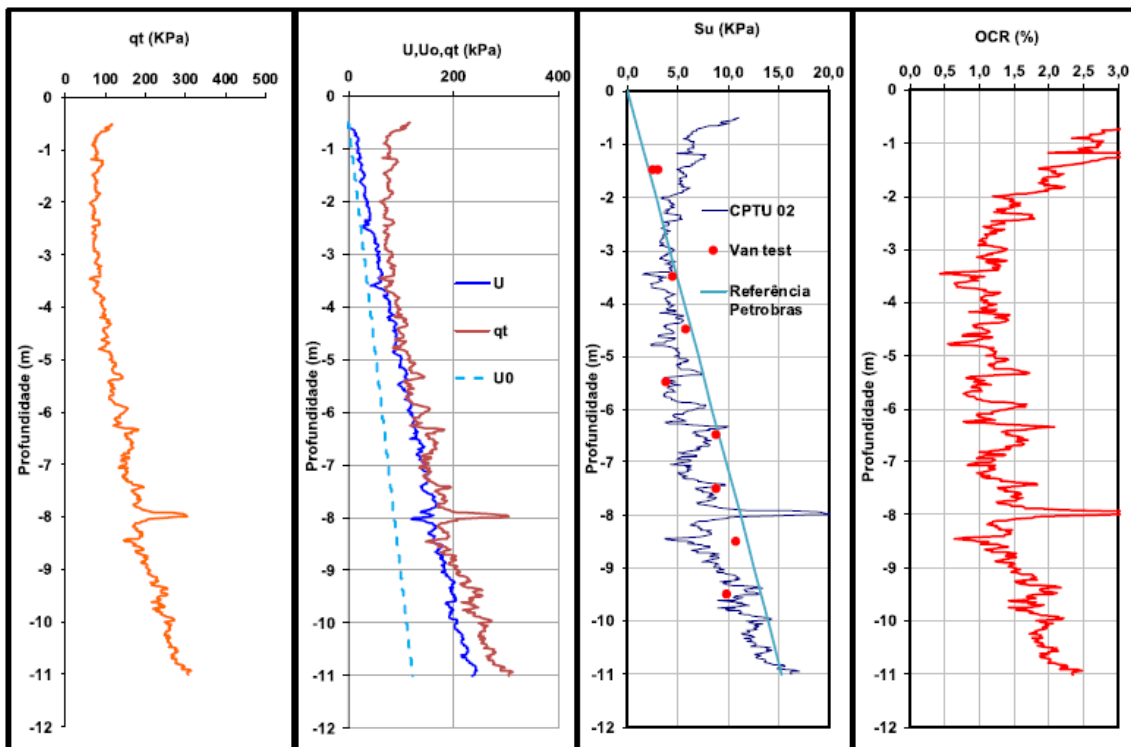


Figura 5.5: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 04 (furo 02).

Os ensaios em laboratório foram feitos a partir de amostras indeformadas coletadas no local da sondagem 04, entre as profundidades de 2 m e 2,60 m, com o auxílio de mostradores Shelby (figura 5.6). A tabela 4.1 contém os resultados obtidos.



Figura 5.6: Tubos de *Shelby* com amostras coletadas em campo.

Tabela 5.1: Caracterização em laboratório do solo de Tubarão.

Propriedades do solo	Unidade	Valor
Peso Específico Natural (γ_n)	kN/m^3	11,9 a 16
Peso Específico Aparente Seco (γ_d)	kN/m^3	4,3
Peso Específico Real dos Grão (γ_s)	kN/m^3	28,2
Umidade Natural (ω)	%	177,6
Índice de Vazios (e)	-	5,56
Grau de Saturação (S)	%	91,9
Resistência ao Cisalhamento Não Drenada (S_u)	kN/m^2	4,7

(Fonte: elaborada pelo autor)

Com base nas características geomorfológicas, resultados dos ensaios de campo e caracterização do solo em laboratório, julgou-se o campo experimental de Tubarão adequado à

realização da futura campanha de ensaios em modelo reduzido do projeto ACISLA, tendo em vista seus parâmetros e características descritos acima, que seguem a mesma tendência de comportamento e ordem de grandeza dos valores medidos no caso típico, demonstrando um solo similar ao encontrado na bacia de Santos. Vale ressaltar ainda, que o nível de água no terreno encontrava-se a 0,5 m de profundidade, tornando-o capaz de representar as condições submersas do solo marinho.

5.2 DIMENSIONAMENTO DAS ALETAS

O embutimento da corrente que irá simular a linha de ancoragem no interior do solo, será feito com o auxílio de tubos metálicos, os mesmos utilizados no equipamento *piezocone penetration test* (CPTu). Cada tubo apresenta 37 mm de diâmetro externo e 16mm de diâmetro interno, com o comprimento de 1 m, com roscas de ligação em suas extremidades. Para garantir a reação necessária à força aplicada na corrente durante o ensaio, e manter o alinhamento do conjunto, decidiu-se acoplar duas aletas laterais no seguimento de tubo em que a corrente será ligada. Para se determinar a área da face das aletas, assim como suas dimensões e espessura, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) tridimensional. Através do processo de tentativas e erros, buscou-se encontrar a melhor configuração possível a ser executada, que retornasse o menor deslocamento do primeiro segmento de tubo, no qual as aletas foram acopladas, denominado de guia de ancoragem.

O MEF consiste, basicamente, em dividir um meio contínuo em um conjunto de elementos, conectados por um número finito de pontos nodais, sendo possível prever seu comportamento de tensão-deformação através de cálculos iterativos. Inicialmente, optou-se por esse método por ele possibilitar uma representação mais fidedigna possível da complexa interação entre o equipamento e o solo. Logo, o modelo de ensaio foi implementado tridimensionalmente no programa computacional Abaqus/CAE 2017.

Na modelagem, considerou-se o comportamento físico do solo através do modelo constitutivo elástico perfeitamente plástico, com critério de ruptura proposto por Tresca, que considera apenas o parâmetro de tensão cisalhante que atua no meio, independente das tensões principais, ocorrendo a plastificação (ou falha) quando a tensão atinge um valor crítico. O software utilizado não apresenta a escolha direta desse critério, porém sabe-se que o critério de Mohr-Coulomb, disponível no programa, apresenta um caso particular de análise, que ao se igualar o

ângulo de atrito interno (ϕ) a zero, ele passa a coincidir com o critério de Tresca, resultando em um vetor incremental de deformações plásticas $d\bar{\epsilon}^p$, normal à superfície de escoamento e ao eixo das deformações plásticas volumétricas, indicando que estas são nulas $d\epsilon_v^p = 0$ (figura 5.7).

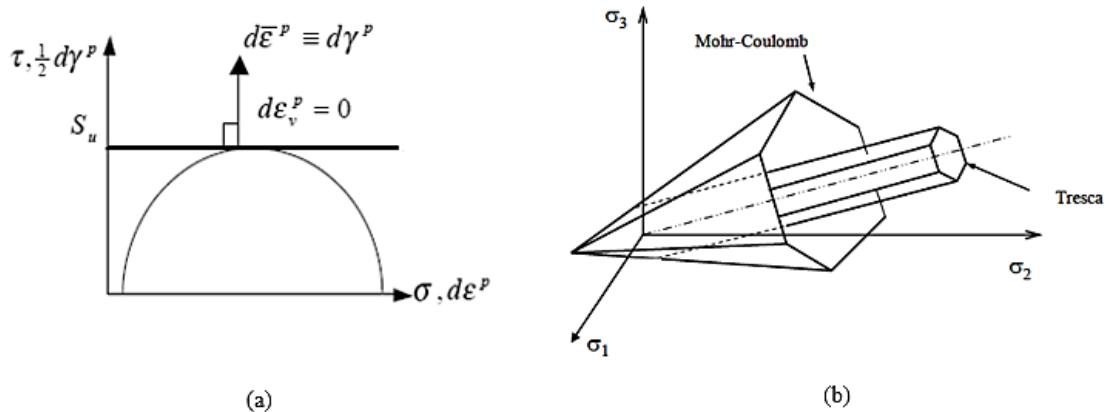


Figura 5.7: superfícies de escoamento: (a) superfície de Tresca no plano - com lei de fluxo associada; (b) superfícies de Mohr-Coulomb e Tresca no espaço das tensões principais (adaptado de Systèmes, D., 2016).

O solo foi admitido como um material isotrópico solicitado por um carregamento rápido, caracterizando uma condição de carregamento totalmente não drenada. Esse tipo de sollicitação é representado por um coeficiente de Poisson (ν) não-drenado igual a 0,5, contudo, esse valor gera problemas numéricos graves nos cálculos, pois todos os termos da matriz constitutiva do elemento tenderiam ao infinito. Para evitar este tipo de problema, adotou-se o valor igual a 0,49, usualmente indicado na literatura (POTTS et al., 1999 apud COSTA, R. G. B., 2008).

Os parâmetros geotécnicos utilizados na análise elástica foram: o módulo de elasticidade (E), estimado em 1.200 kPa, através da equação 5.1, utilizando-se o módulo cisalhante do solo (G), determinado pela equação 5.2 que utiliza o índice de rigidez (I_R), apresentado no item 4.2; o coeficiente de Poisson (ν) adotado como 0,49; e peso específico de 14 kN/m³, média dos valores demonstrados na tabela 5.2; o coeficiente de empuxo em repouso do solo (K_0), adotado igual a 1,0, pois o solo deve apresentar um comportamento incompressível ou quase-incompressível, hipótese válida para análises não-drenadas de solos argilosos.

$$E = G \cdot 2 (1 + \nu) \quad (5.1)$$

$$G = I_r \cdot S_u \quad (5.2)$$

Já para a análise plástica foi utilizada uma resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) variável com a profundidade, definida pela fórmula 3.1, que estima uma resistência de aproximadamente 4,2 kPa em 3 m, profundidade adotada para o ponto de aplicação de carga. Para variar a resistência do solo ao longo da profundidade, foi necessário fazer divisões a cada 20 cm ao longo da profundidade, nas quais se aplicou a resistência S_u calculada na cota central de cada camada.

As propriedades mecânicas utilizadas para a simulação das aletas, são referentes a uma chapa comercial com 4,7 mm de espessura, fabricada em aço 1020. Esse material apresenta peso específico de 77 kN/m³, módulo de elasticidade de 200 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 e limite de escoamento em 420 MPa. Tendo em vista que esse é o mesmo aço que compõem os tubos metálicos, essas propriedades também foram aplicadas a eles.

O modelo numérico foi construído a partir de elementos sólidos isoparamétricos, aplicados aos tubos metálicos, à guia de ancoragem e à massa de solo. Na interface de contato entre o solo e o equipamento, foram empregados elementos de contato do tipo superfície-superfície, considerando-se uma rugosidade de contato nula, definido por um par de elementos associados: elementos “mestres” (alvo), que usualmente são posicionados sobre a superfície mais rígida; e elementos “escravos” (contato), que são posicionados tipicamente sobre a superfície mais flexível.

O maciço de solo argiloso foi modelado com malhas de elementos tetraédricos sólidos, de 4 nós (C3D4) e interpolação linear. Para aproximar a simulação a um maciço “infinito” de solo, envolvendo o equipamento, adotou-se uma forma cilíndrica de base circular, com 9 m de diâmetro e profundidade, sendo essa última composta por 3 m iniciais, até o ponto de aplicação de carga, mais o valor adicional de 6 m, evitando-se, dessa forma, que ocorresse efeitos de borda.

Os tubos metálicos e as aletas também foram modelados com malhas de elementos tetraédricos sólidos, de 4 nós (C3D4) e interpolação linear. A análise do comportamento estrutural deles manteve-se dentro do intervalo elástico.

Em relação ao nível de refinamento da malha de elementos finitos aplicada ao solo, optou-se por utilizar nas regiões mais solicitadas (entorno dos tubos e da guia de ancoragem), elementos

com dimensões de 10 cm. Já nas demais regiões, foi feita uma malha com dimensões variando de 15 cm a 70 cm, onde a malha de maior dimensão corresponde aos elementos de borda, que não são solicitados.

Na construção da malha de elementos finitos dos tubos metálicos, foram utilizados elementos com dimensões de 10 cm. No topo e na base do conjunto de tubos foram considerados 8 nós aplicados na circunferência interna e 8 nós aplicados à externa.

Para as aletas adotou-se o formato trapezoidal, visando facilitar a cravação e a extração do equipamento no solo. Elas foram modeladas a partir de elementos com dimensões de 10 cm. A figura 5.8 demonstra o refinamento das malhas aplicadas ao solo, aos tubos metálicos e aletas.

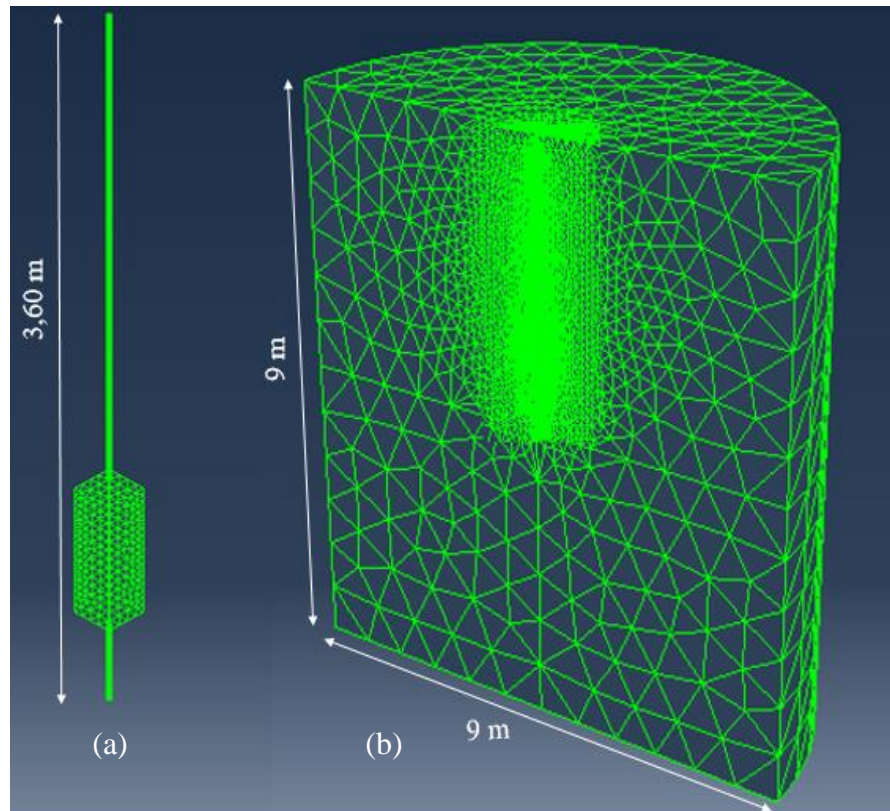


Figura 5.8: Malhas de elementos finitos: (a) malha aplicada aos tubos metálicos e às aletas; (b) malha aplicada ao maciço de solo.

A carga máxima que será utilizada no ensaio é de 7,1 kN, aplicada de forma progressiva na corrente, causando variações no ângulo formado entre ela e o eixo vertical, iniciando em 0° , até atingir um ângulo máximo de 45° . Porém, para a concepção do projeto adotou-se um fator de segurança igual a 2, considerando-se assim, uma força aplicada à corrente (F_a) de 14,2 kN.

Para a modelagem das aletas, é necessário considerar a maior componente horizontal dessa força (f_h), alcançada no ângulo (θ) de 45° , o máximo permitido no ensaio. Logo, esse componente é calculado pela equação 5.3, que retorna um valor aproximado de 10 kN.

$$f_h = \cos \theta \cdot F_a \quad (5.3)$$

Nas condições de contorno aplicadas ao modelo, foi estabelecido que os nós sobre a superfície lateral do maciço de solo podiam transladar apenas ao longo do eixo vertical, sendo restringido seu movimento no eixo horizontal. Na face inferior do maciço e na parte superior dos tubos metálicos, foram aplicados engastes, restringindo os deslocamentos em todos os eixos no plano cartesiano. A figura 5.9 demonstra as condições de contorno aplicadas ao modelo, ressalta-se que U e UR representam o deslocamento e a rotação, respectivamente.

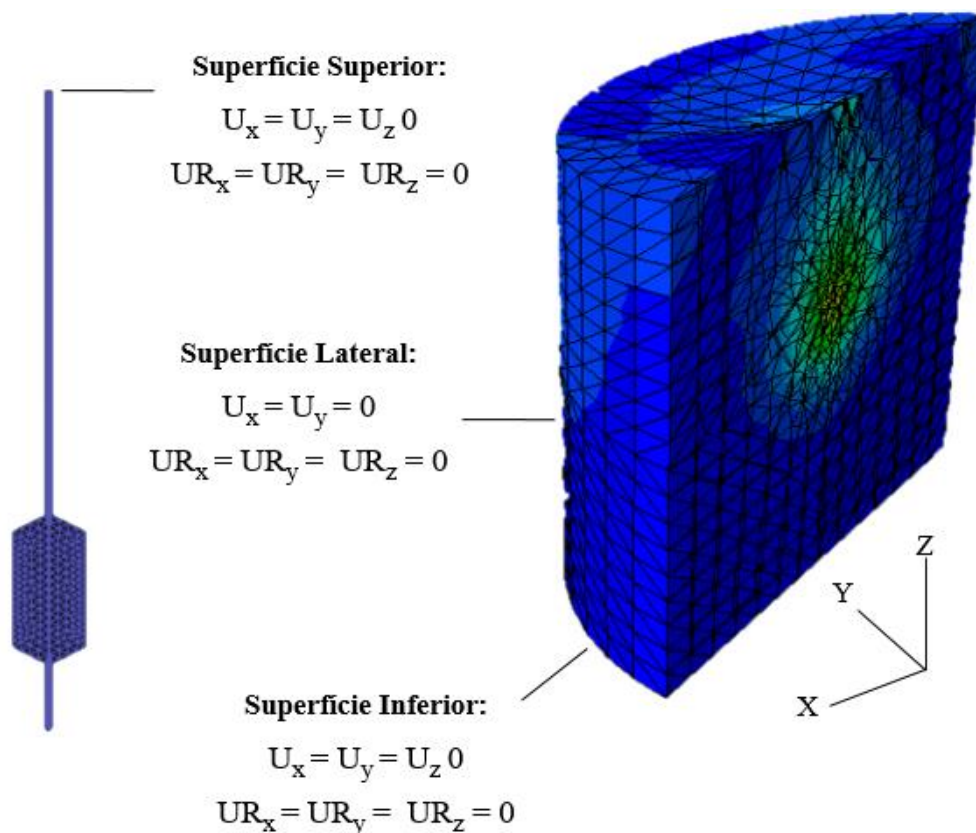


Figura 5.9: Condições de contorno aplicadas ao modelo (deformação do maciço de solo aumentada em 2.000 vezes).

Para o momento anterior ao início da aplicação da carga horizontal concentrada, adotou-se a seguinte hipótese: o solo apresentava apenas tensões geradas pelo peso próprio do maciço, e os tubos e a guia de ancoragem já estavam cravados previamente. Logo, não se considerou nenhuma perturbação no campo de tensões devido à presença do equipamento.

A análise foi efetuada em duas etapas: na primeira, denominada geostática, foi gerado o carregamento resultante do peso próprio dos elementos da modelagem, considerando-se uma aceleração da gravidade de $9,81 \text{ m/s}^2$, o que gerou um estado de tensões equilibrado com o estado de tensão inicial, predefinido no programa, ocorrendo deformações praticamente nulas. Na segunda etapa ocorreu a aplicação da força horizontal concentrada na guia, a carga foi aplicada em um único momento, considerando um carregamento rápido e não drenado. Durante essa etapa, independente do comprimento dos tubos cravados no solo, a profundidade do ponto de aplicação de carga foi mantida sempre em 3 m.

Diversas configurações de aletas foram testadas no programa, variando-se as dimensões, quantidade, espessura, assim como locais para fixação do ponto de aplicação de carga. A configuração julgada a mais adequada, por gerar um menor deslocamento (figura 5.10), foi a configuração com base maior (B) de 90 cm, base menor (b) de 70 cm, altura (h) de 20 cm e ponto de aplicação de carga 10 cm acima do ponto central entre as aletas (figura 5.11).

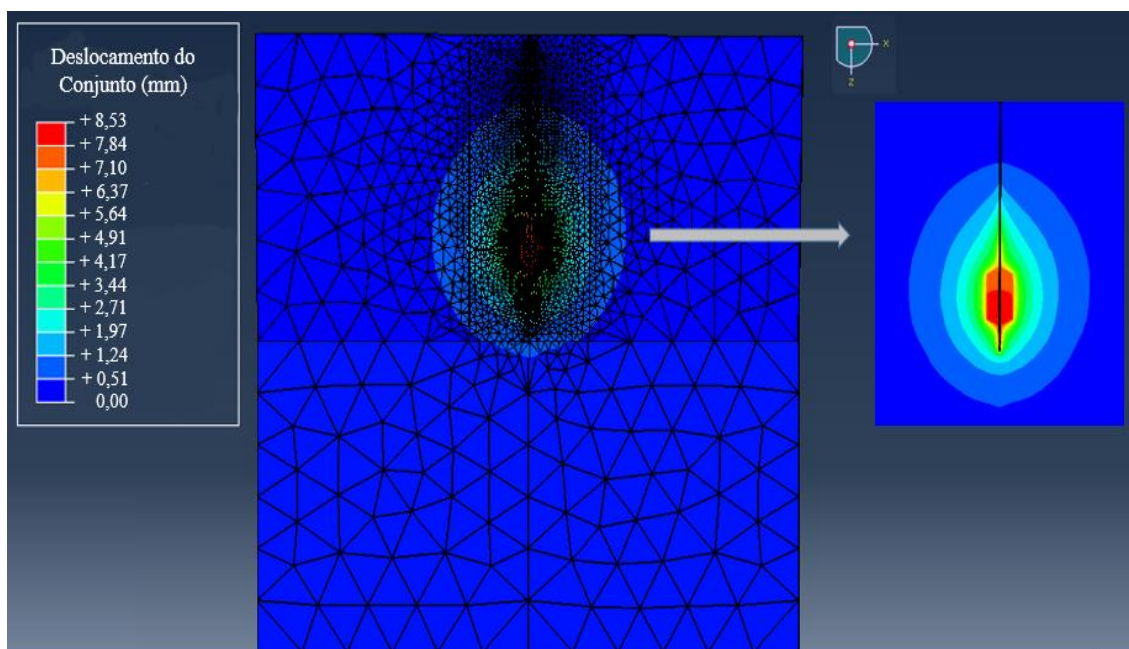


Figura 5.10: Deslocamentos paralelos ao eixo de aplicação da força.

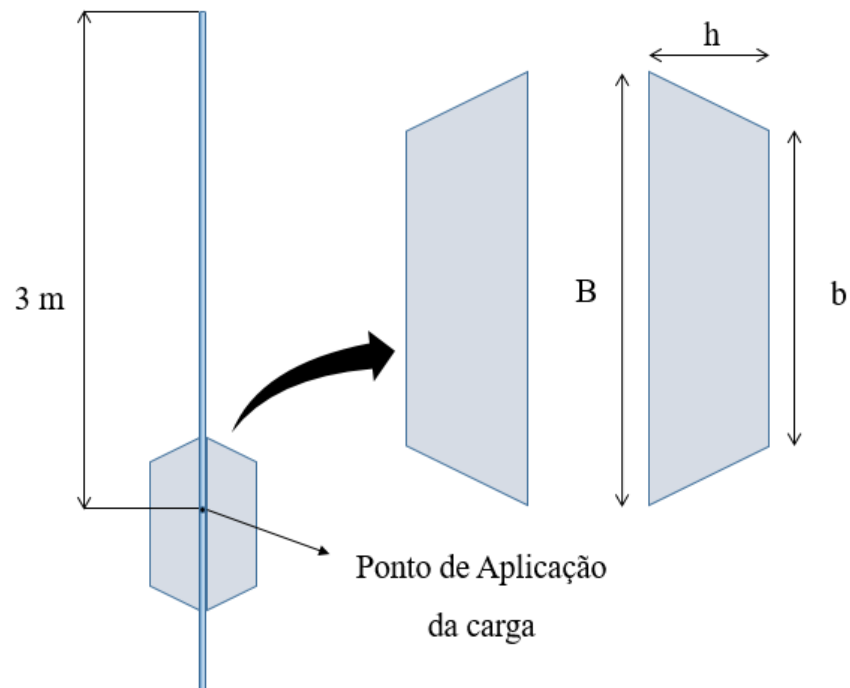


Figura 5.11: Esquema da guia de ancoragem modelada.

Vale ressaltar, que durante os procedimentos, o valor de B foi limitado em 90 cm, por conta das características físicas do tubo metálico utilizado, que apresenta peças de 1 m de comprimento, com roscas de ligação em suas extremidades. Dessa forma, optou-se por deixar uma folga de 5 cm em cada ponta, para não ocorrer a danificação das roscas durante o processo de ligação do tubo com as aletas, feita por meio de solda.

6 EQUIPAMENTOS

Neste item, serão apresentados os componentes do sistema de ensaio, que incluem a guia de ancoragem; o equipamento que irá embuti-la no solo; as correntes que serão ensaiadas; as células de carga, projetadas e calibradas especialmente para o modelo reduzido; e o sistema que será utilizada para aplicar carga.

6.1 GUIA DE ANCORAGEM

Como explanado no item 4.2, o embutimento no solo da corrente ensaiada será realizado com o auxílio de tubos metálicos, sendo um deles denominado de guia de ancoragem, dotado de modificações que visam possibilitar a realização do ensaio (figura 6.1). Essas modificações, consistem na fixação de duas aletas laterais, diretamente no tubo, ortogonais a direção do carregamento (figura 6.2-a), de modo a impedir grandes deslocamento e proporcionar reação às forças aplicadas durante os ensaios; um furo oblongo, paralelo à direção de carregamento, utilizado para passar o cabeamento da instrumentação das células de carga pelo interior das hastes (figura 6.2-b); e o acoplamento de “meio elo” de corrente (figura 6.2-c), utilizado para fazer a ligação entre a guia de ancoragem e a corrente.

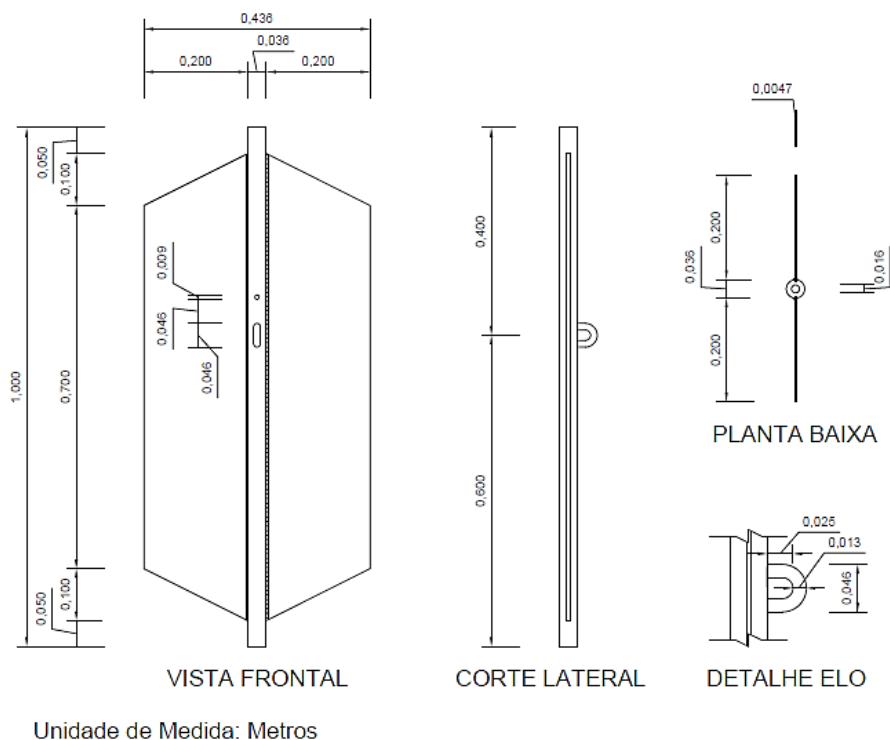


Figura 6.1: Projeto da guia de ancoragem.

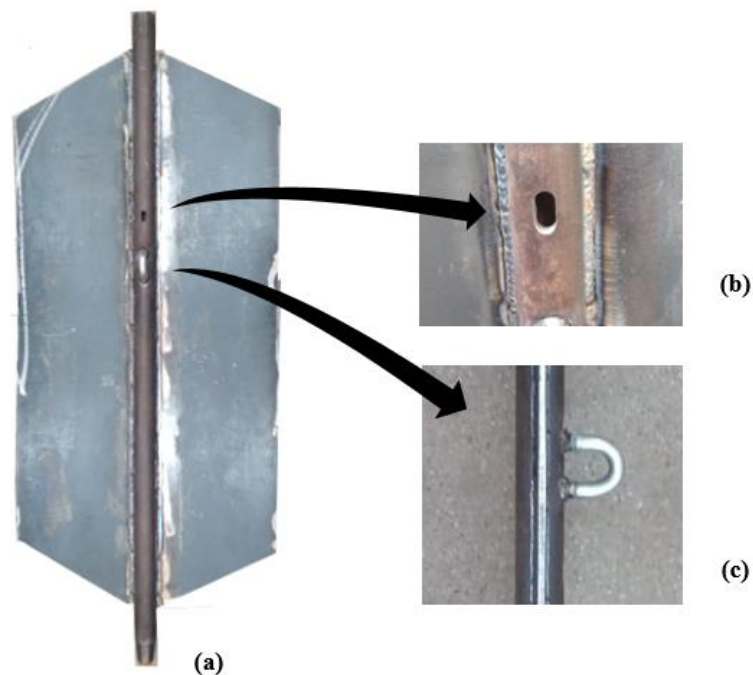


Figura 6.2: Guia de ancoragem: (a) tubo metálico com as aletas; (b) detalhe do furo oblongo; (c) detalhe do elo de ligação.

Ressalta-se, que os tubos metálicos utilizados no sistema de ensaio proposto, são os mesmos utilizados no equipamento de CPTu (*Cone Penetration Test*), uma ferramenta de ensaio internacionalmente reconhecida, utilizada para caracterizar perfis estratigráficos de solos, com o objetivo principal de se obter as suas propriedades mecânicas ao longo da profundidade. Ela é composta por quatro elementos principais: o penetrômetro com ponteira cônica; o sistema de transmissão dos dados; tubos metálicos; e o equipamento de cravação. Para os ensaios, decidiu-se utilizar apenas os dois últimos elementos citados, ou seja, o mesmo sistema de cravação do CPTu, irá inserir e retirar do solo a guia de ancoragem e o conjunto de tubos metálicos.

O equipamento de cravação é constituído por uma estrutura de reação, onde está presente um sistema aplicação de carga, geralmente hidráulico, acionado por bomba alimentada por um motor à combustão ou elétrico. Além disso, ele possui uma válvula reguladora de vazão, que permite o controle da velocidade de cravação durante o ensaio (SCHNAID, 2012).

Lunne *et al* (1997) ressaltam que a reação aos esforços de cravação é obtida pelo peso próprio do equipamento e/ou pela fixação ao solo de hélices de ancoragem. A figura 6.3 apresenta um exemplo de sistema de cravação.



Figura 6.3: Sistema de cravação (SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E., 2012).

6.2 LINHAS DE ANCORAGEM

Como discutido no item 4.2.2, para a corrente representar a amarra do caso típico, ela deve ter elos com diâmetro de 12 mm e peso linear de 2,88 kg/m, porém as correntes de aço 1050 galvanizadas a fogo, utilizadas nessa pesquisa, não são fabricadas com essas características específicas. Logo, decidiu-se utilizar dois diâmetros diferentes, para que seja possível fazer uma comparação entre os resultados, identificando-se a possível correlação entre a atenuação de carga e o diâmetro da amarra. Dessa forma, as correntes utilizadas foram as de 11 mm e 13 mm de diâmetro, com 2,5 kg/m e 3,12 kg/m, respectivamente (figura 6.4).

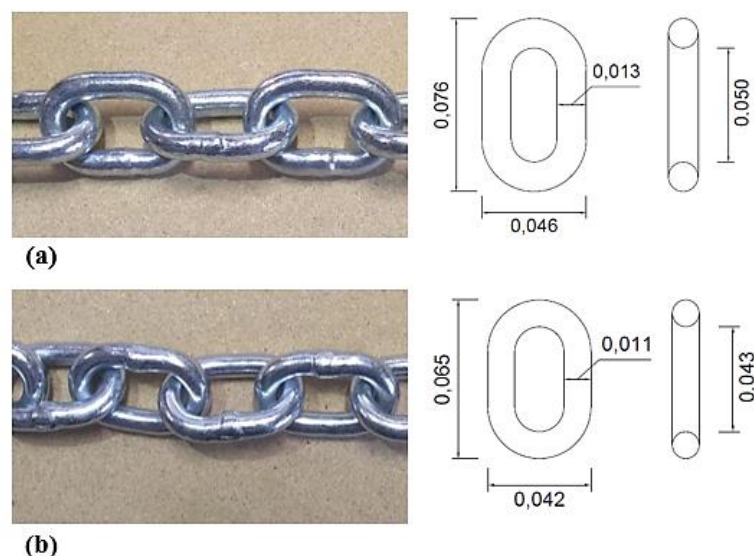


Figura 6.4: Geometria/diâmetro das correntes: (a) 13 mm; (b) 11 mm.

6.3 CÉLULAS DE CARGA

A medição das cargas de tração aplicadas ao sistema de ensaio, serão realizadas através de duas células de carga uniaxiais, projetadas por Rocha (2020). A primeira, denominada de célula de carga inferior (CCI), será ligada entre a corrente e a guia de ancoragem, quantificando a solicitação de carga gerada na profundidade de 3 m cravados no solo. A segunda, designada de célula de carga superior (CCS), será instalada no trecho de corrente localizado na superfície do terreno, e irá quantificar a carga aplicada à corrente. Além disso, as duas células de carga contarão com um dispositivo para medir o ângulo formado entre elas e o eixo vertical.

Para o dimensionamento das células de carga foi considerado um fator de segurança igual a 2, logo, utilizando a carga axial máxima aplicada ao sistema de ensaio igual a 7,1 kN (segundo o item 4.2.3), a carga máxima admissível para o projeto das células de carga é 14,2 kN. Dessa forma, ao se considerar uma célula de carga com a geometria básica demonstrada na figura 6.5, estimou-se que a tensão máxima solicitante que atuará na peça é de aproximadamente 183 MPa, valor aceitável para qualquer classe de aço inoxidável. Logo, as células de carga foram usinadas em aço inox.

O modelo da célula de carga apresenta uma parte central de 4,5 mm de espessura, dimensionada para que a tensão solicitante ocorra dentro de um determinado intervalo de magnitude, tornando a célula sensível às cargas propostas para os ensaios.

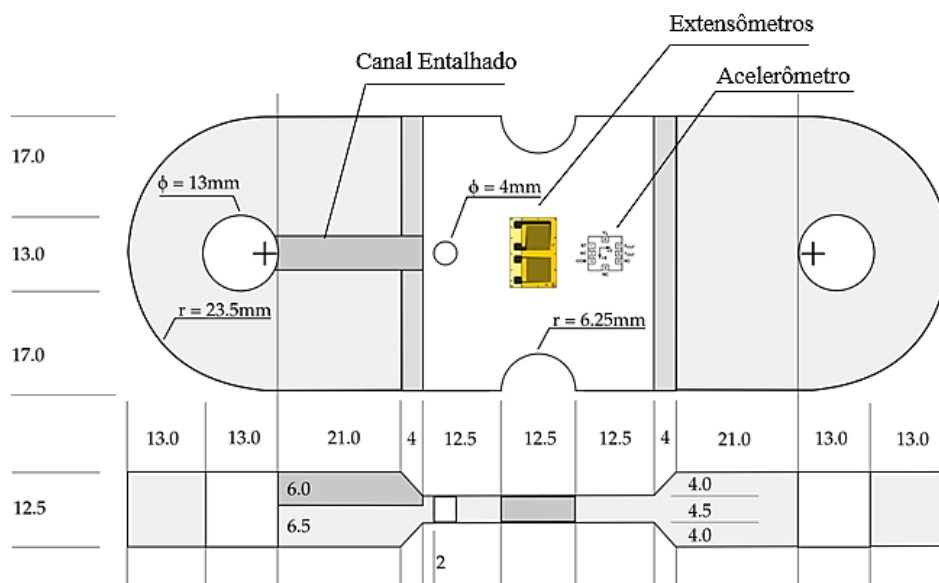


Figura 6.5: Detalhamento da célula de carga (ROCHA, M. M., 2020).

No lado esquerdo da célula, foi entalhado um canal com profundidade de 6 mm, utilizado para acomodar o cabo de 6 vias que alimenta a instrumentação, além de um furo de 4 mm ao lado do canal, utilizado para conectar os fios elétricos aos componentes da instrumentação, presentes nos dois lados da célula de carga.

Os entalhes circulares nas laterais da peça, foram calculados de acordo com o ábaco de concentração de cargas de tração em barras de aço (figura 6.6), e foram incorporados à peça para que a concentração máxima de tensões ocorra na região central da peça, onde foram colados os extensômetros.

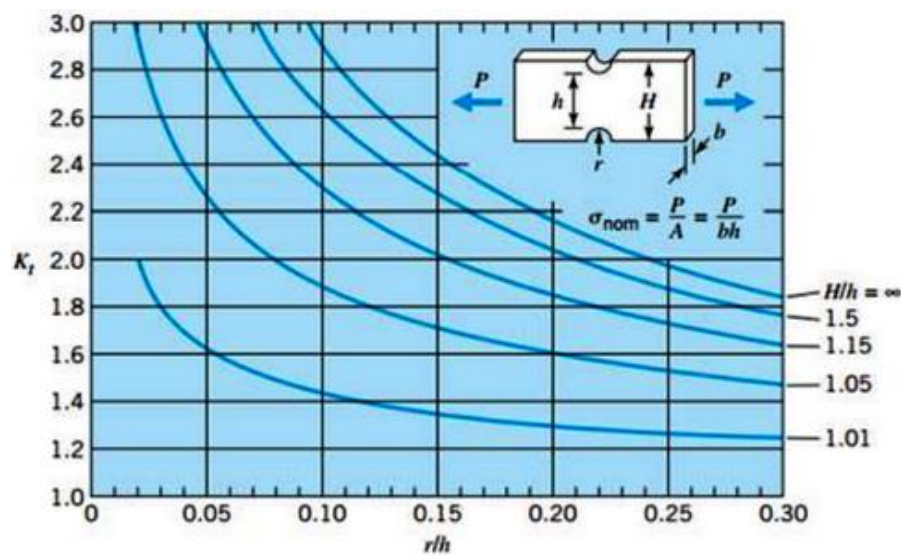


Figura 6.6: ábaco de concentração de cargas (ROCHA, M. M., 2020).

Após a instalação da instrumentação, foram adicionados itens de proteção na célula de carga (figura 6.7), visando protegê-la da umidade do solo, tendo em vista as características do campo experimental, que apresenta o nível do lençol freático próximo a superfície do terreno. Logo, para protegê-la fisicamente, uma chapa de alumínio foi adicionada sobre a instrumentação, e o espaço entre os componentes eletrônicos e a chapa, assim como o canal com o cabo de 6 vias, foi totalmente preenchido com resina epóxi.

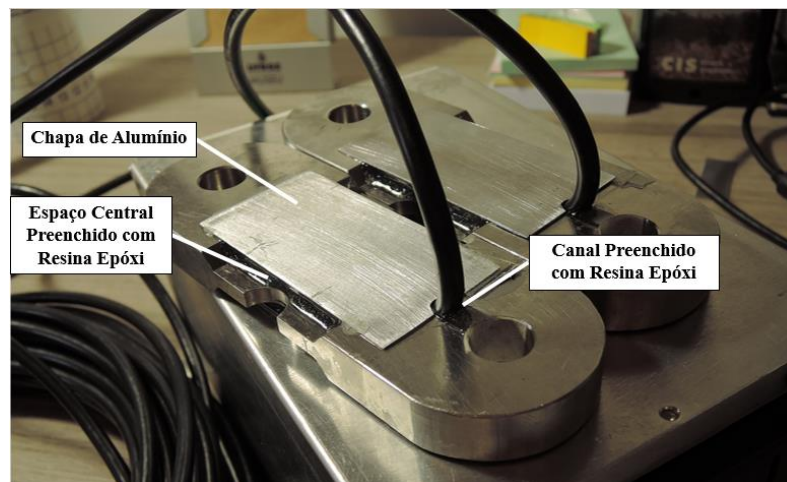


Figura 6.7: Proteções adicionais às células de carga (ROCHA, M. M., 2020).

Todas as ligações das células serão feitas através de manilhas de aço galvanizado (figura 6.8), que apresentam resistência superior à força máxima determinada para os ensaios e geometria adequada aos dois modelos de corrente descritos no item anterior.

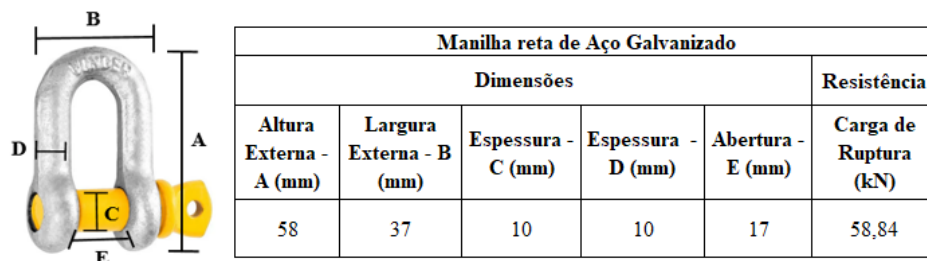


Figura 6.8: Especificações técnicas da manilha utilizada.

6.3.1 Instrumentação das Células de Carga

O projeto desenvolvido por Rocha (2020), utiliza extensômetros do tipo duplo ortogonal, colados em ambas as faces. Os extensômetros são apropriados para a utilização em aço inox, e apresentam como características, resistência elétrica (Ω) de 350 ohms, fator de carregamento (k) igual a 2,1 e módulo de *Poisson* (ν) igual a 0,3. Destaca-se, que por se tratar de um extensômetro específico para aço inox e apresentar configuração de ponte de Wheatstone completa, a variação da temperatura gera uma influência insignificante sobre as leituras. Cada célula de carga também foi instrumentada com um acelerômetro biaxial de alta precisão, modelo ADXL 203, fabricado pela *Analog Devices*, cujas características técnicas, fornecidas pelo fabricante, encontram-se na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Característica Técnicas do acelerômetro ADXL 203.

Características Técnicas	Unidade	Valor	Observação
Tensão de alimentação	V	5	-
Consumo	μA	700	-
Temperatura de Funcionamento	$^{\circ}\text{C}$	(-40 a +125)	-
Faixa de Atuação	m/s^2	$\pm 1,7 \cdot g$	($g = 9,81$)
Resolução	mg	1 (0,06 $^{\circ}$)	Para frequências menores que 60Hz

(Fonte: Adaptado de *ANALOG DEVICES*, 2004)

O acelerômetro é fabricado com a tecnologia denominada MEMS (*Micro-Electromechanical System*), e tem as dimensões de 5 mm x 5 mm e menos de 2 mm de espessura, o que permitiu sua fácil acomodação na célula de carga. Esse dispositivo, desempenha a função de inclinômetro, utilizado na obtenção do ângulo formado entre a célula de carga e um eixo de referência, através da leitura do valor médio da aceleração. A figura 6.9 apresenta a instrumentação das células de carga.

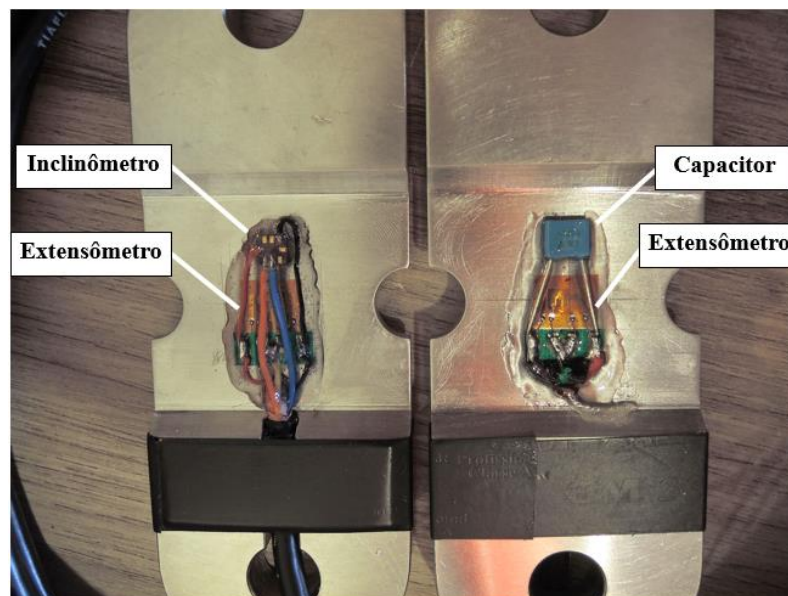


Figura 6.9: Duas faces instrumentadas de cada célula de carga (ROCHA, M. M.; 2020).

6.3.2 Calibração Das Células de Carga

Após a confecção das células de carga, foi realizada a calibração das mesmas, juntamente com as manilhas de ligação. A calibração foi feita com o auxílio de uma prensa da marca *Material Testing Systems*, modelo 810 (figura 6.10), disponibilizada pelo Grupo de Ensaios Mecânicos (GEM), que integra o Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) pertencente à UFRGS. Com o equipamento aplicou-se forças de tração à célula, com posterior descarregamento. Para se ter uma margem de segurança além da carga máxima determinada para a realização dos ensaios em campo (7,1 kN), optou-se por realizar a calibração até a carga máxima de 10 kN.

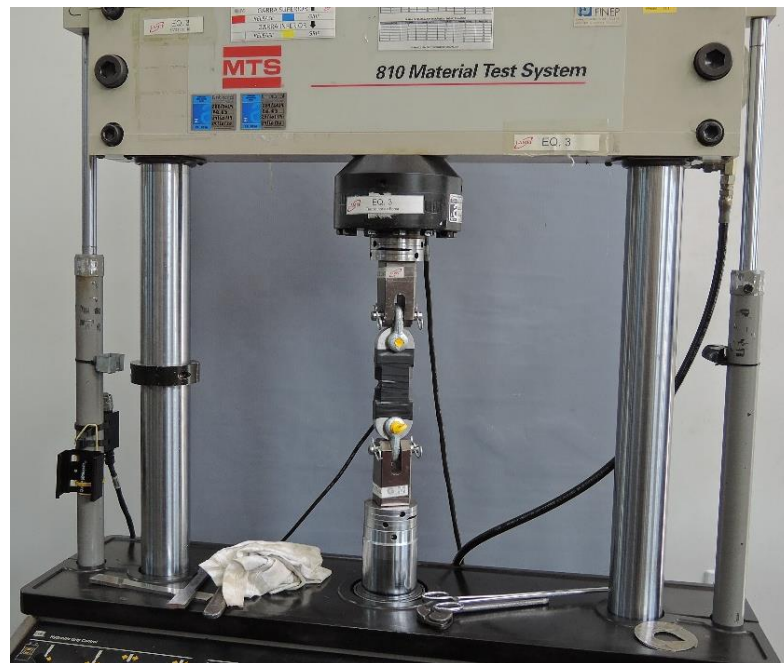


Figura 6.10: Prensa utilizada na calibração da célula de carga.

O procedimento foi dividido em dois ciclos de carga e descarga, cada um com duas etapas. A primeira etapa de cada ciclo, foi executada com incrementos de carga de 1kN até se atingir 10 kN, e para cada incremento fez-se a leitura dos sinais elétricos correspondentes, diretamente no sistema de aquisição de dados. Na segunda etapa, foi realizado o descarregamento da célula de carga a cada 1 kN, até a força aplicada se igualar a zero, tomando-se nota das respectivas leituras dos sinais elétricos gerados. Dessa forma, foi possível obter 42 pontos no gráfico de calibração de cada célula de carga (figuras 6.11 e 6.12), estimando-se uma constante de calibração de 0,00226 para CCI e 0,00223 para a CCS.

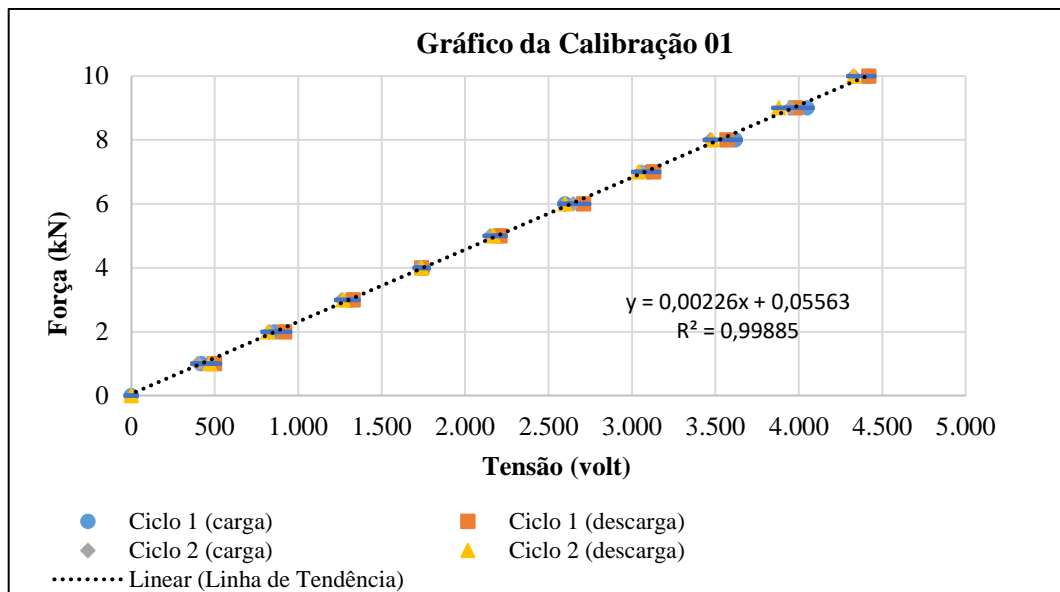


Figura 6.11: Gráfico de calibração da CCI.

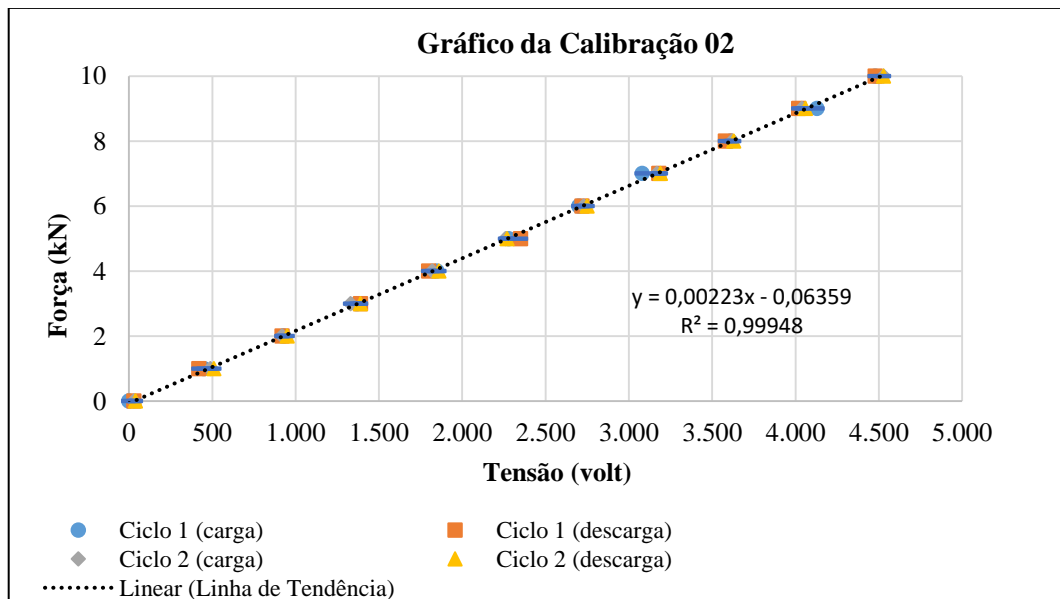


Figura 6.12: Gráfico de calibração da CCS.

Em relação à obtenção do ângulo formado entre a célula e o eixo de referência, serão utilizadas as informações técnicas e teóricas, presentes na ficha técnica do acelerômetro, fornecida pelo fabricante. Na ficha, está especificado que ao se orientar o acelerômetro de modo que os eixos X e Y fiquem paralelos à superfície da terra, ele se comportará como um sensor de inclinação, composto por um eixo de rotação e um eixo de inclinação, nos quais serão geradas alterações de ângulos, caso o acelerômetro sofra uma mudança de posição. Logo, com os sinais de saída do acelerômetro, gerados pela mudança de posição no espaço, convertidos em acelerações (A_x

e A_y) que variam entre +1g e -1g, é possível calcular os ângulos de inclinação (ρ) e rotação (Φ) das células de carga, em graus, aplicando-se as equações 6.1 e 6.2, demonstradas a seguir.

$$\rho = \arcseno \cdot \left(\frac{A_x}{1g} \right) \quad (6.1)$$

$$\Phi = \arcseno \cdot \left(\frac{A_y}{1g} \right) \quad (6.2)$$

6.4 SISTEMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

As células de carga foram conectadas a um sistema de condicionamento de sinais, baseado em uma placa Arduino Due R3 com microprocessador tipo ARM 32 bits, 84 MHz (figura 6.13). As funções do sistema são: alimentar os sensores; amplificar os sinais; converter os sinais analógico/digital; e gravar de forma contínua os dados adquiridos durante a realização do ensaio, diretamente no microcomputador ou em um cartão de memória do tipo micro-SD. Além disso, ele é dotado de um display digital, que permite visualizar instantaneamente as amplitudes dos sinais, facilitando o acompanhamento do ensaio em campo. Todo o circuito que integra o sistema é alimentado por duas pilhas alcalinas de 2,4 V.

Os sinais oriundos das células de carga são condicionados e amplificados através de circuitos INA 118, que gera um ganho de amplificação de 500 vezes, necessário para se fazer a distribuição da força máxima aplicada ao sistema em 3V. Já a conversão analógico/digital é feita por placas modelo ADS1115 de 16 bits, com taxa de aquisição efetiva da ordem de 100Hz.



Figura 6.13: Sistema de aquisição de dados.

6.5 SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA

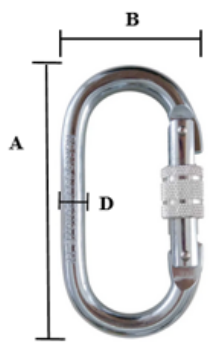
Para aplicar força à amarra ensaiada, será utilizada uma talha manual com capacidade de carga de 2 toneladas e três metros de corrente (figura 6.14), que deverá ser acoplada a um tripé de sondagem SPT (figura 6.15), utilizado para apoiar e manter a estabilidade da talha durante o procedimento de ensaio. A ligação entre o gancho da corrente fixada na talha e a corrente ensaiada foi feita através de dois mosquetões ovais de aço (figura 6.16).



Figura 6.14: Talha manual utilizada para aplicar carga.



Figura 6.15: Tripé de sondagem SPT.



Mosquetão Oval de Aço (EM 362: 2004)				
Dimensões				Resistência
Altura Externa - A (mm)	Largura Externa - B (mm)	Espessura - D (mm)	Abertura Pino (mm)	Carga de Ruptura (kN)
110	59	10	19	25

Figura 6.16: Especificações técnicas do mosquetão utilizado.

7 ROTEIRO DE ENSAIO

Neste capítulo, serão descritos os procedimentos necessários para a realização do ensaio em campo, mostrando-se de maneira detalhada as configurações espaciais que devem ser atendidas. Vale destacar, que só foi possível desenvolver o roteiro, por conta da caracterização prévia do campo experimental escolhido para a realização da futura campanha de ensaios.

7.1 ETAPA PRELIMINAR

Primeiramente, será feita a limpeza da superfície do terreno, para a retirada de detritos, em seguida deve-se realizar uma escavação com largura mínima de 50 cm e 1 m de profundidade, para que a guia de ancoragem seja inserida nessa cavidade, permitindo sua ligação aos demais tubos metálicos, instalados previamente no equipamento de cravação, pois a largura das aletas impossibilita a ligação da guia diretamente ao sistema de cravação. Logo, a guia de ancoragem será cravada a 4 m de profundidade em relação a cota do terreno, mantendo-se o embutimento do ponto de aplicação de carga em 3 m, respeitando-se as dimensões calculadas para o ensaio.

Com as intervenções descritas acima, faz-se necessário abrir uma trincheira horizontal no solo, paralelo ao sentido de aplicação da carga, até o deslocamento horizontal máximo alcançado pela corrente durante o ensaio, para que possa ser respeitada a altura da camada de solo acima do “meio” elo de corrente, tendo em vista que essa é a altura da camada que resistirá ao movimento de corte da corrente. A figura 7.1 demonstra a escavação que deverá ser realizada em campo.

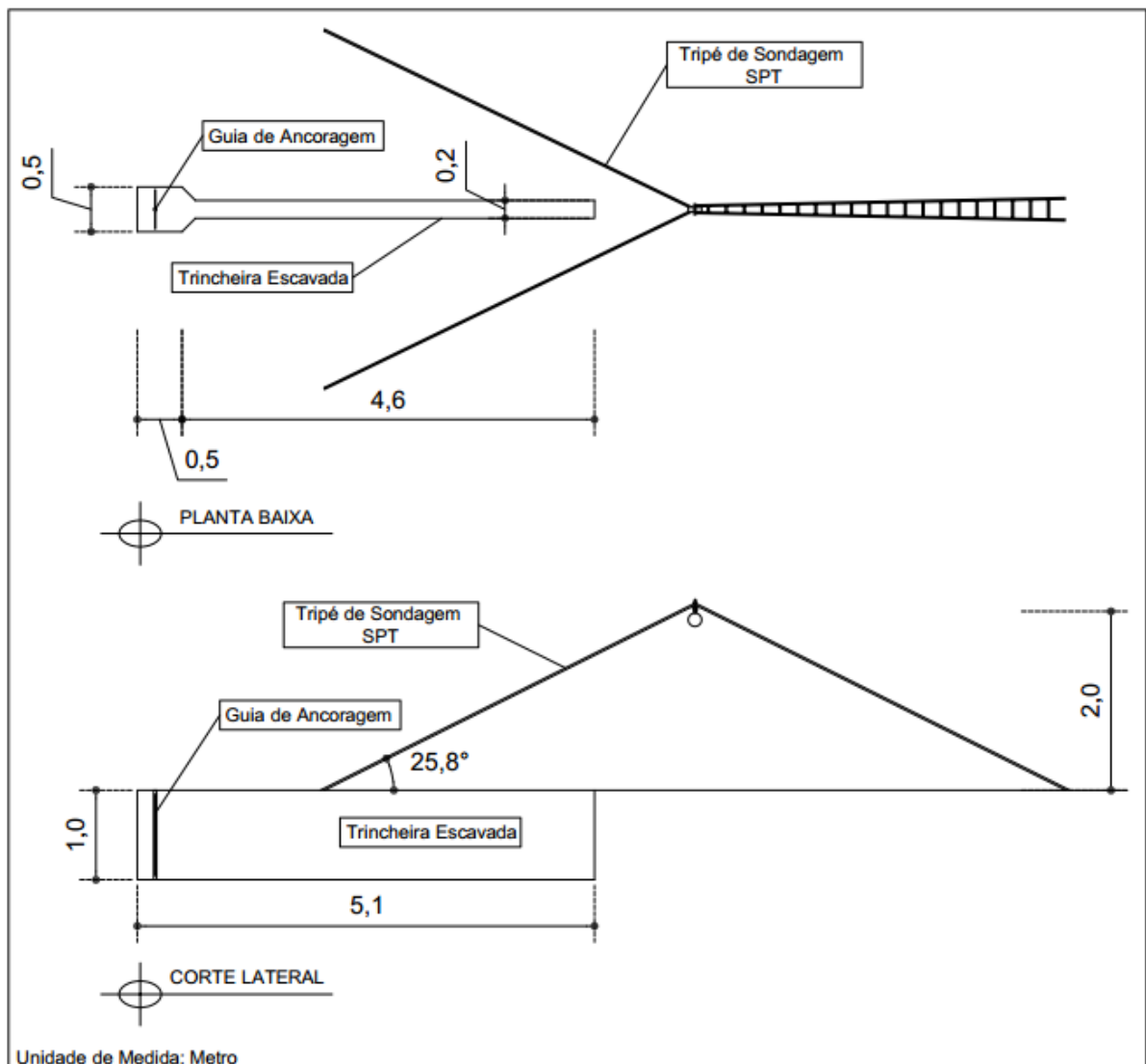


Figura 7.1: Escavação necessária para a realização do ensaio.

7.2 MONTAGEM DO SISTEMA DE ENSAIO

Antes da guia de ancoragem ser posicionada na cavidade escavada no solo, deve-se ligar à ela a CCI, cujo o cabeamento utilizado para alimentar e transmitir os dados gerados por ela, será inserido nos tubos metálicos e na guia de ancoragem, através do furo central presente neles. Na outra extremidade da CCI deverá ser ligada a corrente que simula a amarra do caso típico. Depois da CCI instalada e verificada, a guia será posicionada na escavação, e então será acoplada aos tubos metálicos posicionados no sistema de cravação, através das roscas de ligação presentes nas duas peças.

Já a CCS deverá ser acoplada à porção da corrente que ficará fora do solo, ligada às extremidades de um segmento de corrente, localizado exatamente a 5,6 m após a CCI,

assumindo o lugar desse segmento durante o ensaio. Em seguida, os cabos das duas células deverão ser ligados ao sistema de aquisição de dados. Todas as ligações das células de carga serão feitas através das manilhas demonstradas na figura 6.8.

Para aplicar carga à corrente, será utilizada uma talha manual acoplada a um tripé de sondagem SPT. Para tanto, foi feita uma análise para determinar a configuração ideal em que a talha e o tripé de sondagem deverão ser instalados, para que se garanta a estabilidade do sistema e a reação necessária à força aplicada através da talha, que deverá permanecer estática durante todo o ensaio.

Através da análise, concluiu-se que as barras de sustentação do tripé deverão ser afastadas de modo que as duas mais próximas ao equipamento de cravação, formem um ângulo de aproximadamente $25,8^\circ$ em relação ao eixo horizontal, mantendo-se a talha a 2m de altura, em relação à cota do terreno. Destaca-se ainda, que foi considerada a utilização de pranchões para calçar a base de cada barra, visando evitar o afundamento das mesmas, durante a aplicação de carga.

Após o processo de montagem, a guia de ancoragem será cravada no solo argiloso até o “meio elo” de corrente atingir a profundidade de 4 m, em relação à cota do terreno, garantindo-se os 3 m de embutimento da corrente. Durante toda a cravação a corrente deverá ser mantida na posição vertical, formando o ângulo de 0° em relação a esse eixo. A ligação entre a corrente e o gancho da talha manual será feita através de dois mosquetões, especificados na figura 6.16. A figura 7.2 demonstra o esquema de ensaio, e seus detalhes, antes de sua execução.

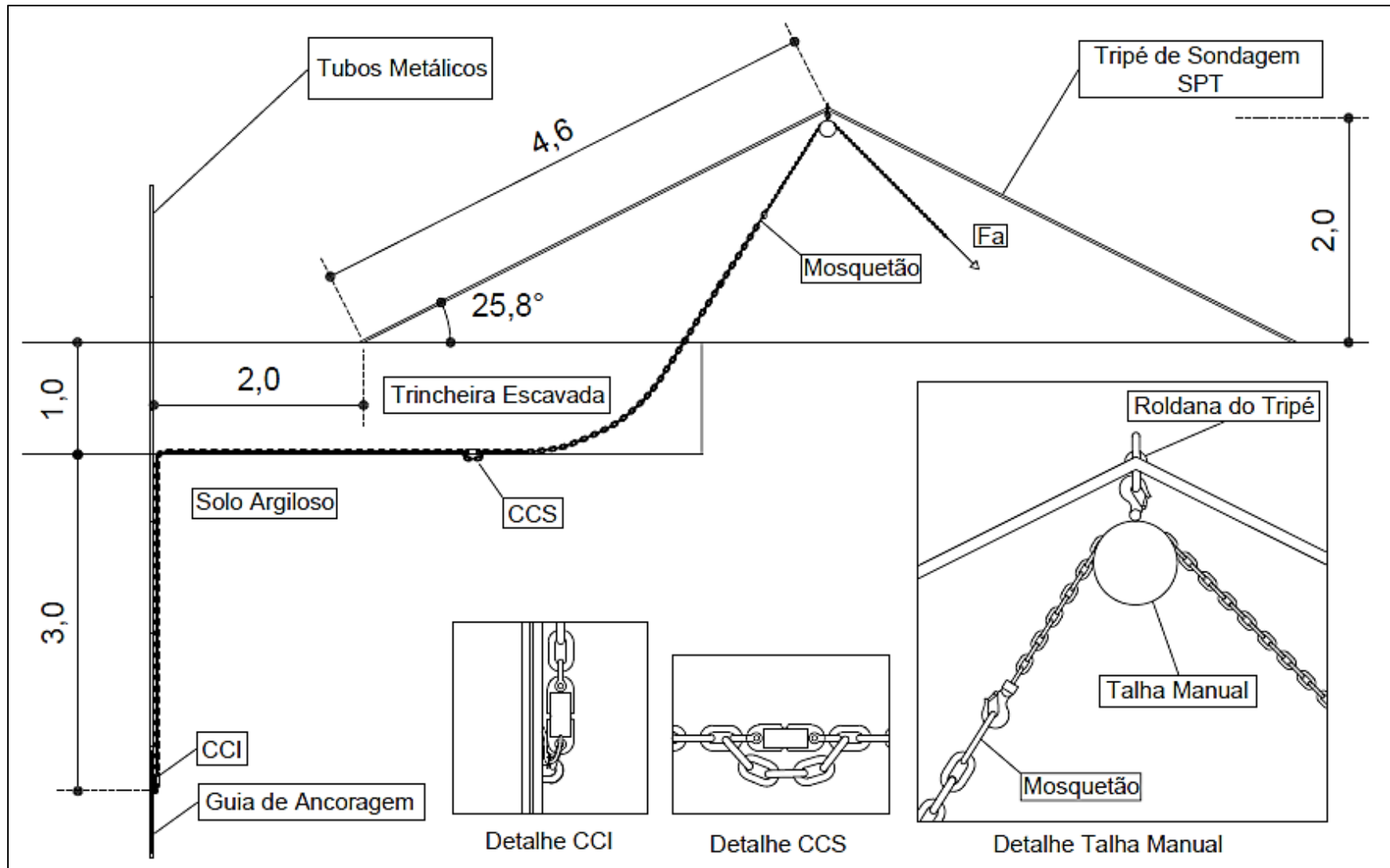


Figura 7.2: Disposição espacial dos equipamentos antes do ensaio.

7.3 EXECUÇÃO DO ENSAIO

O ensaio deverá ser executado em duas etapas, na primeira, a talha deverá ser operada manualmente de modo progressivo, aplicando-se carga de tração à corrente, ocorrendo assim, a alteração da angulação da corrente embutida no solo em relação ao eixo vertical, até atingir o ângulo de 45° , máximo permitido no ensaio (figura 7.4). Na segunda etapa, a carga deve ser aliviada de forma progressiva, até se atingir 0 kN.

Durante o procedimento da aplicação de carga, os sinais gerados nos extensômetros e inclinômetros, mostrados simultaneamente no display do sistema de aquisição, serão gravados no computador ou cartão de memória.

Ao término do ensaio, a corrente será sacada do solo, de maneira cuidadosa, com o auxílio de um tirfor de alavanca manual com capacidade de 2 toneladas (figura 7.3). Destaca-se, que para ensaiar cada modelo de corrente o roteiro de ensaio deverá ser reiniciado em um novo perímetro, respeitando-se uma distância mínima, para que não ocorra interferência do solo amolgado anteriormente.



Figura 7.3: Tirfor Com alavanca manual (2 toneladas).

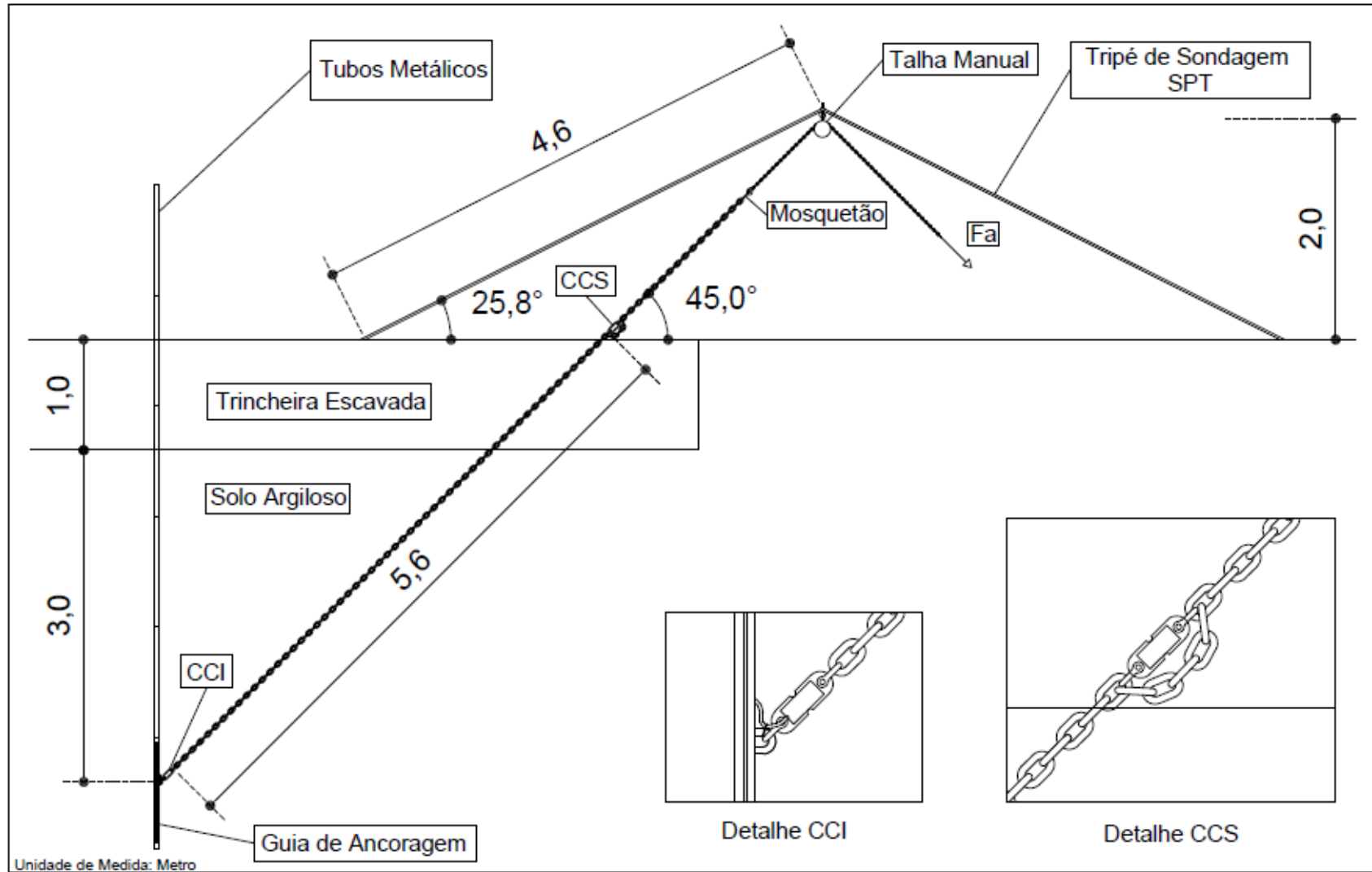


Figura 7.4: Disposição espacial dos equipamentos ao término da primeira etapa do ensaio.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas conclusões e observações, baseadas nos objetivos que delimitam esse trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros, pertinentes ao tema abordado na dissertação.

8.1 CONCLUSÕES

Através da análise de escala desenvolvida para o caso típico, foi possível determinar um método de ensaio utilizado como base para se projetar e confeccionar peças exclusivas que compõem o sistema, como a guia de ancoragem e as células de carga. Ressalta-se, que o método de ensaio foi concebido visando-se utilizar a maior quantidade possível de equipamentos disponíveis no mercado de engenharia, como a talha manual e o tripé de sondagem SPT, dispensando-se um treinamento especial para a sua operação.

Com o estudo de escala e a caracterização do campo experimental, realizados nesse trabalho, procedeu-se uma análise numérica, determinando-se as dimensões e a configuração adequadas para a guia de ancoragem, de modo que ela proporcione reação a carga aplicada à corrente, apresentando um deslocamento desprezível. Os resultados obtidos, demonstraram que o ponto de ligação entre a corrente e o tubo metálico terá um deslocamento máximo de 8,53 mm, considerado aceitável para o bom funcionamento do ensaio, tendo em vista que ele apresenta um deslocamento menor que um centímetro. Dessa forma, foi possível confeccionar uma guia de ancoragem, cujo o deslocamento não irá interferir nas medições realizadas durante os ensaios.

Posteriormente, realizou-se a validação do funcionamento adequado da instrumentação utilizada no equipamento, que consiste em duas células de carga, equipadas com inclinômetros, e um sistema de aquisição de dados. Através da calibração do sistema, observou-se que as células de carga apresentam um funcionamento dentro do intervalo de carga que será utilizado no ensaio de campo e além disso, demonstraram um excelente padrão em sua fabricação, observado nos seus valores das constantes de calibração que são praticamente iguais, CCI - 0,00226 e CCS - 0,00223. O sistema de aquisição, testado junto com as células de carga, também funcionou da maneira esperada, sendo possível, através dele, extrair e gravar os dados

provenientes da instrumentação das células de carga. Logo, a instrumentação mostrou-se compatível e adequada ao sistema de ensaio projetado nesse trabalho.

Após a definição e validação de todos os componentes do sistema de ensaio, foi possível elaborar um roteiro detalhado da execução do ensaio em campo, que inclui as etapas de preparação do terreno e a montagem dos equipamentos, abordando o posicionamento ideal de cada peça. Ao se executar todo o procedimento de ensaio, será possível obter a atenuação de carga que ocorre no trecho de corrente embutida no solo, a partir da diferença das forças medidas na CCS e CCI, assim como a correlação dessa atenuação com o diâmetro da amarra, tendo em vista que serão utilizados dois diâmetros de correntes diferentes. Além disso, o tratamento das leituras geradas pelos inclinômetros, permitirão a reconstituição progressiva da geometria espacial da catenária, formada no interior do solo argiloso, durante a aplicação de carga.

Tendo em vista que essa dissertação consiste na etapa inicial do projeto: atenuação de cargas pela interação solo-estrutura em linhas de ancoragem, julgou-se que foi alcançado o objetivo proposto inicialmente, que consiste na elaboração de um sistema de ensaio que permita medir a atenuação de cargas aplicadas em linhas de ancoragem, que ocorre no trecho embutido no solo.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Executar ensaios no campo experimental proposto, definindo-se os parâmetros que regem o comportamento da atenuação de carga, devido a interação solo-amarra, determinando-se o grau de influência dos diferentes diâmetros da corrente.
- b) Realizar ensaios variando-se a profundidade de cravação, visando analisar a influência do comprimento de amarra embutido.
- c) Desenvolver um aparato que possibilite o total controle dos Ângulos formados entre a corrente e o eixo vertical durante a aplicação de carga, procedendo-se ciclos de carga e descarga em Ângulos pré-estabelecidos.
- d) Modificar o sistema de ensaio proposto, de modo a possibilitar a aplicação de cargas dinâmicas à corrente ensaiada, visando determinar a atenuação de cargas dinâmicas.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C. S. **Análise da Interação Solo-Estrutura De Âncoras do Tipo Torpedo para Plataformas Offshore**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.
- AMARAL, C. S.; COSTA, A. M. **Verificação dos Fatores de Segurança das Estacas Torpedo para o Navio Avaré no Campo de Coral**. 2004. Relatório Parcial do Projeto - 601129. CENPES/PDP/MC, Rio de Janeiro.
- Analog Devices. **Especificações Técnicas do Acelerômetro Biaxial ADXL 203**. 2004. Disponível em: < <https://www.analog.com/en/products/adx1203.html#product-overview>>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- ANP. **Plano de Desenvolvimento**. 2017. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/images/EXPLORACAO_E_PRODUCAO_DE_OLEO_E_GAS/Gestao_Contratos/Fase_Producao/Planos_Desenvolvimento/sumario_sapinhoa.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2019.
- ANP. **Plano de Desenvolvimento**. 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/images/EXPLORACAO_E_PRODUCAO_DE_OLEO_E_GAS/Gestao_Contratos/Fase_Producao/Planos_Desenvolvimento/sumario_lula.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2019.
- ASSIS, J. S. de. **Sistemas de Ancoragem de Plataformas: Manuseio de Âncoras em Águas Profundas**. 2013. Apresentação de monografia – Curso Aperfeiçoamento para Oficiais de Náutica da Marinha Mercante (APNT), CIAGA, Rio de Janeiro.
- BEZERRA, C. M. N. **Análise Numérica de Cravação de Estacas Torpedo Modeladas por Integral de Pressões**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.
- CARNEIRO, F. L. **Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos**. Editora UFRJ. Rio de Janeiro, 1993.
- COSTA, R. G. B. **Análise Paramétrica das Condições de Ancoragem de Plataformas Offshore Utilizando Estacas Torpedo a Partir de Modelos em Elementos Finitos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.
- DEAN, E. T. R. **Offshore geotechnical engineering Principles and practice**. Thomas Telford Limited, 554p. London, 2010.
- DEGENKAMP, G.; DUTTA, A. **Soil resistances to embedded anchors chain in soft clay**. *Journal of Geotechnical Engineering*, v.115, n. 10, p. 1420 - 1438. New York, 1989.

GAULT, J. A.; COX, W. R. **Method for Predicting Geometry and Load Distribution in an Anchor Chain from a Single Point Mooring Buoy to Buried Anchorage**. Sixth Annual Offshore Technology Conference, Paper 2062, Houston, 1974.

HIGASHI, F. A. dos R. **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

HOCH, B. Z. **Interação Dinâmica Solo-Estrutura: Atenuação na Catenária Inversa de Estacas Torpedo para Plataformas Offshore**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LARCERDA, T. A. G. de., **Análise de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Flutuantes**. 2005. Projeto Final de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de mecânica aplicada e estrutura, UFRJ - Escola Politécnica, Rio de Janeiro.

LIMA, A. L. **Avaliação de Metodologias de Análise de Unidades Estacionárias de Produção de Petróleo Offshore**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.

LIMA, D. A. **Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Offshore Considerando Aspectos do Projeto de Risers**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.

MEDEIROS JR. C. J. **Low Cost Anchor System for Flexible Risers in Deep Waters**. Offshore Technology Conference, paper 14151. Houston, 2002.

MEDEIROS JR. C. J. **Torpedo Anchor for Deep Water**. Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, 2001.

MELO, C. M. de A. R. **Avaliação de desempenho e desenvolvimento de metodologias para estudos de ancoragem de estruturas flutuantes com estacas de sucção**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Ciência e Tecnologia, UENF, Campos dos Goytacazes.

ODEBRECHT, E; SCHNAID, F. **Assessment of The Stress History of Quaternary Clay From Piezocone Tests**. Soils and Rocks, v. 41, n. 2, p. 179 - 189, São Paulo, 2018.

PEREIRA, F. S. **Nova Metodologia para Interpretação de Ensaios de Dissipação do Piezocone**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre

PINTO, G. M. **Estudo Paramétrico da Atenuação de Cargas Estáticas em Sistemas de Ancoragem Offshore**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

ROCHA, C. C. M. **Atenuação de cargas estáticas em linhas de ancoragem**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

ROCHA, M. M. **Experimental analysis of load attenuation in mooring lines with reduced scale models**. 2020. Disponível em: < <https://github.com/mmaiarocha/Attenuation> >. Acesso em: 14 de Março. 2019.

ROCHA, M. M., SCHNAID, F., CONSOLI, N. **Considerações sobre leis de semelhança em modelos reduzidos para estudos geotécnicos**. 2013. Relatório Interno, UFRGS, Porto Alegre.

ROCHA, M. M., SCHNAID, F., ROCHA, C. C. M., AMARAL, C. S. **Inverse catenary load attenuation along embedded ground chain of mooring lines**. 2016. Ocean Engineering, v. 122, p. 215-226.

RANDOLPH, M.; CASSIDY, M.; GOURVENEC, S.; ERBRICH, C. **Challenges of Offshore Geotechnical Engineering**. Invited State of the Art Report, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), p. 123-176, Osaka, 2005.

REESE, L. C. A. **Dwsign method for na anchor pile in a mooring system**. Offshore Technology Conference. Paper 1745, 1973, Houston, 1973.

SAMPA, N. C. **Atenuação de Cargas Dinâmicas em Linhas de Ancoragem de Plataformas Offshore**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. Oficina de Textos 2a ed. São Paulo, 2012.

SILVA, A. L. R. B. **Inspeções Offshore: Análise de Histórico de Deficiências em Plataformas FPSO Operando no Pré-Sal Brasileiro**. 2017. Projeto Final de Graduação (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, UFRJ - Escola Politécnica, Rio de Janeiro.

SYSTEMES, D. **Abaqus Simulia - Documentation**, 2016.

PETROBRAS. **Petrobras batiza P-54 para o Campo de Roncador**. 2007. Disponível em: <https://www.agenciapetrobras.com.br/Materia/ExibirMateria?p_materia=3486>. Acesso em: 15 abr. 2019.

TRUE, D. G. **Undrained Vertical Penetration into Ocean Bottom Soils**. 1976. PhD Thesis, University of California, Berkeley.

Villela, M.J.R. **Análise do Comportamento da Temperatura em Sistemas de Produção de Petróleo: Comparação entre Completação Seca e Molhada**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, PUC - RJ, Rio de Janeiro.

VIVATRAT, V.; VALENT, P. J.; PONTEIRO, A. A. **The Influence of Chain Friction on Anchor Pile Design**. 14th Annual Offshore Technology Conference, Paper 4148. Houston, 1982.

KAWASAKI, P. Y. **Análise de Linhas de Ancoragem de Plataformas Oceânicas Considerando Diversos Tramos e o Trecho Enterrado da Linha**. 2010. Projeto final de graduação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de engenharia civil, UFRJ - Escola politécnica, Rio de Janeiro.

KLAHOLD, P. A. **Interpretação de Ensaios de Campo em solos com Permeabilidade Intermediária**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KOCHEM, R. M. **Estudo de Diferentes Concepções de Sistemas de Ancoragem em Lâmina D'Água Profunda**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.

KUNITAKI, D. M. K. N. **Tratamento de Incertezas no Comportamento Dinâmico de Estacas Torpedo para Ancoragem de Sistemas Flutuantes na Exploração de Petróleo Offshore**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro.

WANG, L. YUAN, F. **Three-Dimensional Interaction Between Anchor Chain and Seabed**. Ocean Research, v. 32, p. 404-413. Western Cape, 2010.

ANEXO A – Resultado da campanha de ensaios in situ para caracterização do campo experimental de Tubarão - SC

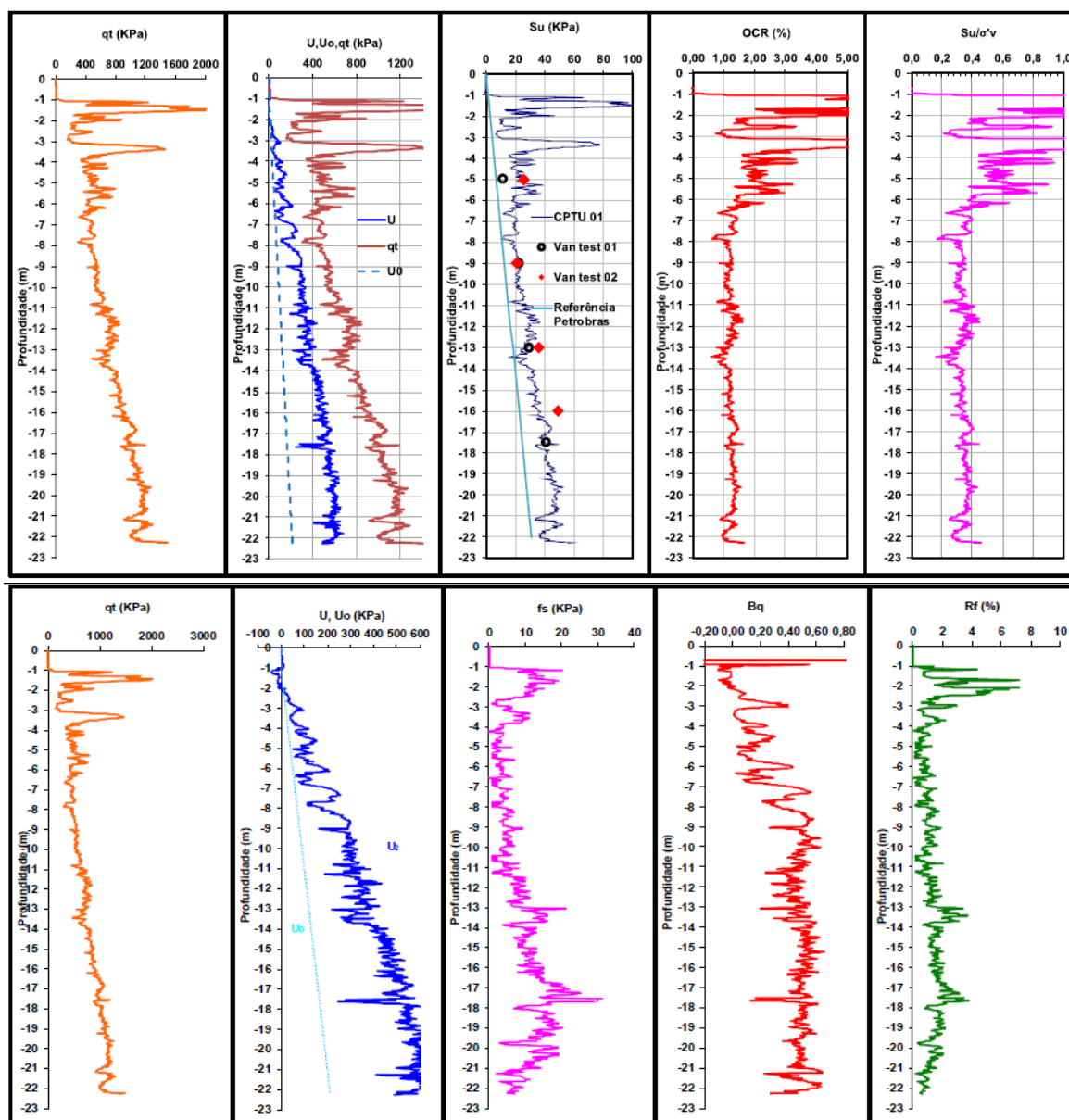


Figura A.1: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 01 (furo 01), nível de água = -0,5 m.

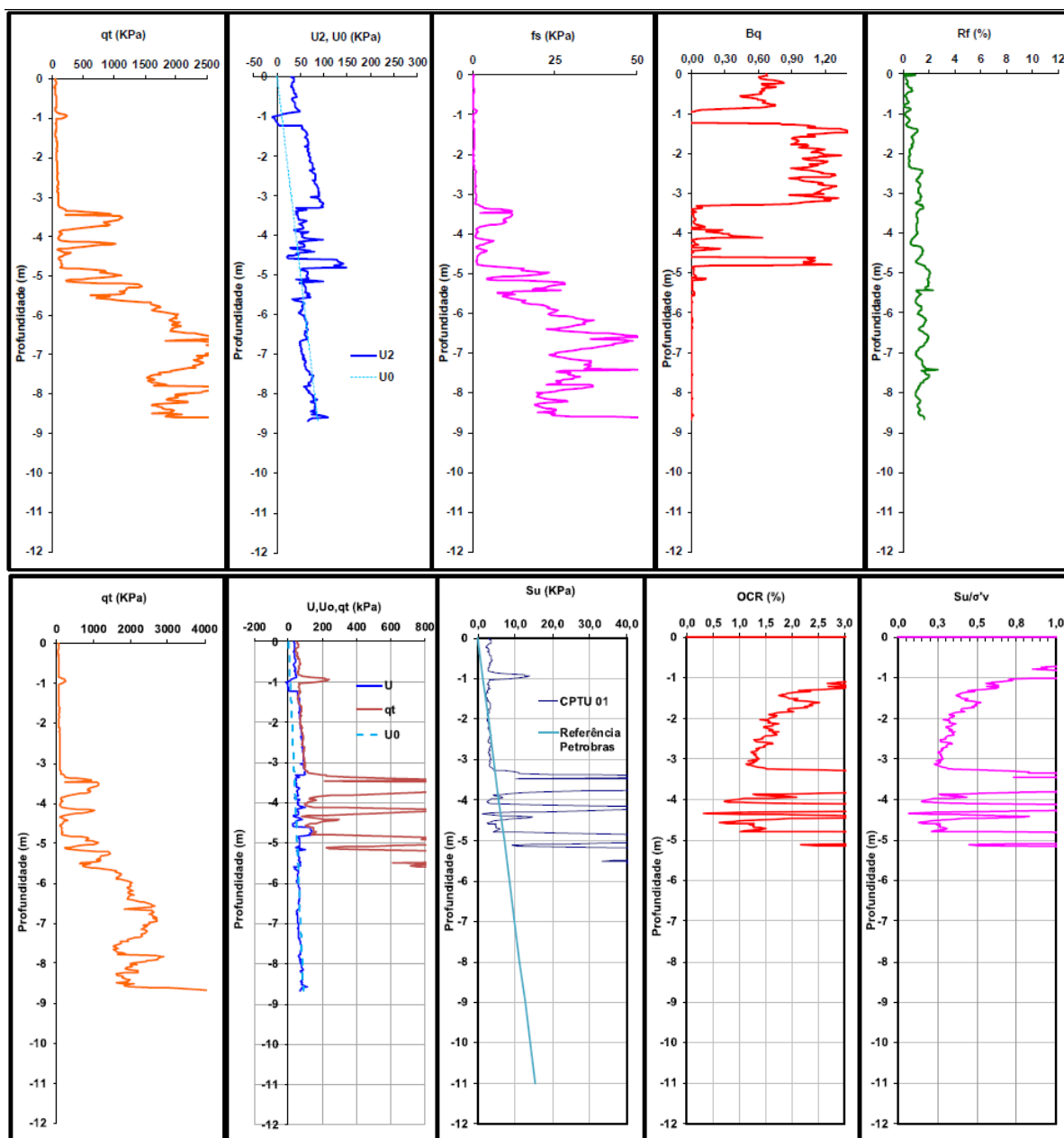


Figura A.2: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 02 (furo 01), nível de água = -1,0 m.

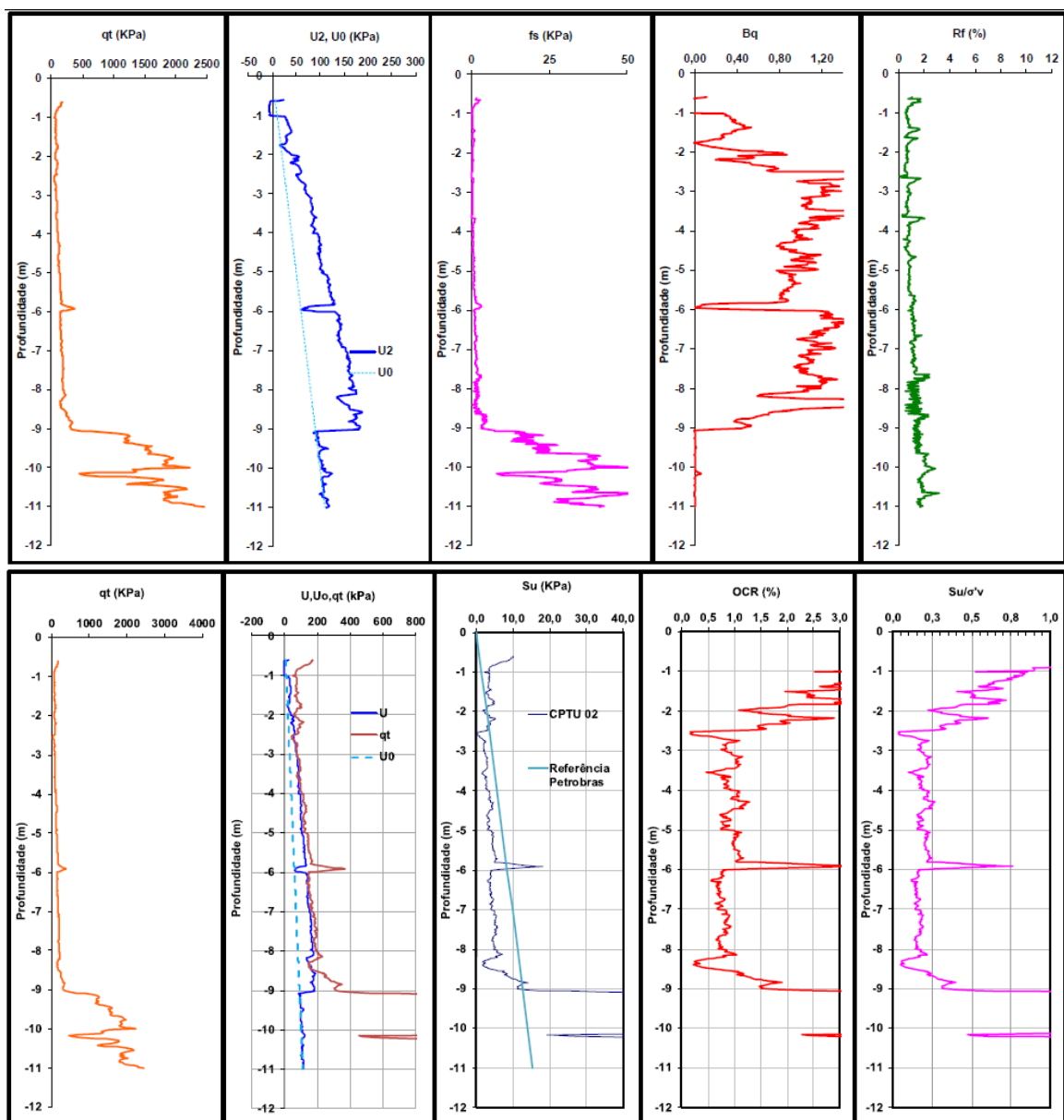


Figura A.3: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 02 (furo 02), nível de água (n.a.) = -1,0 m.

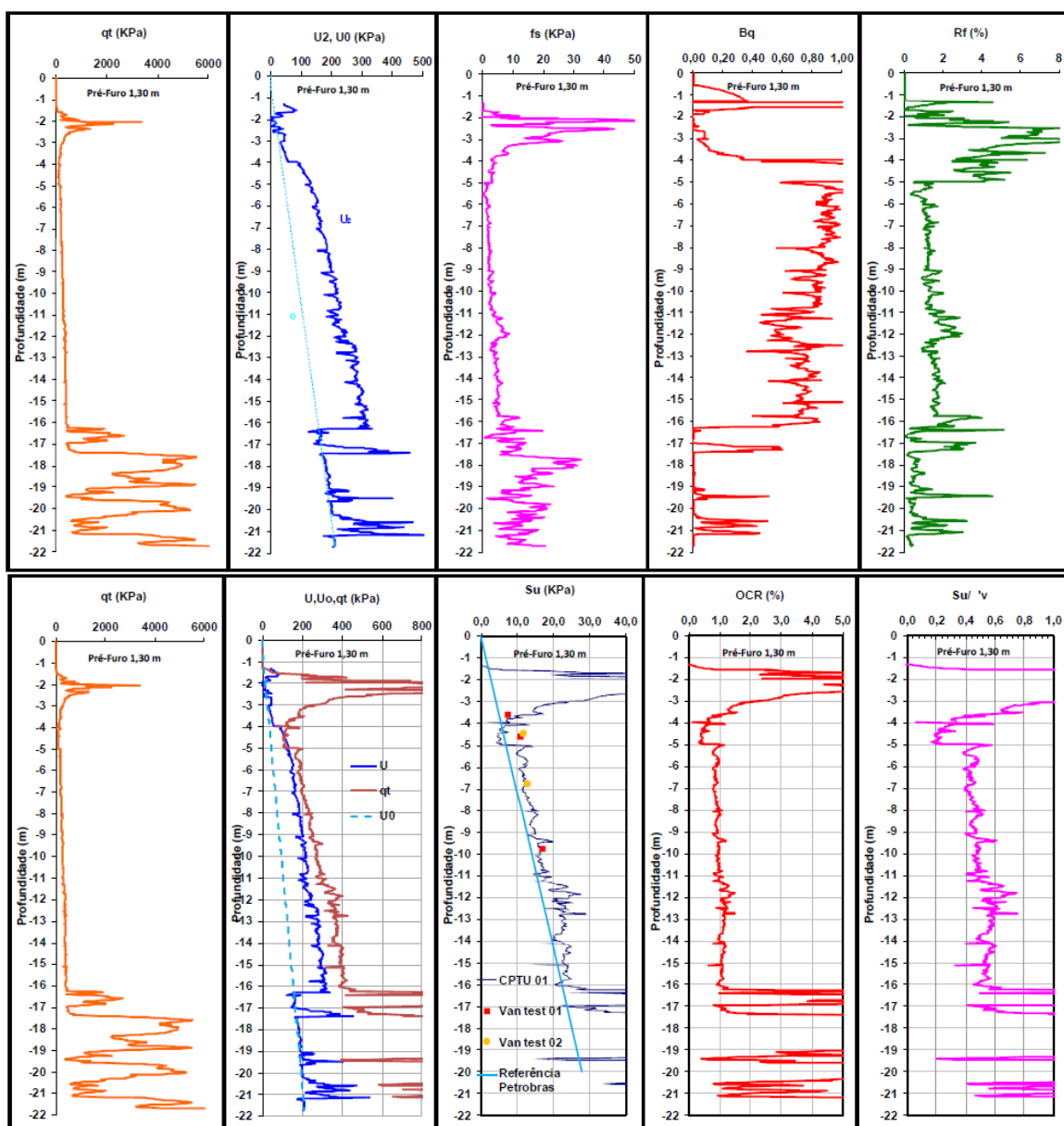


Figura A.4: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 03 (furo 01), nível de água (n.a.) = -0,55 m.

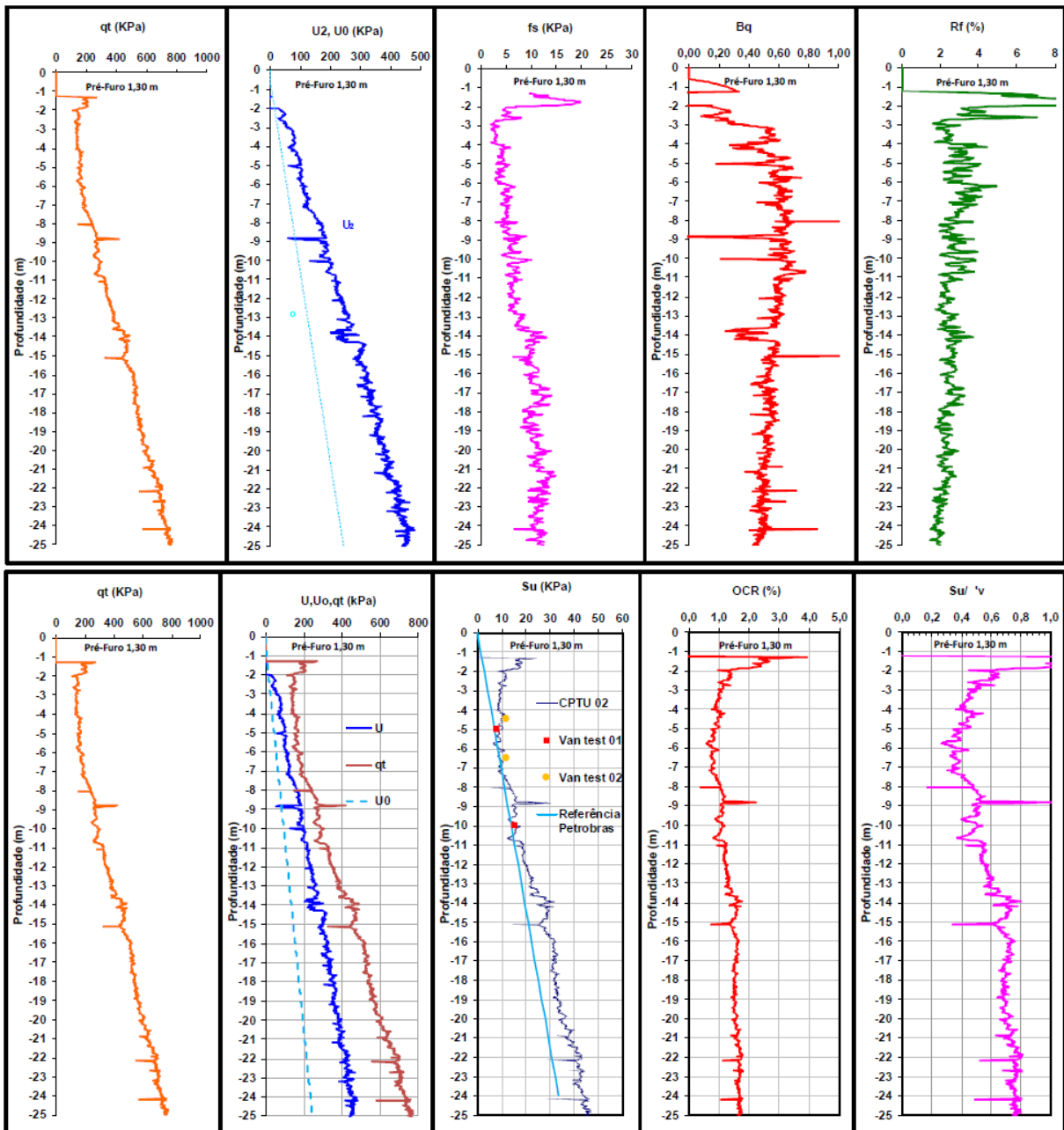


Figura A.5: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 03 (furo 02), nível de água (n.a.) = -0,60 m.

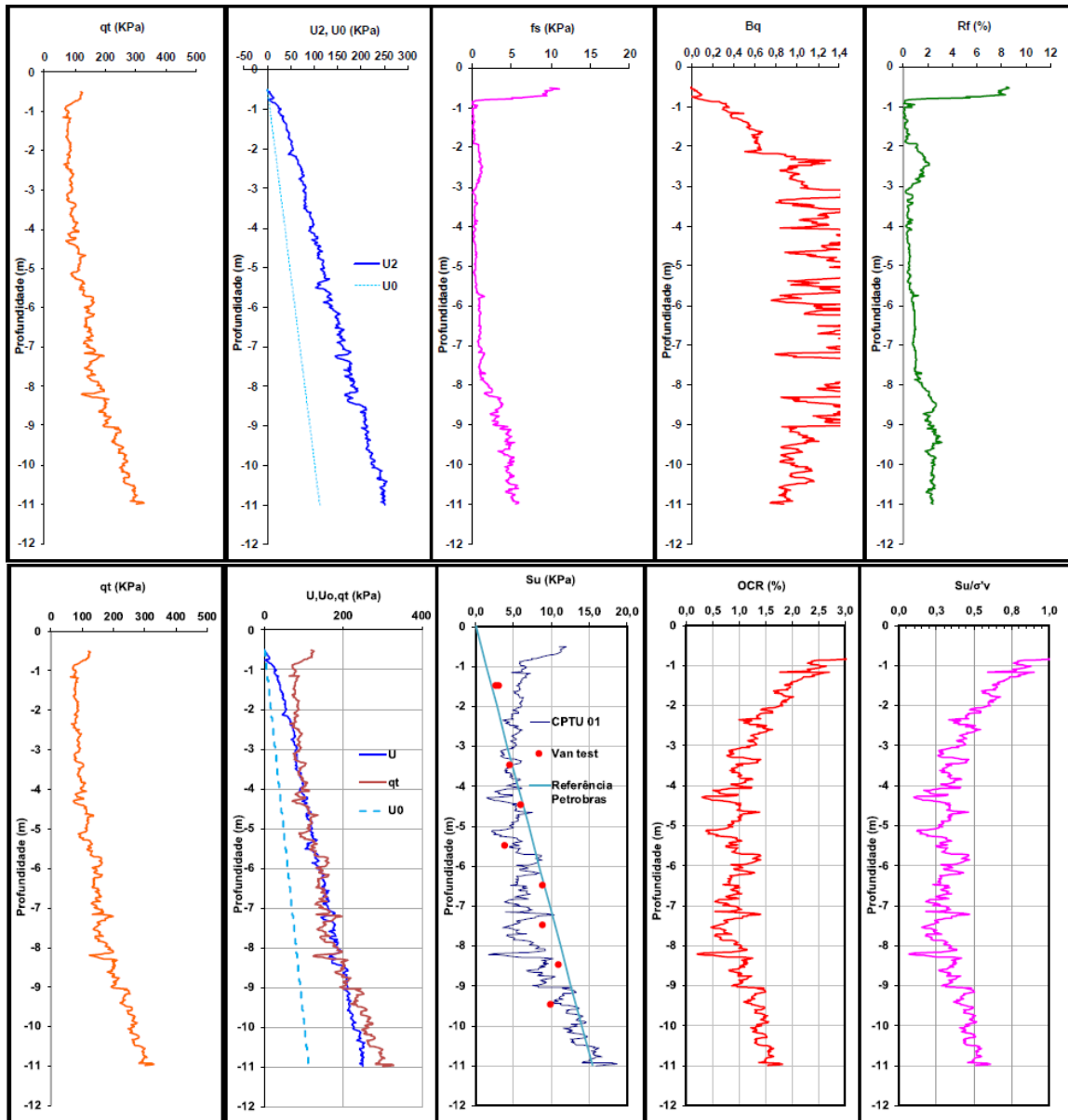


Figura A.6: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 04 (furo 01), nível de água (n.a.) = -0,50 m.

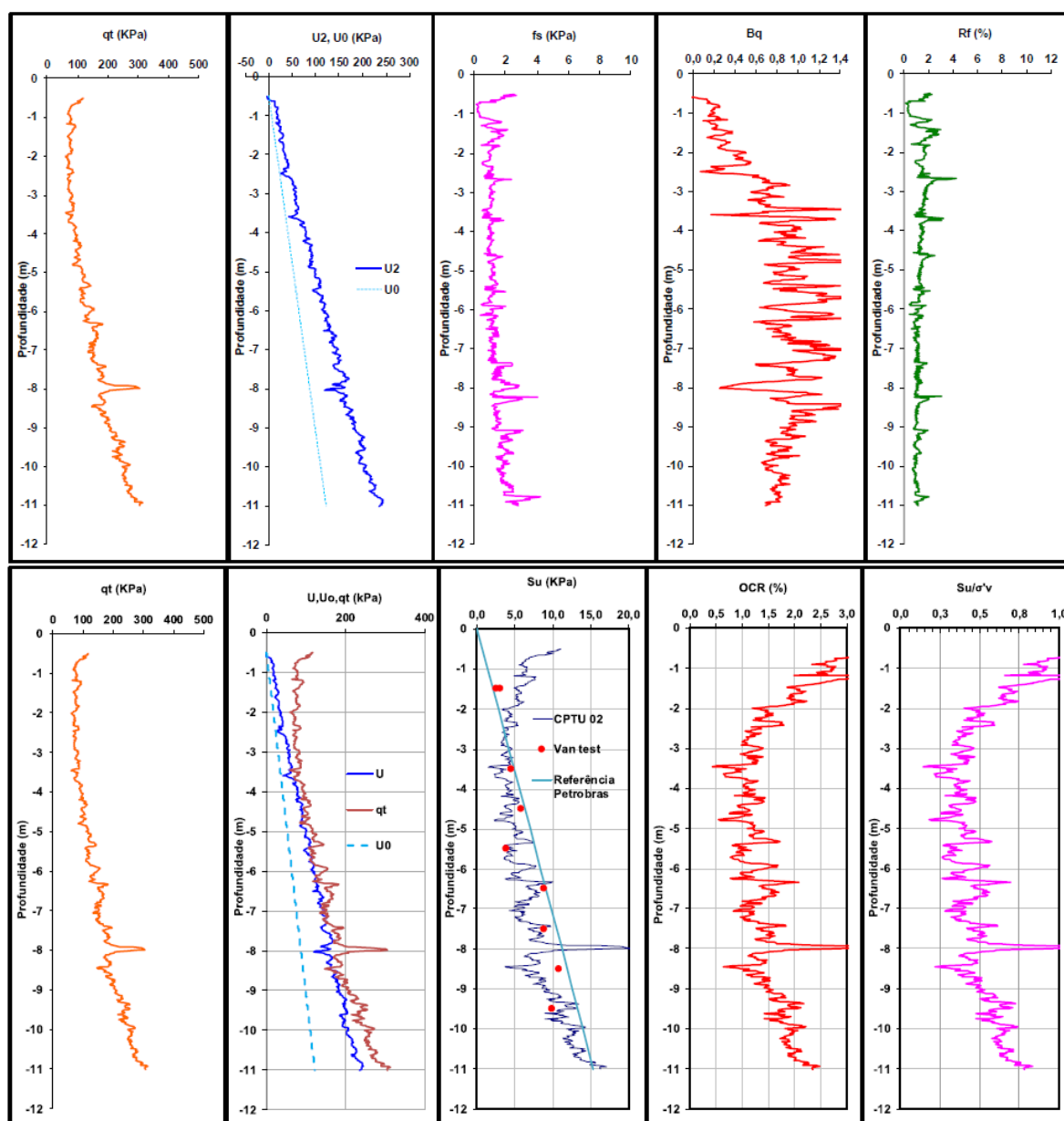


Figura A.7: Resultado dos ensaios de CPTu e palheta da sondagem 04 (furo 02), nível de água (n.a.) = -0,50 m.