

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Gabriela Martins Pinto

**ESTUDO PARAMÉTRICO DA ATENUAÇÃO DE CARGAS
ESTÁTICAS EM SISTEMAS DE ANCORAGEM OFFSHORE**

Porto Alegre

08/2014

GABRIELA MARTINS PINTO

**ESTUDO PARAMÉTRICO DA ATENUAÇÃO DE CARGAS
ESTÁTICAS EM SISTEMAS DE ANCORAGEM OFFSHORE**

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 na modalidade Acadêmico

Orientador: Fernando Schnaid
Coorientador: Marcelo Rocha

Porto Alegre

08/2014

PINTO, Gabriela Martins

Estudo paramétrico da atenuação de cargas estáticas em sistemas de ancoragem offshore / Gabriela Martins. – Porto Alegre, RS: PPGEC/UFRGS, 2014. 114p.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestrado. Orientador: Fernando Schnaid. Coorientador: Marcelo Maia Rocha.

1. Atenuação. 2. Fundações 3. Fundações offshore

GABRIELA MARTINS PINTO

**ESTUDO PARAMÉTRICO DA ATENUAÇÃO DE CARGAS
ESTÁTICAS EM SISTEMAS DE ANCORAGEM OFFSHORE**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, 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, 07 de AGOSTO de 2014

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

Prof. Marcelo Rocha
Dr. Universität Innsbruck, [Austria](#)
co-orientador

Prof. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Edgar Odebrecht (UDESC)
Dr. pela UFRGS

Alessander C. Morales Kormann (FUGRO-IN SITU)
Dr. pela USP

Claudio Amaral (Petrobras)
MsC pela PUC/RJ

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família, incansáveis em me apoiar e dar todo o amor e carinho, sem eles essa caminhada não teria sido possível.

Agradeço também à equipe da Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, da qual a cada dia tenho mais orgulho em fazer parte e que me apoiou incansavelmente desde o começo desta jornada.

Com todo meu respeito agradeço aos professores Fernando Schnaid e Marcelo Rocha pela orientação e dedicação.

À qualificada equipe de professores do PPGEC deixo meu agradecimento por compartilharem conosco seus conhecimentos.

E por fim aos meus amigos que ajudaram a tornar esse trajeto muito mais leve com sua amizade.

RESUMO

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

As reservas de petróleo e gás estão localizadas cada vez mais longe da costa e em águas profundas e ultra profundas, o que faz necessário a utilização de estruturas flutuantes, as quais estão sujeitas às forças impostas por condições ambientais, tais como vento, ondas e correntes marítimas. É portanto relevante o estudo de sistemas de ancoragem de estrutura flutuantes, sendo estes responsáveis pelo posicionamento da plataforma, garantindo segurança às operações realizada. Este é o objetivo do presente trabalho, que diz respeito a um estudo numérico do comportamento do trecho enterrado da linha de ancoragem de plataformas flutuantes de extração, produção e/ou armazenamento de petróleo.

O sistema de ancoragem estudado é do tipo taut-leg, recomendado para lâminas de água superiores a 1000m. Este tipo de ancoragem pode ser dividido em três partes, um trecho suspenso que vai da plataforma até o leito marinho, um trecho apoiado sobre o leito marinho e um terceiro segmento que penetra no solo junto com a âncora, o qual adquire a forma de uma catenária invertida. Este tipo de sistema chega ao leito marinho com inclinações entre 30 e 45° e é capaz de resistir a esforços horizontais e verticais.

O objetivo deste estudo é analisar os parâmetros envolvidos, as forças atuantes e a configuração do trecho em catenária invertida, através de análise numérica para os experimentos realizados em laboratório em escala reduzida. Os ensaios experimentais realizados por Rocha (2014) consistiram na aplicação de um conjunto de forças no trecho da linha de ancoragem que simula o encontro da corrente com o leito marinho, medindo-se as cargas no ponto que representa o olhal onde a corrente é fixada à âncora. A configuração da linha no trecho enterrado era obtida através de um ultrassom. Neste trabalho foi feita retro-análise numérica dos resultados obtidos experimentalmente a fim de se determinar os parâmetros que definem o equilíbrio do trecho enterrado da linha de ancoragem. Esses parâmetros foram validados para diferentes carregamentos, respeitando as configurações do solo e da corrente, através de um conjunto de equações diferenciais e do software DIGIN. Com base nas análises são quantificados a atenuação do sistema e os parâmetros de capacidade de carga e adesão que controlam o processo de transferência de cargas.

Palavras-chave: efeito de escala; estaca torpedo, linha de ancoragem, análise numérica da catenária invertida, atenuação.

ABSTRACT

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

Oil and gas reserves are located offshore, in deep and ultra deep waters and for this reason the use of floating structures becomes necessary. Those structures are subject to forces imposed by environmental conditions such as wind, waves and sea currents. It is therefore relevant to study the anchoring of floating structure systems, as it is responsible for positioning the platform and ensuring security operations. This is the aim of the present research efforts, which describes a numerical study of the behavior of the embedded portion of systems designed to anchor the floating platform during extraction, production and/or storage of oil.

The taut-leg mooring system is the one studied herein, which is recommended for water depth beyond 1000m. This type of mooring system can be divided in three parts, one part that runs from the suspended platform to the seabed, a slice resting on the seabed and a third segment that penetrates the soil together with the anchor, which takes the form of an inverse catenary. This type of mooring system reaches the seabed at angles of 30° to 45° and is able to resist horizontal and vertical forces.

The objective of this study is to analyze the parameters involved in the anchor system, the forces acting at the inverse catenary and its configuration through numerical analysis of small-scale laboratory experiments. Experimental tests conducted by Rocha (2014) consisted of applying a set of forces on the a chain that simulates the embedded portion of the anchor line, from the seabed to the shank attachment point, using a load cell located at a point that represents the lug throw in which the chain is connected to the anchor. The configuration of the embedded portion of anchor line was obtained through an ultrasound. In this study the experimental results were numerically back analyzed in order to determine the parameters that define the equilibrium of the embedded slice of the anchor line. These parameters were validated for various loads in compliance with both soil resistance and the configuration of the chain through a set of differential equations and DIGIN software. Based on this analysis, the attenuation of the system is quantified and the parameters controlling of load capacity and adherence are obtained.

Keywords : effects of scale, torpedo pile, anchor line, numerical analysis of the inverse catenary, attenuation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do sistema de ancoragem por âncora-torpedo.	9
Figura 2: Sistemas estruturais para a exploração de petróleo do mar. Da esquerda para direita: plataformas fixas, TLPs (<i>Tension Leg Platform</i>), spar buoy, semi-submersível, navio FPSO (PROMINP, 2008 apud COSTA, 2008).	12
Figura 3: Sistemas de ancoragem <i>taut-leg</i> versus convencional em catenária (BRUM, 2009).	13
Figura 4: Estacas de sucção (RANDOLPH et al, 2005).	14
Figura 5: Âncora VLA (VRYHOF, 2009 apud BRUM, 2009).	15
Figura 6: Estaca torpedo (AGUIAR, 2007 apud COSTA, 2008).	16
Figura 7: Lançamento de estaca torpedo (MEDEIROS, 2002 apud COSTA, 2008).	17
Figura 8: Forças atuantes no equilíbrio de estacas (VELLOSO E LOPES, 2010).	20
Figura 9: Fatores de adesão para estacas cravadas em argila McCLELLAND, 1974 apud POULOS E DAVIS, 1980).	23
Figura 10: Carga transferida para a estaca em argila resistente em Stanmore (TOMLINSON, 1997).	24
Figura 11: Curvas de fatores de adesão para estacas cravadas em solos argilosos (TOMLINSON, 1997).	25
Figura 12: Fatores de capacidade de carga para fundações em solo argiloso (SKEMPTON, 1951 apud POULOS E DAVIS, 1980).	27
Figura 13: Desenho esquemático das instalações para os ensaios. (DEGENKAMP E DUTTA, 1989).	29
Figura 14: Tensão no olhal medida experimentalmente e calculada analiticamente (DEGENKAMP E DUTTA, 1989).	32
Figura 15: Ângulo no olhal medida experimentalmente e calculada analiticamente (DEGENKAMP E DUTTA, 1989).	32
Figura 16: Resultados de ensaios de campo e laboratório realizados na Bacia de Santos (adaptado de TECHNICAL REPORT, 2010).	38
Figura 17: Esquema ilustrativo da linha de ancoragem analisada. (ROCHA, 2014).	39
Figura 18: Espectro de cargas aplicadas (ROCHA, 2014).	40
Figura 19: Geometria da linha de ancoragem (ROCHA, 2014).	41
Figura 20: Geometria da linha de ancoragem próxima ao <i>fairlead</i> (ROCHA, 2014).	41
Figura 21: Geometria da linha de ancoragem no trecho enterrado (ROCHA, 2014).	42
Figura 22: Variação da tração ao longo da profundidade (ROCHA, 2014).	42
Figura 23: Resultados experimentais, através de ensaio com mini-palheta, da resistência ao cisalhamento da argila "A" (100% de umidade).	46
Figura 24: Ajuste linear dos resultados experimentais, através de ensaio com mini-palheta, da resistência ao cisalhamento da argila "A" (100% de umidade).	47

Figura 25: Resultados experimentais, através de ensaio com mini-palheta, da resistência ao cisalhamento da argila "B" (120% de umidade).	47
Figura 26: Ajuste linear dos resultados experimentais, através de ensaio com mini-palheta, da resistência ao cisalhamento da argila "B" (120% de umidade).	48
Figura 27: Comparação entre resistências das argilas experimentais e da Bacia de Campos.	51
Figura 28: Conjunto de equipamentos utilizados por Rocha (2014) nos ensaios de carregamento estático.	52
Figura 29: Projeto da estrutura metálica (ROCHA, 2014).	53
Figura 30: Indicação das posições analisadas (ROCHA, 2014).	56
Figura 31: Configuração da catenária invertida para argila A para camada de 72cm de solo e carregamento de 14kg (ROCHA, 2014).	57
Figura 32: Configuração da catenária invertida para argila B para camada de 72cm de solo e carregamento de 14kg (ROCHA, 2014).	58
Figura 33: Comparação da configuração geométrica do trecho enterrado da linha de ancoragem nas argilas A e B para carregamento de 14kg (ROCHA, 2014).	58
Figura 34: Configuração generalizada da ancora e sua linha de ancoragem (KIM, 2005).	62
Figura 35: Esquema de forças aplicadas na linha de ancoragem no trecho enterrado (VIVATRAT et al., 1892 apud KIM, 2005).	62
Figura 36: Esquema de forças aplicadas no trecho suspenso da linha de ancoragem (MANUAL DIGIN, 1996).	64
Figura 37: Esquema típico do trecho enterrado da linha de ancoragem (NEUBECKER, 2004).	66
Figura 38: Esquema de forças aplicadas na linha de ancoragem no trecho enterrado (VIVATRAT et al., 1892 apud KIM, 2005).	67
Figura 39: Desenho esquemático para determinação da curvatura da catenária.	79
Figura 40: Comparação da configuração da catenária nas duas argilas para ângulos nominais de 55° e 35°.	80
Figura 41: Representação gráfica dos fatores de adesão obtidos por retro-análise.	83
Figura 42: Curvatura versus fator de adesão.	84
Figura 43: Representação gráfica dos fatores de capacidade de carga obtidos por retro-análise.	87
Figura 44: Curvatura versus fator de capacidade de carga.	88
Figura 45: Comparação entre N_c medido e N_c estimado.	89
Figura 46: Curvatura versus atenuação.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Fatores de adesão para estacas escavadas em argila (POULOS E DAVIS, 1980).	26
Tabela 02 – Propriedades Físicas e Geométricas das linhas de Ancoragem. (ROCHA, 2014)	39
Tabela 03 – Tabela resumo dos resultados fornecidos pelo DIGIN (ROCHA, 2014).	40
Tabela 04 – Grandezas fundamentais (CARNEIRO, 1996).	44
Tabela 05 – Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio de tração axial da linha de ancoragem (ROCHA 2014).	45
Tabela 06 – Determinação de Su em escala real para argila A (w=100%).	50
Tabela 07 – Determinação de Su em escala real para argila B(w=120%).	50
Tabela 08 – Forças analisadas no DIGIN para a argila A (w=100%).	76
Tabela 09– Forças analisadas no DIGIN para a argila B (w=120%).	78
Tabela 10 – Parâmetro α obtidos por retro análises.	82
Tabela 11 – Parâmetro N_c obtidos por retro análises.	86

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A = comprimento projetado do trecho enterrado corrente

A_b = área da base da estaca

A_f = área frontal da estaca

A_s = área lateral da estaca

\bar{C} = curvatura da catenária

c = coesão do solo

c_a = aderência entre solo e estaca

C_d = coeficiente de arrasto

C_e = coeficiente de deformação empírico do solo

d = diâmetro da estaca

d = diâmetro efetivo da linha de ancoragem (corrente ou corda)

ds = unidade de comprimento

DISP = deslocamento da corrente

ds = unidade de comprimento

E_n = constante para uniformizar o diâmetro da corrente na direção normal

E_t = constante para uniformizar o diâmetro da corrente na direção tangencial

F = resistência tangencial por unidade de comprimento

F_1 = força inercial de arrasto

F_2 = resistência de ponta

F_3 = força de atrito lateral

FHM = força horizontal junto ao olhal

FVM = forças vertical junto ao olhal

L = comprimento do trecho enterrado da catenária

M = massa da estaca

M' = massa efetiva

N_c = fator de capacidade de carga referente a resistência do solo;

N_q = fator de capacidade de carga referente a compressibilidade do solo

N_γ = fator de capacidade de carga referente a geometria da estaca

PULLF = força de tração horizontal aplicada no ensaio

Q = resistência normal por unidade de comprimento do segmento de linha

Q_b = capacidade de carga na base da estaca

Q_p = capacidade de carga da estaca

Q_s = capacidade de carga do fuste

$Q_{s_{unit}}$ = carga lateral unitária

S = comprimento do segmento da linha de ancoragem

S_e = taxa de deformação empírica máxima do solo

S_{ti} = perda de resistência ao cisalhamento das argilas quando amolgadas

S_u = resistência não-drenada;

t = tempo

T = carga no trecho final do segmento

T_0 = força de tração na amarra junto ao leito marinho

T_a = fora de tração junto à estaca torpedo

TH = tensão horizontal

UFRGS = Universidade Federal do Rio Grande do Sul

v = velocidade do projétil

V = volume da estaca

W = peso da estaca

w = peso submerso da linha de ancoragem por unidade de comprimento

W_b = peso submerso

z = profundidade

α = fator de adesão

γ = peso específico do solo

δ = ângulo de atrito entre estaca e solo

δ = fator de adesão lateral

δ_r = ângulo de atrito residual efetivo

ΔL = comprimento da linha de ancoragem no leito marinho

ΔL_i = comprimento do segmento de amarra analisado

Δs = comprimento dos segmentos

ΔT = atenuação absoluta [%]

ΔX = projeção horizontal do segmento da linha de ancoragem

ΔZ = projeção vertical do segmento da linha de ancoragem

$\Delta\theta$ = variação de θ ao longo da profundidade

θ_0 = ângulo no início do segmento analisado

θ_1 = ângulo no fim do segmento analisado

θ_a = ângulo com a horizontal da catenária junto ao leito marinho

θ = ângulo da força no olhal com a horizontal

λ_A = escala de área

λ_F = escala de força

λ_σ =escala de tensão

μ = coeficiente de atrito equivalente, sendo função das condições do solo e da linha de ancoragem enterrada no solo

ρ = densidade do solo

σ_h' = tensão horizontal efetiva

σ_h = tensão horizontal contra a superfície lateral da estaca

σ_{vb} =tensão vertical na cota de assentamento da estaca

τ_{unit} = atrito unitário em qualquer ponto ao longo da estaca

φ_{mod} =diâmetro da amarra do modelo (120mm)

φ_{prot} =diâmetro da amarra do protótipo (480mm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 JUSTIFICATIVA	8
1.2 OBJETIVO PRINCIPAL	9
1.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS	10
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO OFFSHORE	12
2.1.1 ESTACA TORPEDO	16
2.1.2 SISTEMA DE ANCORAGEM	17
2.2 ABORDAGEM TEÓRICA SOBRE CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS	19
2.2.1 RESISTÊNCIA LATERAL OU DE FUSTE (Q_s)	21
2.2.2 RESISTÊNCIA DE PONTA (Q_p)	26
2.3 EFEITO DE ATENUAÇÃO NA CATENÁRIA INVERTIDA	28
2.4 PROFUNDIDADE DE CRAVAÇÃO DE ESTACA TORPEDO	34
3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	37
3.1 ESTUDO DE CASO	37
3.2 ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA	43
3.3 MATERIAIS UTILIZADOS	45
3.3.1 Solo em estudo	45
3.3.2 Equipamento utilizado no Ensaio de Carregamento Estático	51
3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS	55
3.5 RESULTADOS OBTIDOS	57
3.5.1 Resultados para carregamento máximo	57
3.5.2 Análise de atenuação de carga	59
4 METODOLOGIA UTILIZADA NA RETRO ANÁLISE	60
4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DIGIN	60
4.1.1 Solo	61
4.1.2 Linha de Ancoragem	61
4.1.2.1 Definição da linha de ancoragem e posição	61
4.1.2.2 Equilíbrio do trecho enterrado	61
4.1.2.3 Equilíbrio do trecho suspenso	63
4.1.2.4 Linha de ancoragem no leito marinho	65
4.1.2.5 Equilíbrio total da linha de ancoragem	65

4.2 ANÁLISE DO TRECHO ENTERRADO DA LINHA DE ANCORAGEM	66
5 ANÁLISE DE RESULTADOS DAS RETRO ANÁLISES	71
5.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	73
5.1.1 Aquisição dos dados a partir do DIGIN	73
5.1.2 Aquisição dos dados a partir dos ensaios experimentais	78
5.2 CURVATURA DA CATENÁRIA INVERTIDA	78
5.3 FATOR DE ADESÃO α	80
5.4 FATOR DE CAPACIDADE DE CARGA N_c	85
5.5 ATENUAÇÃO	90
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
REFERÊNCIAS	94
APÊNDICE A – Análises do DIGIN para argila A (w=100%)	97
APÊNDICE B – Análises do DIGIN para argila B (w=120%)	99
APÊNDICE C – Retro análises para argila A (w=100%)	101
APÊNDICE D – Retro análises para argila B (w=120%)	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O petróleo é um óleo de origem fóssil, o qual levou anos para ser formado em rochas sedimentares e se tornou atualmente o principal recurso utilizado para suprir a demanda energética, tanto de consumo doméstico como industrial. A maior parte das reservas de petróleo, hoje, está em campos marítimos, em águas profundas e ultraprofundas. Águas profundas dizem respeito a lâminas de água superiores a 400 m, onde as plataformas convencionais, como as plataformas fixas e as auto-eleváveis, não são viáveis técnica e economicamente, sendo preferível a utilização de plataformas flutuantes. Pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias são necessárias para se trabalhar neste novo cenário de águas profundas.

O sistema de ancoragem é responsável pelo posicionamento destas plataformas flutuantes. Uma das soluções empregadas em águas profundas, são as âncoras-torpedo, as quais consistem um sistema composto por cabos, corrente e âncoras. No entanto a configuração do sistema pode variar para diferentes situações, podendo ser cravadas pelo efeito de queda livre causado pelo seu peso próprio. A Figura 1, obtida do trabalho de Júnior e Cintra (2005), mostra um esquema da âncora-torpedo.

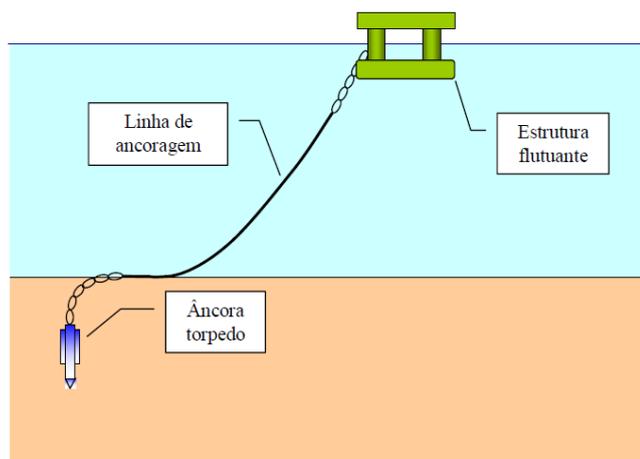


Figura 1: Esquema do sistema de ancoragem por âncora-torpedo.

Cabe ao sistema de ancoragem garantir a segurança nas operações realizadas nas plataformas, Lima (2011) apresenta como sendo a principal função da ancoragem interligar a unidade flutuante ao leito marinho através de seus componentes, fornecendo à plataforma passeios reduzidos devido a atuação das forças restauradoras ou através da elasticidade das linhas. Segundo Kunitaki (2006) as etapas necessárias para o projeto de uma estaca torpedo consistem na previsão da penetração da estaca no solo através de ferramentas computacionais, cálculo das cargas aplicadas no seu topo pela linha de ancoragem, incluindo a configuração da catenária invertida no trecho enterrado e por fim o cálculo da capacidade de carga.

O trabalho aqui proposto está inserido em um projeto que tem por objetivo o estudo de modelos reduzidos de estacas torpedo. Este estudo consiste em uma calibração dos parâmetros constitutivos do trecho enterrado da linha de ancoragem para o estudo experimental apresentado na dissertação de Cinthia Cristina Moraes Rocha, onde foi estudado, através de um modelo reduzido o efeito de atenuação ao longo deste trecho.

1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

A pesquisa tem como objetivo principal a análise numérica dos resultados obtidos experimentalmente em modelo reduzido, buscando identificar os parâmetros que controlam a atenuação resultante no trecho de ancoragem em catenária invertida quando submetida a diferentes combinações de forças de arrancamento e ângulos de aplicação das mesmas.

1.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Os objetivos secundários deste trabalho consistem em:

- análise do software DIGIN;
- implementar sistema de equações de equilíbrio do trecho enterrado;
- retro análise de trabalho experimental realizado por Rocha (2014).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho será dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo compreende a introdução, justificativa do trabalho e objetivos do mesmo, apontando sua relevância nos conhecimentos da área da geotecnia.

O segundo capítulo é referente a revisão bibliográfica dos principais assuntos abordados no desenvolvimento deste trabalho. O capítulo inicia com uma introdução a sistemas de ancoragem e fundação offshore, enfatizando ancoragem em catenária e estacas torpedo, os quais serão alvo de estudo neste trabalho. Em seguida é apresentada a teoria sobre capacidade de carga em estacas, e sua relação com a análise do trecho enterrado da linha de ancoragem. Ainda neste capítulo será tratado o problema de atenuação de cargas em estaca torpedo, sendo apresentado um trabalho onde também foi feita uma comparação entre resultados experimentais e numéricos. E por fim foi apresentada a metodologia utilizada para previsão de profundidade de cravação da estaca torpedo, item essencial nas análises realizadas neste trabalho.

O terceiro capítulo apresenta os resultados experimentais utilizados como base para análise numérica, bem como a metodologia utilizada para obtenção dos mesmos. E em seguida são apresentadas as simulações realizadas a fim de validar os resultados experimentais.

Na sequência o quarto capítulo apresenta a metodologia de cálculo para realização da retro análise da catenária. Neste capítulo são feitas considerações sobre as equações que permeiam o estudo da linha de ancoragem de uma plataforma flutuante, enfatizando o estudo do trecho da linha de ancoragem entre o leito marinho e o topo da fundação.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos na aplicação da metodologia apresentada no capítulo quatro, as faixas de valores para os parâmetros envolvidos e uma discussão sobre os fatores que influenciam estes parâmetros. Por fim o sexto capítulo apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO OFFSHORE

Os sistemas offshore compreendem unidades marítimas de exploração, produção e/ou armazenamento de petróleo. Estes sistemas podem ser fixos, tais como jaquetas, torre estaiada, torre Gamma, torre Roseau, torre Delta, plataformas auto-elevatórias, ou flutuantes: Plataformas semissubmersíveis, plataformas de pernas tensionadas (TLP), Plataformas Spar e Navios Ancorados (COSTA, 2008).

As plataformas fixas são uma solução tradicional para águas rasas. Em função da descoberta do petróleo em águas cada vez mais profundas e, conseqüentemente, sob condições ambientais mais severas, tornou-se inviável a instalação deste tipo de plataforma, levando a adoção de plataformas flutuantes como solução de estruturas de suporte às atividades de exploração (COSTA, 2008). A Figura 2 mostra sistemas estruturais de plataformas de exploração de petróleo.

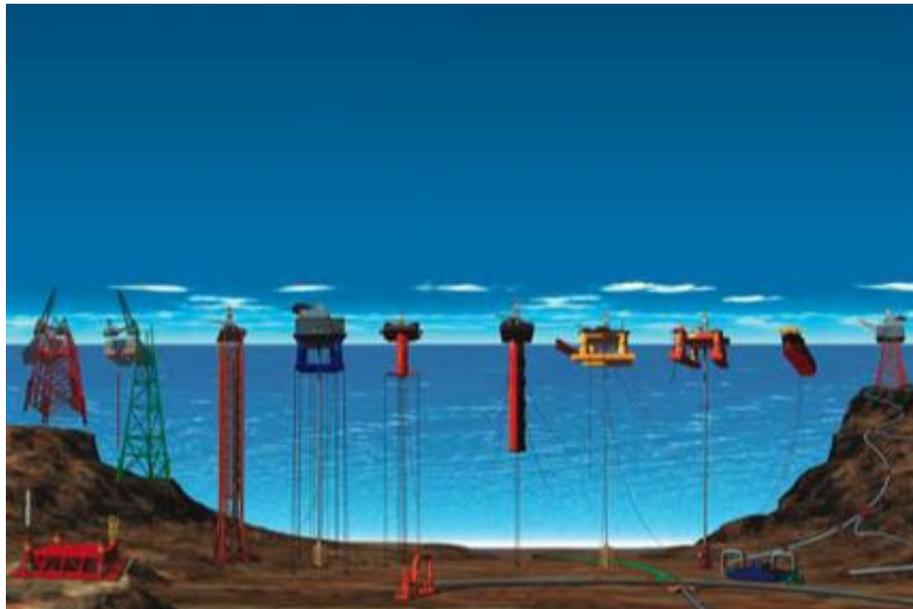


Figura 2: Sistemas estruturais para a exploração de petróleo do mar. Da esquerda para direita: plataformas fixas, TLPs (*Tension Leg Platform*), spar buoy, semi-submersível, navio FPSO (PROMINP, 2008 apud COSTA, 2008).

Estruturas flutuantes posicionadas *offshore* estão sujeitas a condições ambientais, como ondas, ventos e correntes marítimas (BRUM, 2009). Segundo Costa (2008) para manter as plataformas flutuantes fixadas em suas locações definidas em projeto, podem ser utilizados sistemas de ancoragem convencionais com linhas em configurações de catenária ou sistemas do tipo *taut-leg*. Cada sistema pode empregar diferentes tipos de elementos de fundação para servir de ponto fixo de ancoragem. O sistema de ancoragem do tipo catenária mantém a unidade flutuante em uma dada posição através da força de restauração das linhas, as quais se encontram presas ao fundo do mar por meio de âncoras de resistência horizontal. Para atender os critérios de projeto para passeio das unidades flutuantes ancoradas (por exemplo 10% da lâmina d'água) tem-se a necessidade de ter um raio de ancoragem relativamente grande, podendo gerar congestionamento de linhas de unidades próximas, interferindo no posicionamento das mesmas (LIMA, 2006). A ancoragem do tipo *taut-leg* é composta por linhas tensionadas com um ângulo de topo de aproximadamente 45° com a vertical, situação que gera uma projeção horizontal menor do que a ancoragem convencional com relação a mesma ordem de grandeza da lâmina d'água. As linhas *taut-leg* são constituídas nas suas extremidades por cabos de aço ou amarras e no seu trecho intermediário por cabo de poliéster. Na Figura 3 é possível observar uma comparação entre o sistema de ancoragem *tau-leg* e o convencional em catenária. Nas estacas torpedo, tema de estudo deste trabalho, a ancoragem é do tipo *taut-leg*.

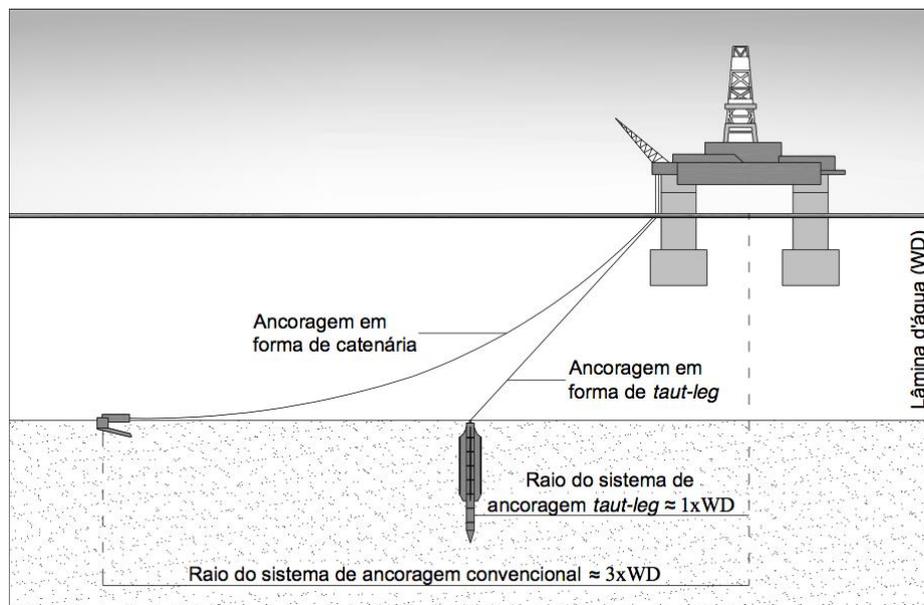


Figura 3: Sistemas de ancoragem *taut-leg* versus convencional em catenária (BRUM, 2009).

No que diz respeito às fundações das plataformas *offshore*, em um primeiro momento era comum a adoção de fundações profundas, em função do aumento da lâmina d'água e do incremento de cargas ocasionados por este aumento, e por este motivo foram desenvolvidas diferentes estruturas de fundação, tais como âncoras e estacas torpedo.

Fundações profundas tais como estacas de sucção, estacas injetadas e estacas grauteadas utilizadas até pouco tempo apresentam capacidade de carga satisfatória, mas possuem um alto custo de instalação pois demandam unidades flutuantes especiais (a Figura 4 apresenta estacas de sucção).



Figura 4: Estacas de sucção (RANDOLPH et al, 2005).

Outro tipo de fundações offshore são as âncoras. A evolução de materiais e geometria deste tipo de fundação é contínua, de forma a se adaptarem aos carregamentos solicitados. Existem as âncoras VLA (*Vertical Load Anchors*) (Figura 5), as quais são instaladas por arrasto por meio de uma embarcação que é responsável por lançar e puxar a âncora. Esse tipo de âncora não resiste a componentes de cargas verticais, portanto são utilizadas em linhas de ancoragem por catenária.

Devido ao elevado número de linhas de produção, operação e ancoragem dos sistemas flutuantes na exploração em águas ultra-profundas está havendo um congestionamento no leito marinho. Com isso torna-se necessário o uso de elementos com menores raios de ancoragem, e

com maior suporte de cargas verticais (COSTA, 2008). Como opção existem as âncoras conhecidas como VLAs - Vertically Loaded Anchor (Figura 5), desenvolvidas para utilização em ancoragens tau-leg. Esse tipo de ancoragem é versátil em áreas congestionadas, sendo possível realizar a instalação em sentido diferente do desejado e posteriormente girar para a situação desejada. Âncoras VLA atingem profundidades elevadas de cravação e possuem alta eficiência, suportam trações de até aproximadamente 10.000kN. mas para sua instalação são necessários postes de amarração que chegam a 4.000kN, o que também torna necessário o uso de navios de manuseio para instalação, encarecendo este tipo de solução (COSTA, 2008). Sua garra é mais fina quando comparada a âncoras convencionais e sua haste é mais fina ou até mesmo composta por um conjunto de cabos de aço.



Figura 5: Âncora VLA (VRYHOF, 2009 apud BRUM, 2009).

As estacas torpedo surgiram como uma alternativa para diminuir os custos de fabricação e instalação de fundações em água ultra-profundas e tem como principal característica a cravação através de penetração dinâmica. A estaca torpedo é geometricamente curta e tem aletas na parte superior do tubo principal, o que aumenta o contato solo-estaca, aumentando desta forma a resistência da fundação.

Estas estacas tem sido objeto de diversos estudos numéricos e experimentais para avaliar seu comportamento de cravação e capacidade de carga. Na Figura 6 apresenta-se um exemplo de estaca torpedo, cujas principais características serão tratadas em detalhes na seção 2.1.1.



Figura 6: Estaca torpedo (AGUIAR, 2007 apud COSTA, 2008).

2.1.1 ESTACA TORPEDO

O conceito de estaca torpedo foi desenvolvido pela Petrobras em 1996 com o objetivo de diminuir custos de fabricação e instalação de fundações em águas profundas (KUNITAKI, 2006). Sua instalação é realizada por gravidade, onde a estaca é transportada até certo ponto do leito marinho e largada em direção ao solo (LIMA, 2011). A estaca é liberada a uma altura pré estabelecida do fundo do mar e é cravadas por penetração dinâmica devido a ação do seu peso (COSTA, 2008)

A geometria da estaca é cônica com ponta fechada e na parte superior existe um olhal que permite que a carga de ancoragem seja aplicada em qualquer direção. O material do corpo é aço tubular e o preenchimento pode ser de sucata de aço, concreto ou até mesmo chumbo, sendo a dosagem do material de preenchimento feita de maneira a se obter a maior massa específica possível. Em geral o comprimento da estaca é 10 vezes o diâmetro (COSTA, 2008). As dimensões da estaca torpedo são variáveis, com diâmetro entre 0,76 e 1,10m, comprimento

entre 12 e 15m e peso entre 250 a 1000kN. Alguns modelos possuem quatro aletas, as quais podem ter suas dimensões entre 0,45 a 0,90m de largura e 9,0 a 10,0m de comprimento (RANDOLPH, 2005). A existência de aletas minimiza os problemas de baixa resistência lateral e é responsável por admitir uma maior rigidez axial à estaca, além de manter sua verticalidade durante o lançamento. Na Figura 7 é apresentada uma estaca torpedo no momento do lançamento.



Figura 7: Lançamento de estaca torpedo (MEDEIROS, 2002 apud COSTA, 2008).

2.1.2 SISTEMA DE ANCORAGEM

O sistema de ancoragem é uma parte importante no projeto de estruturas flutuantes, em função de sua relevância constantemente são desenvolvidos trabalhos para estudá-lo. A linha de ancoragem, como dito anteriormente, pode ser classificada principalmente em dois tipos: catenária e *taut-leg*. Segundo Kim (2005) os dois tipos são divididos basicamente em três partes – trecho enterrado, trecho no leito marinho e trecho suspenso. Geralmente utiliza-se corrente como material do trecho enterrado, cabo de aço ou poliéster no trecho intermediário e corrente junto à plataforma.

Ainda segundo Kim (2005), o sistema de ancoragem em catenária é bastante utilizado na indústria offshore, tratando-se de um sistema convencional que requer uma grande área para

sua utilização, podendo interferir em linhas de ancoragens próximas. Seu uso é aconselhável para profundidades de até 1000m. A catenária chega ao leito marinho na horizontal, e utiliza a força horizontal das amarras para fornecer e restaurar as forças que mantêm a unidade ancorada. Conforme aumenta a lâmina d'água o peso próprio da linha também aumenta, bem como a área ocupada pela linha de ancoragem.

Para exploração e produção em lâminas de águas maiores que 1000m a utilização de sistemas do tipo catenária se torna complexo em função do peso resultante. Desta forma surgiu o sistema *taut-leg*, o qual exige uma fundação capaz de resistir a grandes carregamentos verticais. Este tipo de ancoragem chega ao leito marinho com um ângulo entre 30 e 45°, sendo desta forma capaz de resistir a esforços horizontais e verticais, ao contrário do sistema em catenária que resiste apenas a carregamentos horizontais. Além disto é um sistema mais leve e ocupa menor área de assentamento.

2.2 ABORDAGEM TEÓRICA SOBRE CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS

Neste item será tratada a teoria em torno da capacidade de carga de estacas, em especial estacas cravadas, as quais tendem a apresentar um comportamento semelhante ao da corrente cravada no solo em função do peso próprio da estaca torpedado. Nos dois casos o comportamento acontece em função de forças normais a peça (estaca ou corrente) e forças de atrito. Em um primeiro momento será feita uma revisão sobre capacidade de cargas em estacas e nos capítulos 4 e 5, onde são apresentados os parâmetros considerados e obtidos no presente trabalho será feita a comparação com os dados apresentados aqui.

Segundo a literatura (TOMLINSON, 1997; POULOS e DAVIS, 1980; VELLOSO e LOPES, 2010 et al.) o tipo de estaca, a distribuição de tensões no solo, o amolgamento e diferentes procedimentos de instalação geram reações distintas no solo. Esta influência está relacionada a capacidade de carga da estaca, desta forma é essencial dominar o processo construtivo da estaca em estudo para determinar sua capacidade de carga.

Neste trabalho serão abordados os métodos estáticos para previsão de capacidade de carga de estacas em solos argilosos. Estes métodos estudam a estaca mobilizando toda a resistência ao cisalhamento estática do solo e podem ser divididos em racionais, os quais utilizam soluções teóricas de capacidade de carga e parâmetros do solo ou semiempíricos, os quais se baseiam em ensaios de campo (e.g. VELLOSO E LOPES, 2010).

As reações de atrito e resistência de ponta, tratados de forma independente, para distintos tipos de estacas, são a base de todos os métodos de cálculo de capacidade de carga. A equação base para estes métodos é dada através do equilíbrio de forças atuantes na estaca e é exposta a seguir:

$$Q_p = Q_b + Q_s - W_p \quad \text{Equação 01}$$

onde,

Q_p = capacidade de carga vertical da estaca;

Q_b = capacidade de carga na base da estaca;

Q_s = capacidade de carga do fuste;

W_p = peso da estaca.

O diagrama de forças que ilustra a equação acima é apresentado na Figura 8.

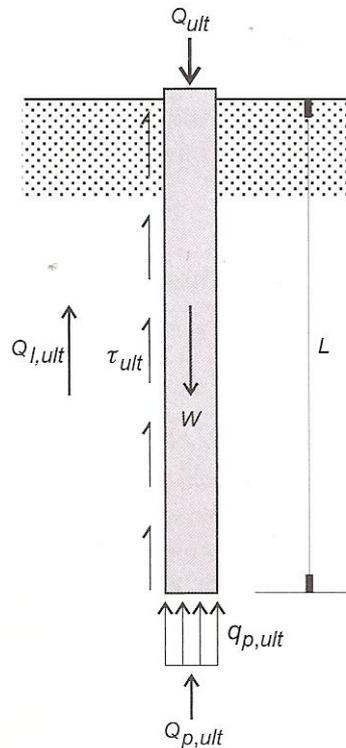


Figura 8: Forças atuantes no equilíbrio de estacas (VELLOSO E LOPES, 2010).

Na maioria das vezes o peso (W) representa um valor pequeno face ao valor de capacidade de carga da estaca, sendo muitas vezes desprezado. Segundo Tomlinson (1997) é necessário considerar o peso no caso de estacas utilizadas na instalação de estruturas marítimas em águas profundas, onde a estaca percorre um longo trecho até penetrar no leito marinho.

A seguir serão analisadas cada uma das parcelas que resultam na capacidade de carga das estacas com base em modelos estáticos para solos argilosos.

2.2.1 RESISTÊNCIA LATERAL OU DE FUSTE (Q_s)

A abordagem teórica utilizada para determinação da capacidade de carga à resistência lateral em estacas é semelhante àquela utilizada para analisar a resistência ao deslizamento de um sólido em contato com uma superfície, onde a componente principal é resultado do esforço normal ao movimento multiplicado pelo coeficiente de atrito. De maneira análoga, no caso de fundações profundas, a carga lateral unitária é resultado da tangente do ângulo de atrito formado entre o solo e a estaca multiplicada pela tensão horizontal contra a superfície lateral da estaca, devendo ser acrescentado o valor referente a aderência entre o solo e a estaca, resultando na Equação 02.

$$Q_{s_{unit}} = c_a + \sigma_h \tan \delta \quad \text{Equação 02}$$

onde,

c_a = aderência entre solo e estaca;

σ_h = tensão horizontal efetiva contra a superfície lateral da estaca;

δ = ângulo de atrito entre estaca e solo.

No caso de estacas em solos argilosos a capacidade de carga vertical não-drenada tende a ser o valor crítico, a não ser em casos de argilas com alto grau de pré-adensamento (Poulos; Davis, 1980). Em termos teóricos o atrito unitário ao longo do fuste está relacionando apenas à tensão horizontal efetiva atuando ao longo do comprimento da estaca e o ângulo de atrito efetivo e amolgado (residual) entre a estaca e a argila, resultando na Equação 03.

$$\tau_{unit} = \sigma_h' \tan \delta_r \quad \text{Equação 03}$$

onde,

τ_{unit} = atrito unitário em qualquer ponto ao longo da estaca;

σ_h' = tensão horizontal efetiva;

δ_r = ângulo de atrito residual efetivo.

A tensão horizontal é função da tensão vertical multiplicada pelo coeficiente de pressão lateral, K . Este coeficiente é variável em função do tempo de instalação da estaca e conseqüentemente do histórico de tensões ao qual ela foi submetida (e.g. Tomlinson, 1997). No caso de uma estaca cravada em uma argila média a rija K apresenta um valor inicial alto, como resultado da energia aplicada pelo martelo a fim de deslocar a parcela de solo necessária para cravação da estaca. No entanto a tensão vertical durante a cravação apresenta valores baixos devido ao alto valor de poro pressão durante o processo. Para estacas escavadas K apresenta valores baixos durante a escavação, mas tende a aumentar com o preenchimento com concreto.

Em função das constantes variações de K e da poro-pressão durante a vida útil da estaca torna-se necessário introduzir fatores empíricos e simplificações nos cálculos da capacidade de carga do fuste para que se possa utilizar a teoria clássica de mecânica dos solos (Tomlinson, 1997).

Para um solo argiloso em condições não-drenadas ($\dot{\sigma}'=0$), o atrito unitário pode ser calculado com base na resistência ao cisalhamento não-drenado, considerando-se empiricamente um fator de adesão solo-estaca (Poulos; Davis, 1980; Tomlinson, 1997), desta forma tem-se a capacidade de carga ao longo do fuste como sendo:

$$Q_s = \alpha S_u A_s \quad \text{Equação 04}$$

sendo;

α = fator de adesão

S_u = resistência não-drenada;

A_s =área da estaca em contato com o solo.

O fator de adesão (α) é uma relação entre a aderência do solo com a estaca e a resistência não-drenada do solo (c_u/S_u) e depende da resistência do solo, do tipo de estaca, da estratigrafia do solo e do método construtivo. Ele pode ser obtido experimentalmente através de provas de carga. Como nem sempre é possível a realização de ensaios, este fator pode ser determinado de maneira empírica. Poulos e Davis (1980) citam vários trabalhos que relacionaram o fator de adesão com a resistência não-drenada do solo. McClelland (1974) apud Poulos e Davis (1980) apresenta um gráfico ilustrando algumas das correlações existentes na bibliografia (Figura 9).

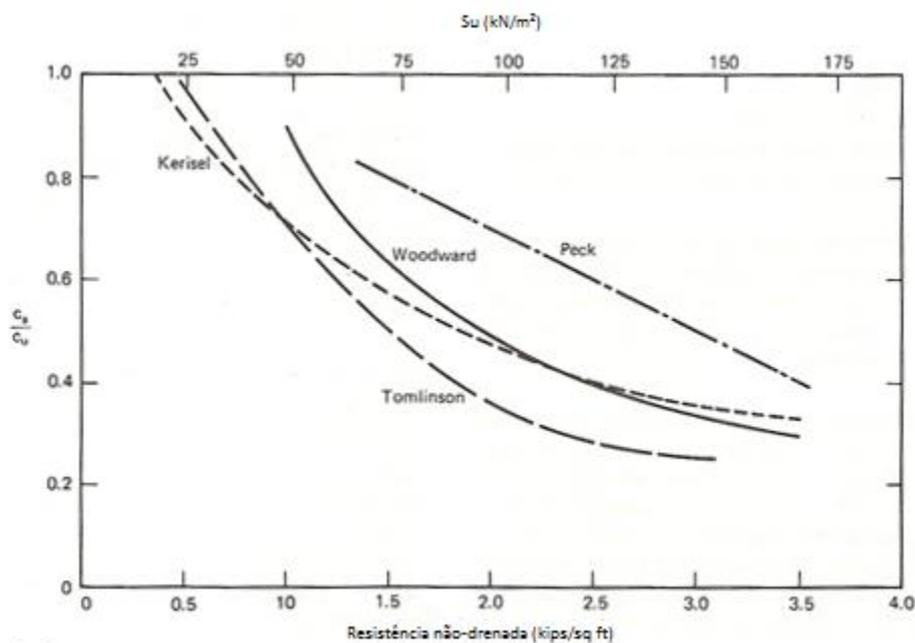


Figura 9: Fatores de adesão para estacas cravadas em argila (McCLELLAND, 1974 apud POULOS E DAVIS, 1980).

Entre estes estudos podemos citar Tomlinson (1997), que analisou a validação do fator de adesão, obtendo valores entre 1,0 e 0,2, sendo o fator menor para argilas mais resistentes. Em um estudo realizado para *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA) em 1969, citado por Tomlinson (1997), estacas de metal foram cravadas em uma argila de alta resistência e foram submetidas a provas de carga após 1 mês, 3 meses e 1 ano da cravação. Algumas destas estacas foram exumadas a fim de se verificar o comportamento do solo ao redor delas. Foi verificado que a lacuna formada entre a estaca e o solo, resultante da movimentação de solo durante a cravação, se estendia a uma profundidade de 8 vezes o diâmetro da estaca, e após um ano ainda não havia se fechado. Entre a profundidade de 8 a 14 e 16 diâmetros a argila estava parcialmente aderida a estaca e a partir de 16 diâmetros havia uma camada de espessura entre 1 a 5mm de argila aderida a estaca. Neste trecho mais profundo da estaca a ruptura não aconteceu entre a estaca e o solo e sim entre a camada aderida à estaca e o solo ao seu redor. Foram instaladas células de carga em torno da estaca para verificar como ocorre a transferência de carga da estaca para o solo. Foi verificado que não havia transferência de carga no trecho superior da estaca, em função da lacuna entre estaca e solo. A maior parte da carga foi transferida no trecho inferior da estaca, onde a adesão resultava em torno de 20% acima da coesão da argila. Bond e Jardine (1991) realizaram diversos ensaios com estacas instrumentadas

confirmando a distribuição de tensões apresentada por Tomlinson (1997), a qual está apresentada na Figura 10.

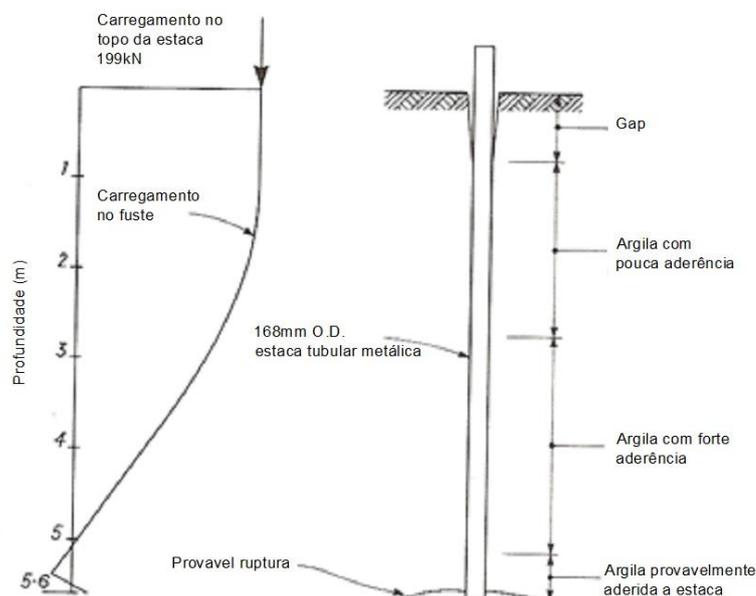


Figura 10: Carga transferida para a estaca em argila resistente em Stanmore (TOMLINSON, 1997).

Ainda durante o projeto CIRIA Tomlinson (1997) estudou os efeitos de uma camada sobrejacente a camada de assentamento da estaca. Foram analisados dois tipos de material para estaca camada sobrejacente, argila mole e areia. Foi verificada a relevância da profundidade de cravação na determinação do fator de adesão.

Tomlinson (1997) apresentou seus resultados de maneira gráfica, relacionando a resistência não-drenada do solo com o fator de adesão para os casos de camada sobrejacente de areia, argila e sem esta camada. A validade destas curvas foi aferida através da comparação com a previsão de capacidade de carga com a observada em 78 provas de carga realizadas até a ruptura em terrenos onde as propriedades do solo eram conhecidas. Em todos os caso o fator de capacidade de carga N_c igual a 9. Os resultados obtidos pelo autor são apresentados na Figura 11.

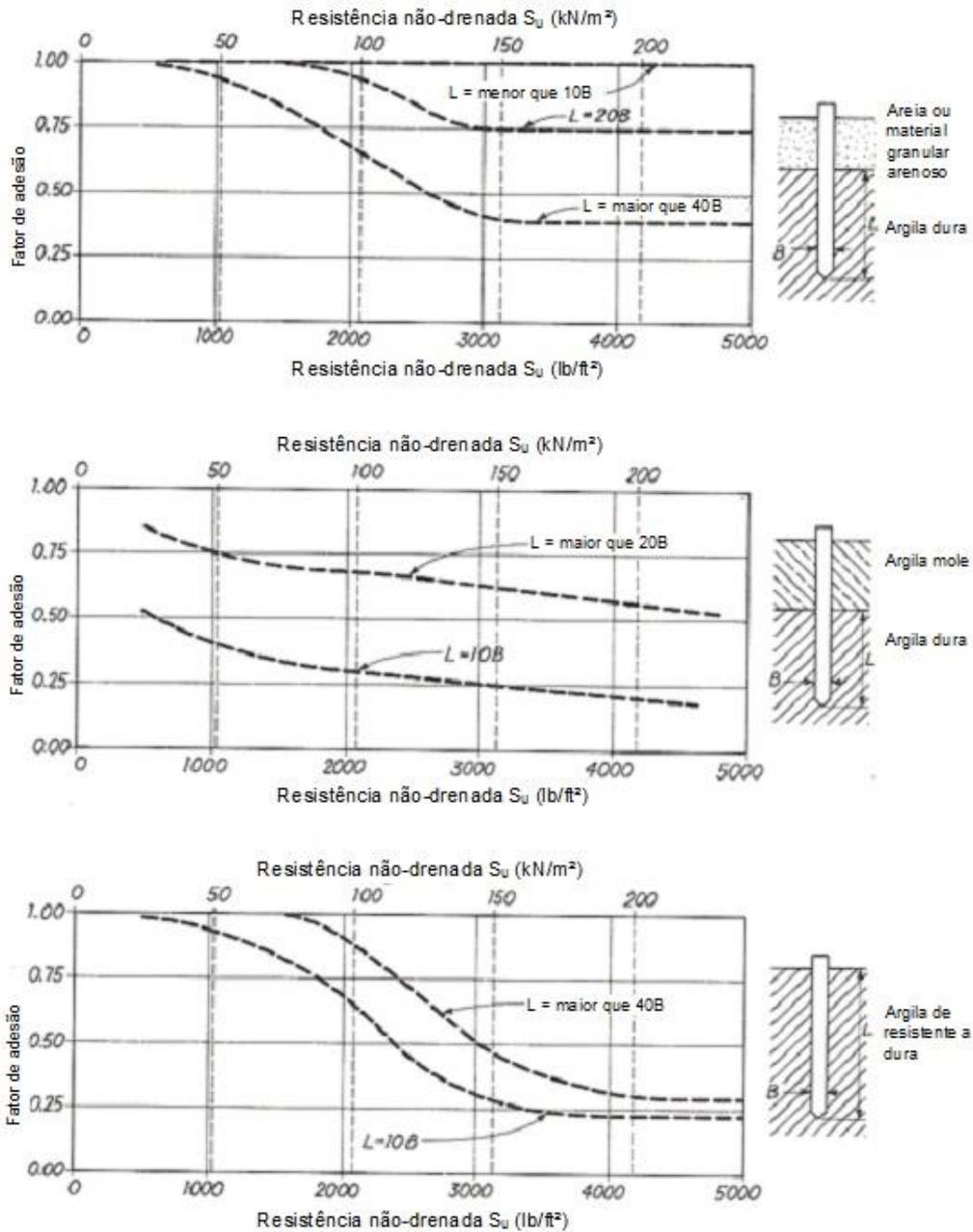


Figura 11: Curvas de fatores de adesão para estacas cravadas em solos argilosos (TOMLINSON, 1997).

Estes fatores de adesão são utilizáveis em estaca cônica, as quais possuem a tendência de fechar a lacuna em torno da parte superior da estaca e aumentar a consolidação do material arrastado junto a ponta da estaca.

A bibliografia existente com estudos para estacas escavadas é menos extensa e a maior parte dos estudos estão relacionados a argila de Londres (altamente pré-adensada). Poulos e Davis (1980) apresentam na Tabela 01 reproduzida a seguir um resumo dos fatores de adesão obtidos.

Tabela 01 – Fatores de adesão para estacas escavadas em argila (POULOS E DAVIS, 1980).

Tipo de solo	Fator de adesão	Valor	Referência
London Clay	c_a/c_u	0,25 – 0,7 Média 0,45	Golder e Leonard (1954) Tomlinson (1957) Skempton (1959)
Argila sensitiva	c_a/c_r	1	Golder (1957)
Argila altamente expansiva	c_a/c_u	0,5	Mohan e Chandra (1961)

2.2.2 RESISTÊNCIA DE PONTA (Q_p)

Poulos e Davis (1980) apresentam a resistência de ponta das estacas como sendo:

$$Q_{punit} = A_b (cN_c + \sigma_{vb}N_q + 0,5\gamma dN_\gamma) \quad \text{Equação 05}$$

sendo;

A_b = área da base da estaca;

c = coesão do solo;

σ_{vb} =tensão vertical na cota de assentamento da estaca;

γ = peso específico do solo;

d = diâmetro da estaca;

N_c , N_q e N_γ = fatores de capacidade de carga, os quais são referentes a resistência do solo, a compressibilidade do solo e a geometria da estaca respectivamente.

Para o caso de argilas saturadas onde ϕ é zero o fator N_q é igual a um e o fator N_γ é zero a resistência de ponta é dada através da Equação 06.

$$Q_p = cN_cA_b \quad \text{Equação 06}$$

Skempton (1951 apud POULOS; DAVIS, 1980) propôs para estacas de seção circular valores de N_c variando entre 6,14 no topo da estaca até 9 a uma profundidade maior que 4 vezes o diâmetro da estaca, a Figura 12 representa graficamente os resultados obtidos por Skempton (1951).

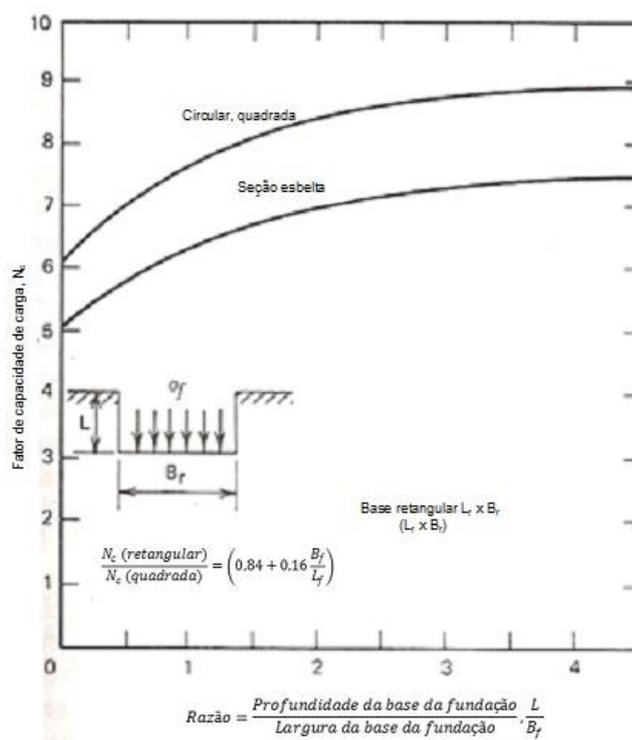


Figura 12: Fatores de capacidade de carga para fundações em solo argiloso (SKEMPTON, 1951 apud POULOS E DAVIS, 1980).

Este valor próximo de 9 foi validado em ensaios realizados com a argila de Londres (SKEMPTON, 1959 apud POULOS; DAVIS, 1980). No entanto podemos encontrar diferentes valores de N_c na literatura, Poulos; Davis (1980) citam Sowers (1961) que encontrou valores entre 5 e 8 e Mohan (1961) que encontrou valores entre 5,7 e 8,2 para ensaios em argilas expansivas. A variação de N_c pode estar associada ao comportamento tensão-deformação do solo. Através de ensaios de expansão da cavidade Ladanyi (1963 apud POULOS; DAVIS, 1980) encontraram para argilas não sensíveis valores de N_c variando entre 7,4 e 9,3, sendo a variação em função do comportamento tensão-deformação do solo analisado.

2.3 EFEITO DE ATENUAÇÃO NA CATENÁRIA INVERTIDA

O fato de um trecho da linha de ancoragem estar enterrada no solo resulta em uma situação onde ocorre movimento significativo (deslizamento) da linha de ancoragem devido cargas ambientais. Não existem normas que determinem o nível de tensões ao qual a linha de ancoragem está submetida, nem como o carregamento se comporta, ficando ao projetista a responsabilidade de determinar as tensões máximas admissíveis.

Na presente pesquisa foram realizados estudos para determinar como se dá a distribuição das forças aplicadas à linha de ancoragem do trecho enterrado, quando submetida a deslocamentos que geram uma situação de corte no solo. A atenuação aqui tratada refere-se a diferença entre a força aplicada no sistema de ancoragem no leito marinho e a força que chega na conexão da catenária com a estaca.

O estudo consiste na proposição de formulações numéricas para analisar o comportamento da amarra no solo. Tais métodos dividem a corrente em pequenos segmentos para o cálculo do equilíbrio de forças em cada um destes trechos. Estas formulações levam em conta as propriedades do solo e as características da corrente. O sistema de equações que define a atenuação na corrente é apresentado no Capítulo 4.

Inúmeros trabalhos são relatados na literatura com relação a atenuação, Vivatrat (1982) é um dos nomes mais citados, sendo um dos precursores no estudo das formulações em torno da catenária invertida. Neubecker; O'Neill (2004) também discutem o comportamento do trecho enterrado da ancoragem bem como os parâmetros que regem o seu comportamento. Wang; Yuan (2010) estudaram através modelos numéricos 3D a interação entre solo-corrente. Degenkamp e Dutta (1989), foi uma combinação de ensaio experimental e análise numérica, se aproximando da análise proposta no presente trabalho, por este motivo será detalhado a seguir.

A partir de uma série de ensaios realizados em laboratório foram determinados os parâmetros que envolvem a atenuação de forças no trecho enterrado da linha de ancoragem. Estes ensaios foram solicitados pela empresa *Single Buoy Moorings*. O modelo utilizado nos ensaios de laboratório simulou uma a situação existente na prática quando aplicada uma força na linha de ancoragem. A Figura 13 mostra um desenho esquemático do modelo utilizado em laboratório.

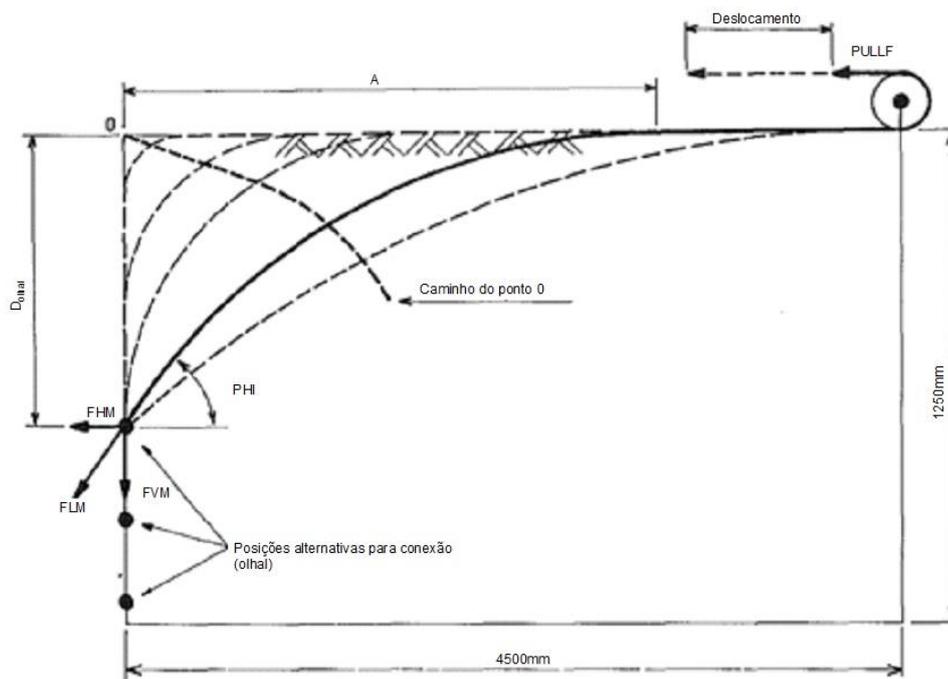


Figura 13: Desenho esquemático das instalações para os ensaios.
(DEGENKAMP E DUTTA, 1989).

A corrente foi conectada na lateral de um tanque com dimensões 4,5x1,25x0,37m, as leituras das forças horizontais e verticais lidas nesta conexão. Após conectar a corrente, o tanque foi preenchido com material argiloso enquanto a corrente e na posição vertical. O trecho livre da corrente repousava sobre o solo e era guiado por uma roldana, sendo sua extremidade conectada a um cilindro hidráulico que exercia a força de tração. A força de tração era aplicada a uma velocidade de 0,002m/s, a qual foi considerada, pelos autores, adequada para gerar condições de carregamento não-drenado em solos argilosos. Ao longo do ensaio, em intervalos regulares, foram verificadas as seguintes medidas:

- o deslocamento da corrente (DISP);
- o comprimento projetado do trecho enterrado corrente (A);
- a força de tração horizontal aplicada no ensaio (PULLF);
- e as forças vertical e horizontal junto ao olhal (FHM e FVM).

Foram realizados 10 ensaios no total, variando o tamanho da corrente e a profundidade de ancoragem.

O solo utilizado foi uma argila saturada com resistência não-drenada (S_u) de 4,52kPa, sendo verificado um desvio padrão de 0,57kPa ao longo de 30 leituras. Após os ensaios era verificada novamente a resistência não-drenada e o novo valor era de 4,58kPa, com desvio padrão de 0,06kPa. O S_u foi obtido por meio do ensaio de vane a uma velocidade de 0,1rev/s. O peso específico do material utilizado era 18,8kN/m³. Foram utilizadas três correntes com diâmetros 6,4mm, 9,5mm e 16mm. Apesar do modelo das correntes utilizadas no experimento não serem do tipo *stud-link* (modelo específico de corrente), suas dimensões foram determinadas para simular este tipo de corrente. O peso das correntes era de 9,1N/m, 20 N/m e 54,6N/m respectivamente.

Os resultados dos ensaios foram utilizados para determinar os parâmetros E_n e E_t , coeficientes para uniformizar o diâmetro da corrente tanto nas direções, em relação a corrente, normal e tangencial respectivamente. A partir da resistência do solo utilizado no modelo e variando os valores de E_t entre 1,8 e 3,6 e E_n entre 3,0 e 12,0 foi calculado o ângulo da corrente junto ao olhal (ponto de ligação entre a estaca e a linha de ancoragem), e as forças horizontais e verticais, e comparados com os dados medidos no ensaio, ajustando-se os resultados. Foram testados 25 modelos de solos com resistências diferentes, sendo a parcela de resistência por atrito com o solo a resistência não-drenada multiplicada pelo fator de redução (para argilas $\alpha_r=1$). Para calcular a força normal foram feitas as seguintes considerações:

- a força normal última atuando na corrente é resultado da combinação de uma componente horizontal (função do atrito lateral) e uma componente vertical resultante de formulações de capacidade de carga.
- a força normal última na corrente foi considerada como sendo uma constante entre 7 e 11 vezes a resistência não-drenada. A força normal pode chegar a 12 vezes o fator de aderência (α) da corrente.

A resistência ao deslizamento foi estimada como sendo 0,56 vezes o peso da corrente. O atrito próximo à superfície não foi verificado no ensaio e desta forma não pode ser confirmado ao longo do trabalho. Por conservadorismo o fator de atrito foi considerado na análise, embora tenha pouco impacto sobre os resultados, pois sua magnitude é apenas uma fração da força de tração. Segundo Degenkamp e Dutta (1989) o valor de 0,56 foi proposto por Yen and Tofani (1984) e encontra-se na faixa de valores apresentados na literatura.

O modelo de solo que apresentou melhores resultados para os coeficientes E_t e E_n foram utilizados nas análises. O desvio padrão foi utilizado como critério básico para determinar o conjunto mais representativo de valores para E_t e E_n .

O coeficiente E_n , o qual está relacionado com a força normal da corrente, é o mais importante na determinação da configuração da corrente, e o valor obtido para este coeficiente foi na faixa de 2,0 a 3,0, com valor médio 2,5 e desvio padrão 0,30. Degenkamp e Dutta (1989) afirmam que este desvio padrão está de acordo com o desvio padrão da resistência não-drenada considerada nos ensaios. Utilizando o método de cálculo apresentado no capítulo 4 deste trabalho os valores de E_n tendem a aumentar com o aumento do comprimento do trecho enterrado da corrente, isto pode ser explicado pelo fato do solo não ter um aumento linear de resistência ao longo da profundidade. O fator E_t define a resistência do solo ao atrito e resultou em valores na faixa de 5,5 a 12, média de 8,2 e desvio padrão de 1,91. Em função do alto valor no desvio padrão foi aconselhado pelos autores utilizar um valor médio de 8,0 em trabalhos futuros a fim de evitar dar um alto grau de precisão a este coeficiente. Os resultados experimentais apresentaram valores de E_t e E_n conforme a faixa de valores determinados a partir das propriedades físicas da corrente. Utilizando valores de $E_t=8,0$ e $E_n=2,5$ as forças verificadas a partir dos cálculos apresentados no capítulo 4 deste trabalho concordaram com as forças medidas no ensaio experimental. A seguir são apresentados nas Figuras 14 e 15 os valores de θ e T verificados no ensaio experimental (foram calculados com base nos valores das forças horizontais e verticais lidas no ensaio) e calculados através do modelo analítico proposto, pode-se notar a convergência entre os resultados obtidos nos dois métodos.

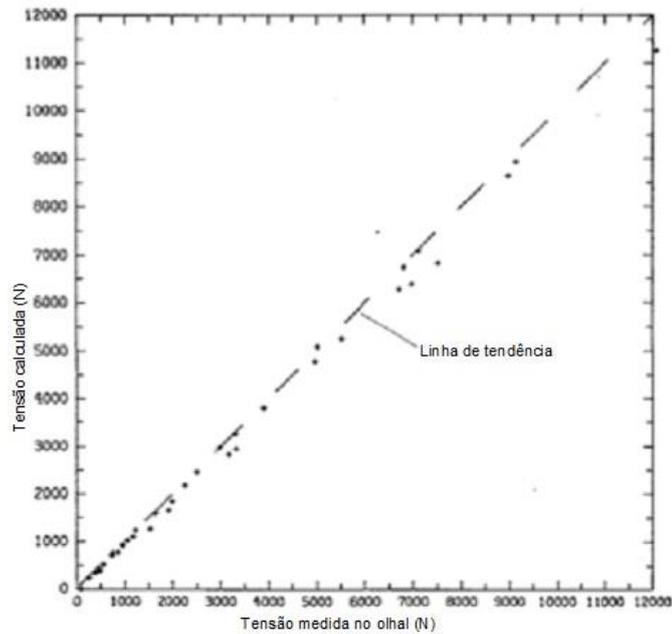


Figura 14: Tensão no olhal medida experimentalmente e calculada analiticamente (DEGENKAMP E DUTTA, 1989).

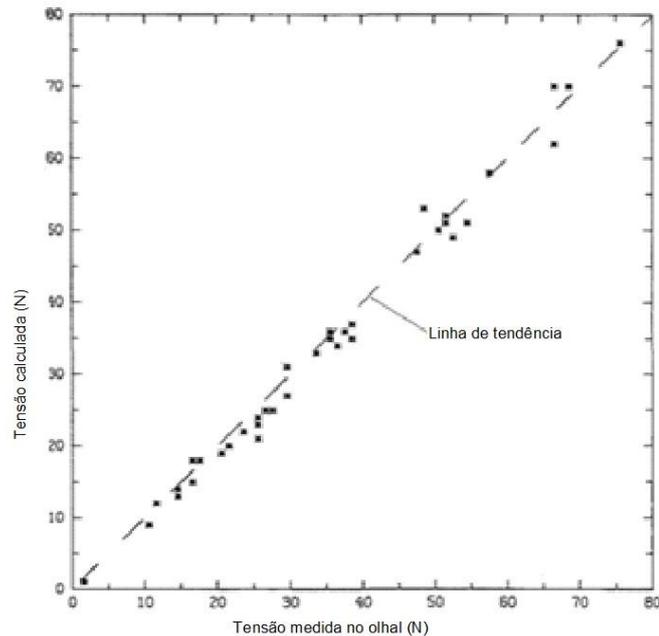


Figura 15: Ângulo no olhal medida experimentalmente e calculada analiticamente (DEGENKAMP E DUTTA, 1989).

A resistência do solo por unidade de comprimento na direção normal a corrente apresentou valores entre $(15,2d \text{ e } 22,8d) \times S_u$, resultando na média em: $q=19d \times S_u$, sendo d o diâmetro da corrente. Analisando as propriedades físicas da corrente os valores do fator de capacidade de

carga N_c apresentados por Yen and Tofani (1984) o valor de q foi determinado pelos autores como sendo um valor médio entre $(16,8d)S_u$ e $(28,7d)S_u$, resultando em $q=(24d)S_u$, isso quando analisado em um solo com características semelhantes as do solo utilizado por Degenkamp e Dutta (1989). Os valores obtidos nos dois trabalhos apresentaram valores semelhantes, sendo eventuais diferenças consequência do fato de Yen and Tofani (1984) utilizarem um solo siltoso, o qual pode não seguir exatamente as formulações obtidas para solos argilosos.

Degenkamp e Dutta (1989) consideraram o fator de capacidade de carga N_c como sendo 7,6 baseados no estudo de Skempton (1951). No entanto os autores afirmam que na literatura é comum encontrar o valor de 9,0 para este fator em estacas carregadas lateralmente, mas em função dos ajustes a E_n neste trabalho foi considerado o valor de 7,6 para N_c .

Já a resistência em função do atrito da corrente com o solo apresentou valores entre $(5,5d$ e $12,0d) S_u$. Yen and Tofani (1984) obtiveram valores de resistência ao atrito na faixa entre $(5,7d$ e $8,9d) \times S_u$, o que está coerente com os valores obtidos por Degenkamp e Dutta (1989). O modo de ruptura determinado analítica e experimentalmente foi semelhante, desde que seja aplicado o mesmo processo de tensionamento da corrente nos dois tipos de análise.

Com este estudos os autores buscaram desenvolver um método confiável para determinação das forças atuantes no trecho enterrado da linhas de ancoragem, verificando assim os parâmetros que regem a atenuação. Com base nestes estudos podemos verificar que a atenuação é resultado da combinação entre o tipo de corrente utilizada e a resistência do solo.

No que diz respeito às características da corrente na atenuação Kim (2005) afirma que o peso dela não tem um papel importante quando inserida em solos mais resistentes, mas apresenta papel importante em solos moles, como os encontrados próximo ao leito marinho.

A determinação das forças atuantes no trecho enterrado da linha de ancoragem são de grande importância para o dimensionamento da ancoragem, pois uma vez que as determinados é possível prever a carga que irá atuar de fato na âncora, podendo gerar uma economia significativa no processo de extração de petróleo.

2.4 PROFUNDIDADE DE CRAVAÇÃO DE ESTACA TORPEDO

Para o estudo do trecho enterrado da linha de ancoragem é importante a correta determinação da profundidade de cravação da estaca torpedo. Para os estudos realizados neste trabalho a profundidade de cravação foi determinada através do software Projétil e neste item serão apresentados os fatores determinantes na cravação das estacas utilizados pelo software.

Segundo Costa (2008) a cravação de uma estaca torpedo deve ser determinada visando obter capacidade de carga suficiente para ancorar o sistema flutuante acoplado nela. Com base em recomendações de autores de modelos empíricos e modificando as formulações clássicas (TRUE, 1976) foi desenvolvido um modelo de penetração para âncoras de placa em solos coesivos sob condição não drenada. Este modelo se baseia na segunda lei de Newton.

$$M' \cdot \frac{dv}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = W_b - F_1 - F_2 - F_3 \quad \text{Equação 07}$$

onde:

M' = massa efetiva

W_b = peso submerso

v = velocidade do projétil

z = profundidade

t = tempo

F_1 = força inercial de arrasto

F_2 = resistência de ponta

F_3 = força de atrito lateral

Para solo coesivos a equação apresentada acima é resolvida por diferenças finitas, resultando em:

$$v_{i+1} = v_{i+1} + \frac{2\Delta z}{v_i(M + 2\rho_i V)} \left((W - V\gamma_i) - \left(\frac{1}{2} v_i^2 A_f C_d \rho_i \right) \right. \\ \left. - S_{ui} \left(A_f N_c + \frac{A_s \delta}{S_{ti}} \right) \left(\frac{S_e}{1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{C_e v_i}{S_{ui} d} + 0,06}}} \right) \right) \quad \text{Equação 08}$$

sendo:

M = massa da estaca

V = volume da estaca

W = peso da estaca

ρ = densidade do solo

γ = peso específico do solo

A_f = área frontal da estaca

C_d = coeficiente de arrasto

S_u = resistência não-drenada no topo e no fundo da camada de solo

N_c = fator de capacidade de carga

A_s = área lateral da estaca

d = diâmetro da estaca

δ = fator de adesão lateral

S_{ti} = perda de resistência ao cisalhamento das argilas quando amolgadas

S_e = taxa de deformação empírica máxima do solo

C_e = coeficiente de deformação empírico do solo

No primeiro passo adota-se $v_1=v_0$ e sem obtem o v_2 , em seguida é feito novo cálculo para obtenção de v_1 a partir da média entre v_0 e v_2 (COSTA, 2008).

Foi então proposto um método baseado em modelos visco-elásticos juntamente com o modelo sugerido por True (1976) , o qual simula a interação estaca-solo. Esse método foi utilizado para desenvolvimento de programas computacionais próprios para analisar a penetrabilidade de estacas torpedo.

3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados a metodologia para construção da câmara de ensaios, os materiais e os resultados obtidos experimentalmente no Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais (LEGG) da UFRGS por Rocha (2014).

Em um primeiro momento será apresentado o estudo de caso feito por Rocha (2014), em seguida os processos de análise dimensional e semelhança que resultaram nas dimensões e características dos materiais utilizados. Logo são apresentados os materiais utilizados e por fim são discutidos os resultados obtidos pela autora, os quais serão discretizados numericamente neste trabalho. Em resumo, as informações extraídas da dissertação de Rocha (2014) são necessárias às análises desta pesquisa e, por este motivo, são discutidas neste capítulo.

3.1 ESTUDO DE CASO

As avaliações de Rocha (2014) para construção do modelo reduzido foram baseadas no projeto da Plataforma FPSO Cidade de Angra dos Reis, de propriedade da Petrobrás. A unidade estudada trata-se de um navio ancorado (FPSO), operando em uma lâmina d'água de 2135m e o seu sistema de ancoragem apresenta 24 linhas em configuração *taut-leg*. Os dados desta plataforma foram lançados no software DIGIN, desenvolvido pela Det Norske Veritas (DNV) e cedido pela Petrobrás, a fim de se obter uma previsão do comportamento da linha de ancoragem quando submetida a diferentes níveis de tração, mantendo-se o comprimento total da mesma.

Segundo Rocha (2014), baseada em ensaios de campo e laboratório fornecidos pela Petrobrás, o solo da região de ancoragem caracteriza-se pela presença de argila normalmente adensada ao longo da profundidade e com boa homogeneidade. O perfil da resistência não drenada deste solo apresentou um crescimento linear ao longo da profundidade, seguindo a Equação 09 e na Figura 16 pode-se analisar o comportamento de S_u ao longo da profundidade.

$$S_u = 1,4 \cdot z \quad \text{Equação 09}$$

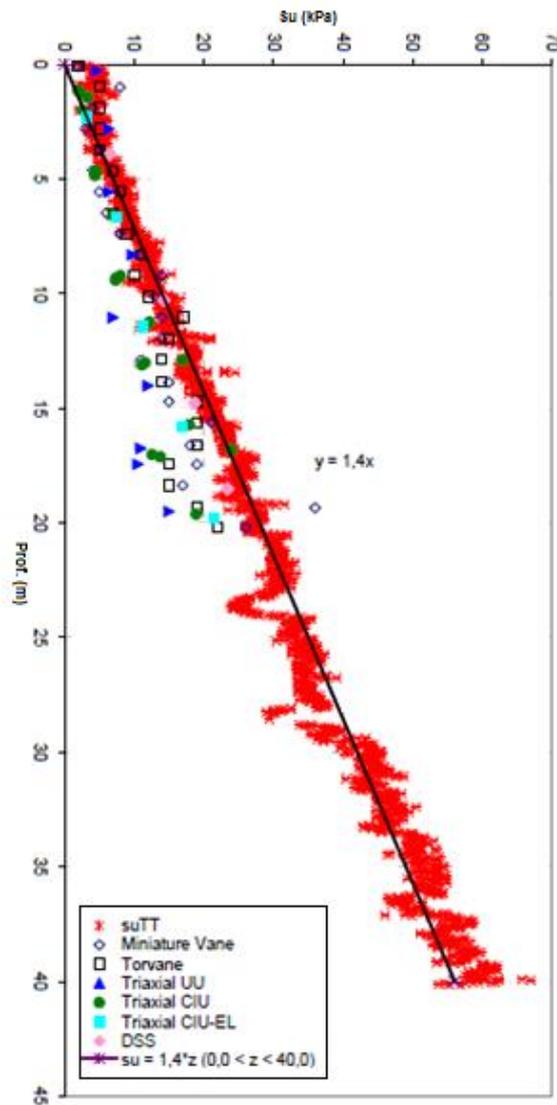


Figura 16: Resultados de ensaios de campo e laboratório realizados na Bacia de Santos (adaptado de TECHNICAL REPORT, 2010).

A fim de simplificar as análises Rocha (2014) considerou as 24 linhas de ancoragem com comprimentos e propriedades idênticas, sendo considerada apenas uma linha de 3326m de comprimento para o estudo de caso. Na tabela 02 podem ser identificadas as propriedades de cada segmento da linha de ancoragem analisada. Na Figura 17 é apresentado um esquema ilustrando a configuração da linha de ancoragem estudada.

Tabela 02 – Propriedades Físicas e Geométricas das linhas de Ancoragem. (ROCHA, 2014)

LINHA ANCORAGEM							
Segmento	Material	Diâmetro nominal (mm)	Comprimento (m)	EA (kN)	MBL (kN)	Peso no ar (kN/m)	Peso na água (kN/m)
Amarra de Topo	R4 Studless Chain	120	140	854427	13573	2,8253	2,458
intermediário	Cabo de Poliéster	206	2636,46	183210	12263	0,2737	0,072
Amarra de Fundo	R4 Studless Chain	120	550	854427	13573	2,8253	2,458

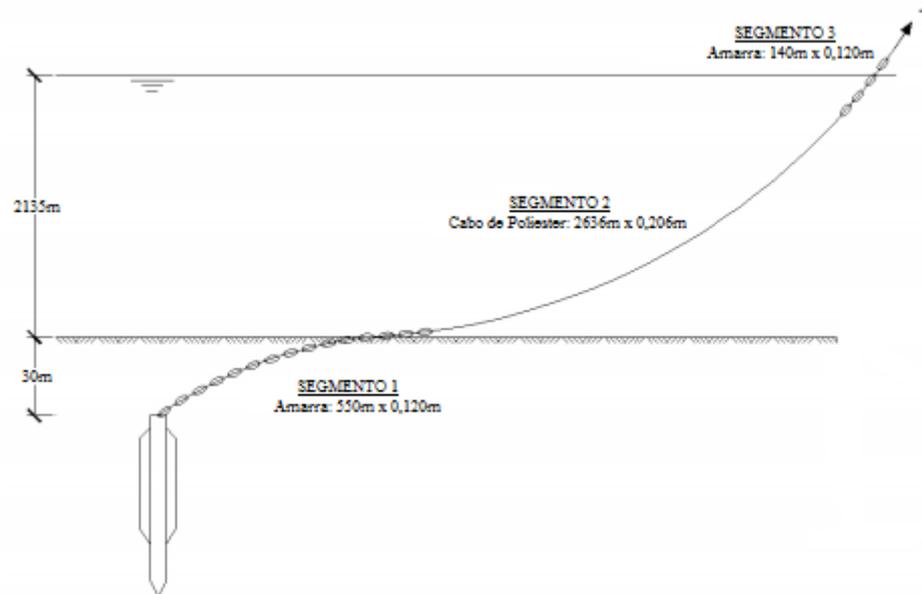


Figura 17: Esquema ilustrativo da linha de ancoragem analisada. (ROCHA, 2014).

A fixação da ancoragem foi considerada como sendo estaca torpedo, denominada T-120, cujo peso ao ar é de 120 toneladas e com comprimento de 22,1m. A profundidade da cravação da estaca foi calculada por meio do programa PROJÉTIL, baseado no modelo analítico proposto por True (1976), resultando em uma penetração de 28,8m.

Em posse da profundidade de cravação e do tipo de fixação a ser utilizada foi determinado através do software DIGIN a configuração da linha de ancoragem, o qual, segundo Rocha (2014) fornece as coordenadas dos pontos discretizados, os ângulos referentes às inclinações da linha de ancoragem com relação à horizontal e a variação das forças ao longo da linha de ancoragem. No capítulo 4 deste trabalho são descritos de maneira detalhada os métodos de cálculo utilizados no DIGIN.

Rocha (2014) realizou análises no DIGIN para forças variando de 3000kN a 7000kN no leito marinho, conforme apresentado no espectro de cargas na Figura 18. Para o ensaio experimental, Rocha (2014) optou por utilizar carga máxima de 14 kgf, equivalente a 9000kN para verificar o comportamento da corrente quando submetida a um nível maior de carregamento.

Os resultados obtidos por Rocha (2014) nas análises realizadas no DIGIN são apresentados a seguir.

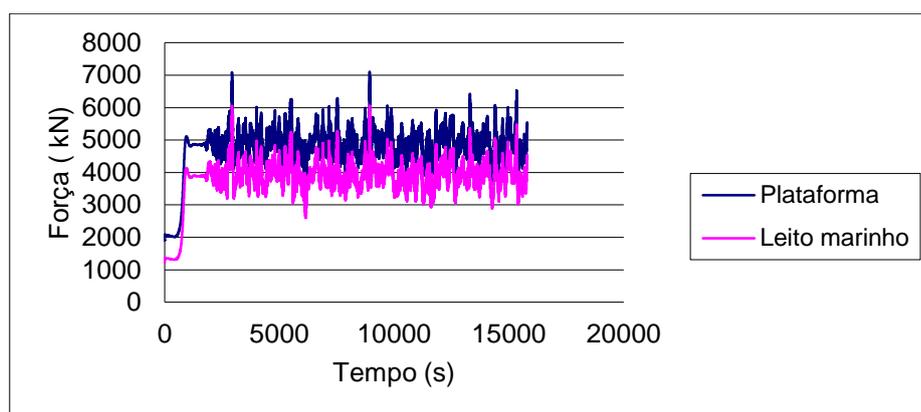


Figura 18: Espectro de cargas aplicadas (ROCHA, 2014).

Na Tabela 03 é apresentado um resumo dos resultados fornecidos pelo programa, onde a autora observou a dissipação de carga de tração varia entre 11,1% a 25,8% no trecho da linha de ancoragem submerso e 0,7% a 2,2% no trecho enterrado.

Tabela 03 – Tabela resumo dos resultados fornecidos pelo DIGIN (ROCHA, 2014).

Fairlead		Leito			Âncora			Comprimento (m)		
Tração (kN)	Inclinação (°)	Tração (kN)	Inclinação (°)	Redução da tração (%)	Tração (kN)	Inclinação (°)	Redução da tração (%)	Suspensão	Leito	Embutido
4045	47,1	3000	23,5	25,8	2935	79,3	2,2	3290	0	47
5075	45,8	4000	27,8	21,2	3935	70,3	1,6	3292	0	46
6093	45,0	5000	30,4	17,9	4935	64,2	1,3	3293	0	45
7105	44,4	6000	32,1	15,6	5935	61,0	1,1	3294	0	45
8113	43,9	7000	33,4	13,7	6935	57,9	0,9	3294	0	45
9120	43,6	8000	34,3	12,3	7935	56,1	0,8	3295	0	44
10125	43,3	9000	35,0	11,1	8935	54,5	0,7	3295	0	44

Nos gráficos apresentados a seguir, Rocha (2014) plotou os resultados obtidos, sendo que na Figura 19 está apresentada a geometria da linha de ancoragem para as diferentes cargas

aplicadas, na Figura 20 pode-se observar a geometria da linha de ancoragem no trecho próximo a plataforma e por fim na Figura 21 a configuração do trecho enterrado da linha de ancoragem.

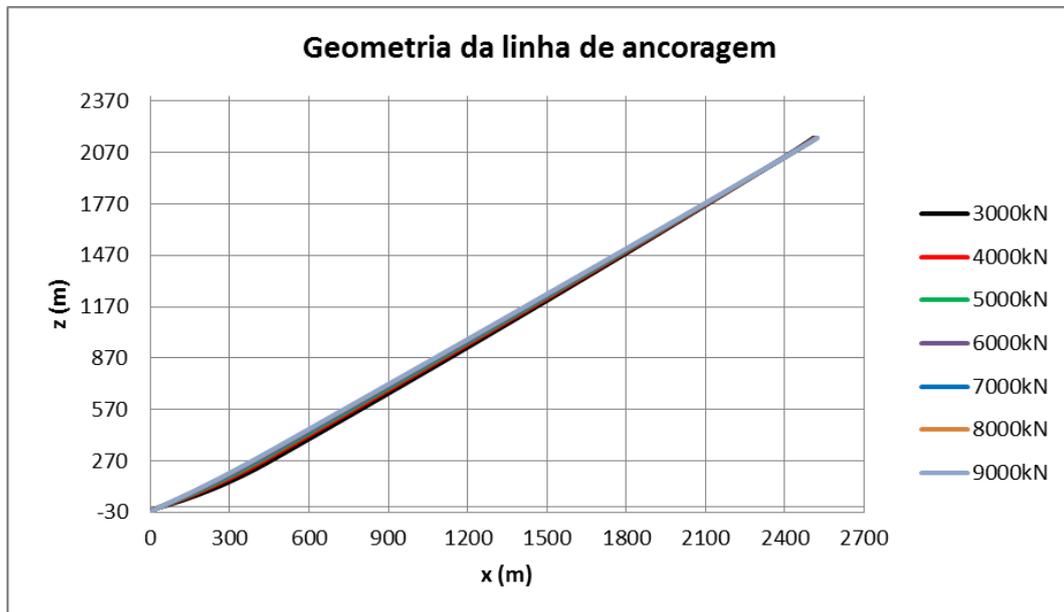


Figura 19: Geometria da linha de ancoragem (ROCHA, 2014).

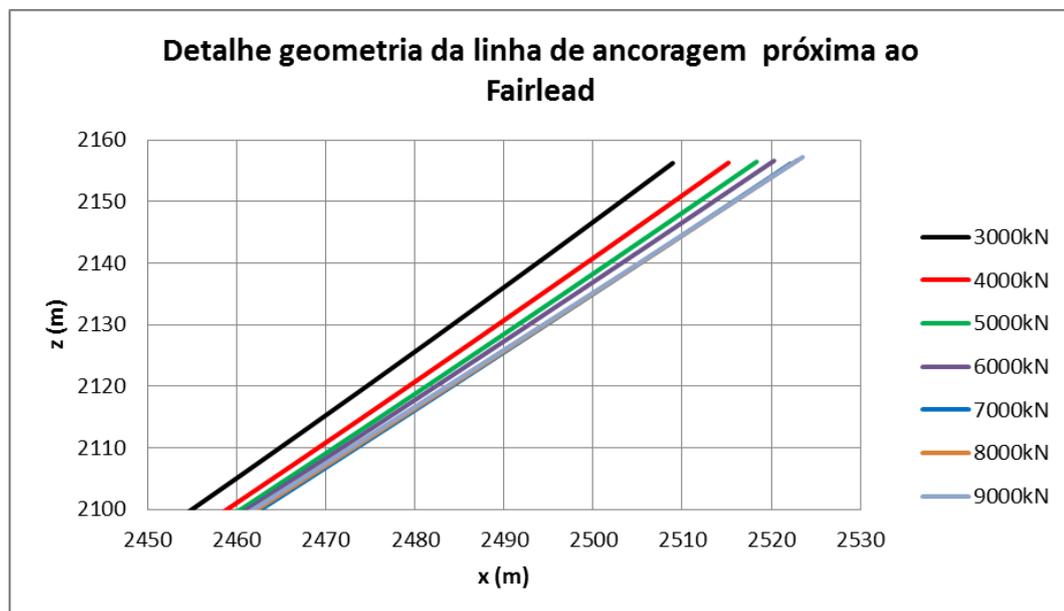


Figura 20: Geometria da linha de ancoragem próxima ao *fairlead* (ROCHA, 2014).

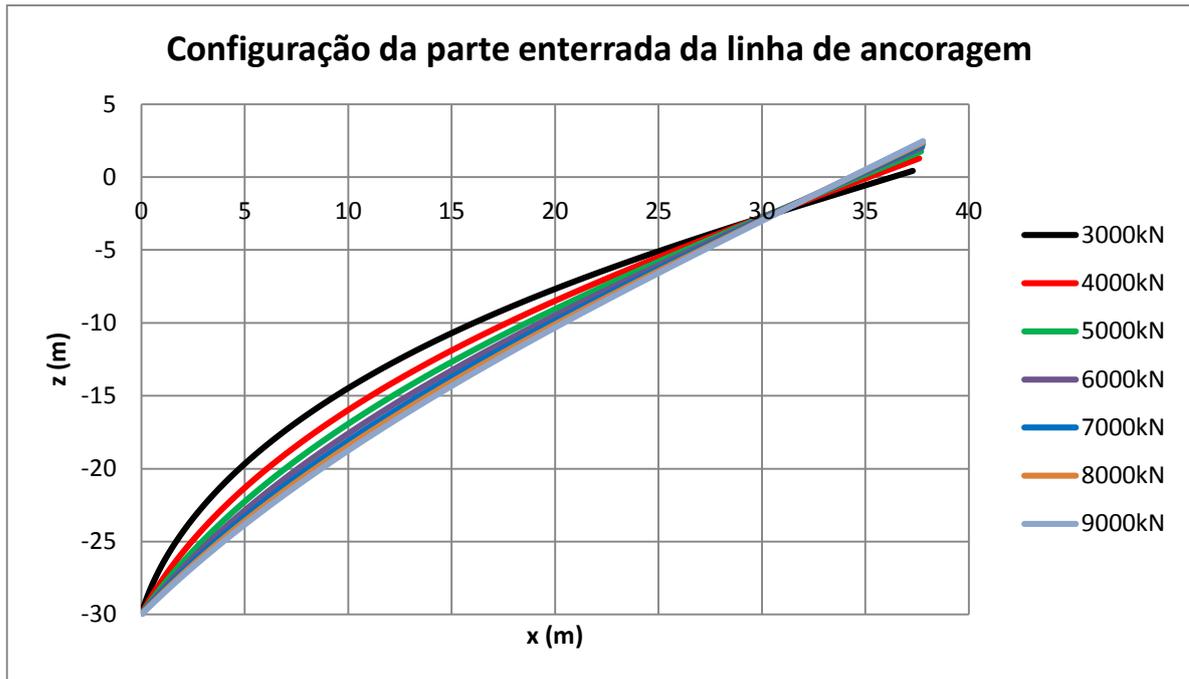


Figura 21: Geometria da linha de ancoragem no trecho enterrado(ROCHA, 2014).

Rocha (2014) apresenta ainda um gráfico onde relaciona a variação de tração em função da profundidade. Segundo a autora é observada uma diferença de comportamento da amarra de topo e do trecho compostos por poliéster em função do peso dos diferentes materiais. Esta relação está apresentada na Figura 22.

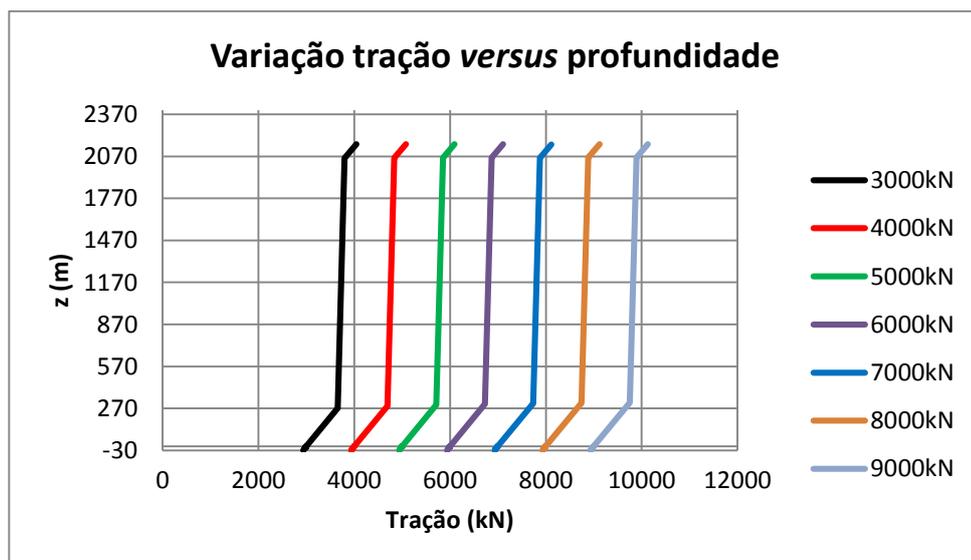


Figura 22: Variação da tração ao longo da profundidade (ROCHA, 2014).

3.2 ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA

Carneiro (1996) afirma que sendo dois processos físicos semelhantes é possível prever o comportamento de um deles quando é conhecido o comportamento do outro. Em processos experimentais através de modelos reduzidos os dois processos físicos semelhantes são o protótipo e o modelo, sendo o modelo reduzido mais fácil de ser ensaiado em laboratório.

Saramago (2002) cita que para se trabalhar com modelos é necessário determinar as condições de semelhança, as quais podem ser obtidas através de equações diferenciais que regem o fenômeno e pelas condições de contorno.

Toda grandeza física pode ser obtida através de grandezas fundamentais a partir de uma expressão que define a grandeza estudada a partir de outras já conhecidas. Através dessa ferramenta é possível simplificar um problema através da redução do número de variáveis para o equacionamento de um fenômeno físico. Segundo Carneiro (1996) a análise dimensional é baseada no Teorema de Π ou Vaschy-Bucknghan, onde toda relação homogênea abrangendo n parâmetros dimensionais pode ser substituída por outra contendo $(n-r)$ parâmetros adimensionais, que são produtos de potências dos n parâmetros originais, denominados números Π . Com isso é possível reduzir o número total de parâmetros de n para $(n-r)$, onde r , conhecido como posto da matriz dimensional, é o número de parâmetros cujas unidades podem gerar uma nova base de unidades fundamentais. Este fato torna a análise dimensional particularmente útil na interpretação de resultados experimentais e na elaboração de estudos paramétricos, principalmente quando o fenômeno estudado envolver muitas variáveis.

Para tal análise torna-se necessário em um primeiro momento definir as grandezas fundamentais, as quais servirão como base para que se escrever outras grandezas. As grandezas fundamentais utilizadas no trabalho apresentado por Rocha (2014) foram as sugeridas por Carneiro (1996) e estão apresentadas na Tabela 04.

Tabela 04 – Grandezas fundamentais (CARNEIRO, 1996).

Grandeza Fundamental (sistema SI)	Símbolos Usuais	Símbolos nas Fórmulas Dimensionais	Unidades SI
1) Comprimento	l,L	L	metro (m)
2) Massa	m,M	M	quilograma (kg)
3) Tempo	t,T	T	segundo (s)
4) Corrente elétrica	i,I	I	Ampère (A)
5) Temperatura Termodinâmica	T,θ	θ	Kelvin (K)
6) Intensidade Luminosa	I,I _v	I _v	Candela (cd)
7) Quantidade de Substância	n	mol, N	mol (mol)

A metodologia para o cálculo da escala de grandezas derivadas é semelhante a um cálculo de troca de unidades, onde é feita a substituição de três grandezas fundamentais por três grandezas de base escolhidas conforme o fenômeno que está sendo analisado. No trabalho de Rocha (2014) é feita uma larga discussão sobre os procedimentos de cálculo utilizados pela autora, sendo aqui apresentado apenas um resumo do procedimento de análise dimensional aplicada ao caso típico.

As grandezas fundamentais do sistema de unidades relevantes ao fenômenos mecânicos da geotecnia são comprimento, massa e tempo e, segundo a Análise Dimensional apresentada por Carneiro (1996), isso implica em três grandezas derivadas a serem pré-estabelecidas, a partir das quais serão determinadas as demais. O sistema de escala escolhido por Rocha (2014) foi semelhante ao número de Froude, baseado na preservação da relação entre forças gravitacionais e inerciais. A fim de minimizar erros e dispersão de resultados em função de escalas muito reduzidas ou à limitação do espaço físico disponível, determinou-se um fator de escala de comprimento do modelo de 1:40. A Tabela 05 mostra as relações entre as grandezas de interesse do projeto em estudo.

Tabela 05 – Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio de tração axial da linha de ancoragem (ROCHA 2014).

Grandezas de base	Símbolo	Unidade	\mathcal{L}	\mathcal{M}	\mathcal{T}	Inversão			Escala	Escala Inv.
Comprimento	\mathcal{L}	m	1	0	0	1	0	0	2,500E-02	40
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	3	1	0	1,000E+00	1
Aceleração (da gravidade)	g	m/s ²	1	0	-2	0,5	0	-0,5	1,000E+00	1
Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	\mathcal{L}	m	t	\mathcal{L}	ρ	g	Escala	Escala Inv.
Comprimento	\mathcal{L}	m	1	0	0	1	0	0	2,500E-02	40
Massa	\mathcal{M}	kg	0	1	0	3	1	0	1,563E-05	64000
Tempo	\mathcal{T}	s	0	0	1	0,5	0	-0,5	1,581E-01	6,32
Frequência	f	Hz	0	0	-1	-0,5	0	0,5	6,325E+00	0,16
Aceleração (da gravidade)	g	m/s ²	1	0	-2	0	0	1	1,000E+00	1
Velocidade	v	m/s	1	0	-1	0,5	0	0,5	1,581E-01	6,32
Vazão	Q	m ³ /s	3	0	-1	2,5	0	0,5	9,882E-05	10119
Viscosidade cinemática	ν	m ² /s	2	0	-1	1,5	0	0,5	3,953E-03	253
Força	\mathcal{F}	N	1	1	-2	3	1	1	1,563E-05	64000
Momento	\mathcal{M}	Nm	2	1	-2	4	1	1	3,906E-07	2560000
Rigidez axial	k	N/m	0	1	-2	2	1	1	6,250E-04	1600
Tensão (pressão, módulos, coesão, etc.)	σ	Pa	-1	1	-2	1	1	1	2,500E-02	40
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	0	1	0	1,000E+00	1
Viscosidade dinâmica	μ	kg/m/s	-1	1	-1	1,5	1	0,5	3,953E-03	253
Área	\mathcal{A}	m ²	2	0	0	2	0	0	6,250E-04	1600
Volume	\mathcal{V}	m ³	3	0	0	3	0	0	1,563E-05	64000
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0	4	0	0	3,906E-07	2560000

A linha de ancoragem do protótipo é formada por elos soldados com 120mm de diâmetro, o que resultou, em função da análise dimensional, em uma amarra com elos soldados de 3mm de diâmetro para o modelo.

As dimensões do tanque foram determinadas em função da profundidade de cravação calculada no software Projétil por Rocha (2014) e obedeceram a escala de comprimento, resultando em dimensões externas de 155cm de comprimento, 27cm de largura e 82cm de altura, sendo o seu projeto descrito posteriormente.

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

3.3.1 Solo em estudo

O solo utilizado neste trabalho foi elaborado com o objetivo de reproduzir as propriedades físicas encontradas no leito marinho da Bacia de Campos, a qual possui seu comportamento conduzido pela Equação 09 apresentada no item 3.1 deste trabalho. O material resultou em uma mistura de caulim e bentonita, 90% e 10% respectivamente e aproximadamente 110% de água.

Foram realizados diversos ensaios a fim de se determinar com propriedade as características do material utilizado nos ensaios experimentais realizados no Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais para o projeto Petrobrás.

Gauer (2010) realizou uma série de ensaios de palheta, Stracke (2012) realizou uma nova série de ensaios de mini palheta analisando a variação da resistência não drenada ao longo da profundidade da camada de solo ao longo de uma altura de 45cm e altura de 70cm. Através de ensaios de mini-palheta foram estimados valores de S_u para as duas argilas (100% e 120% de umidade). Foi feito um ajuste por meio de *spline* no software Matlab a fim de determinar uma tendência de S_u ao longo da profundidade, estes ajustes estão apresentados nas Figuras 23 a 26, para as argilas A e B respectivamente..

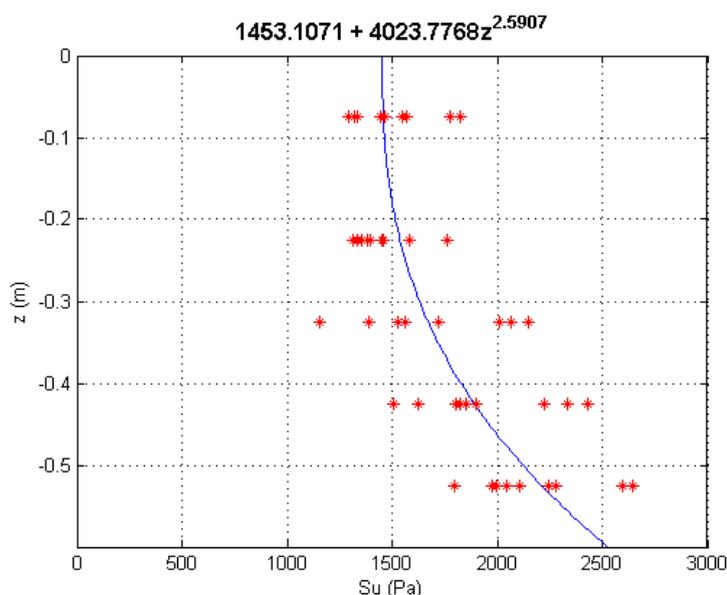


Figura 23: Resultados experimentais, através de ensaio com mini-palheta, da resistência ao cisalhamento da argila "A" (100% de umidade).

O ajuste dos resultados para a argila A ($w=100\%$) resultou em um comportamento regido pela equação exponencial (Equação 10) apresentada abaixo.

$$S_u = 1453,10 + 4023,77 \cdot z^{2,59} \quad \text{Equação 10}$$

Em seguida foi feito um ajuste a fim de linearizar a spline obtida através do Matlab, o gráfico obtido é apresentado na Figura 24.

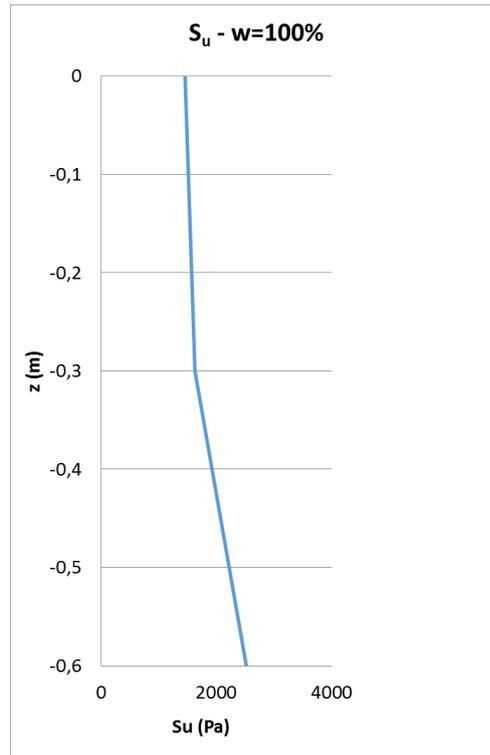


Figura 24: Ajuste linear dos resultados experimentais, através de ensaio com mini-palheta, da resistência ao cisalhamento da argila "A" (100% de umidade).

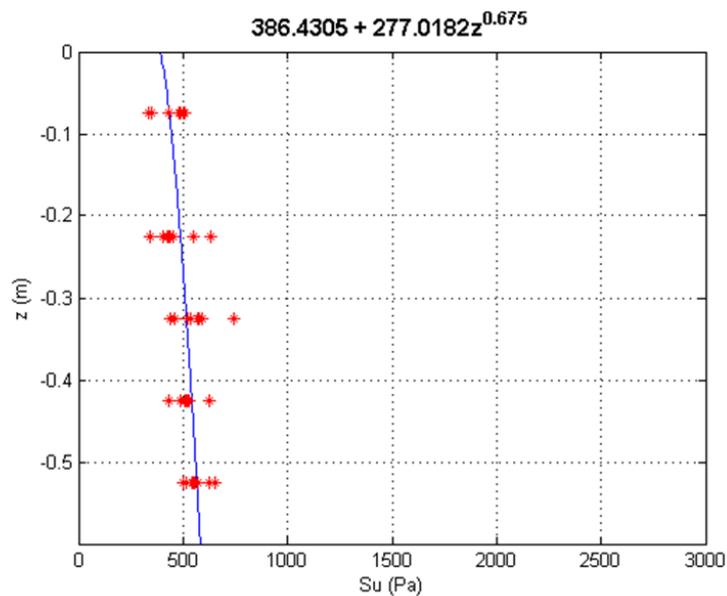


Figura 25: Resultados experimentais, através de ensaio com mini-palheta, da resistência ao cisalhamento da argila "B" (120% de umidade).

Assim como o ajuste dos resultados para a argila A o ajuste para a argila B ($w=120\%$) resultou em um comportamento orientado por uma equação exponencial (Equação 11), a qual é apresentada abaixo.

$$S_u = 386,43 + 277,02 \cdot z^{0,675} \quad \text{Equação 11}$$

A exemplo do que foi feito com os resultados da argila A, foi feito um ajuste a fim de linearizar a spline obtida através do Matlab para a argila B, o gráfico obtido é apresentado na Figura 26.

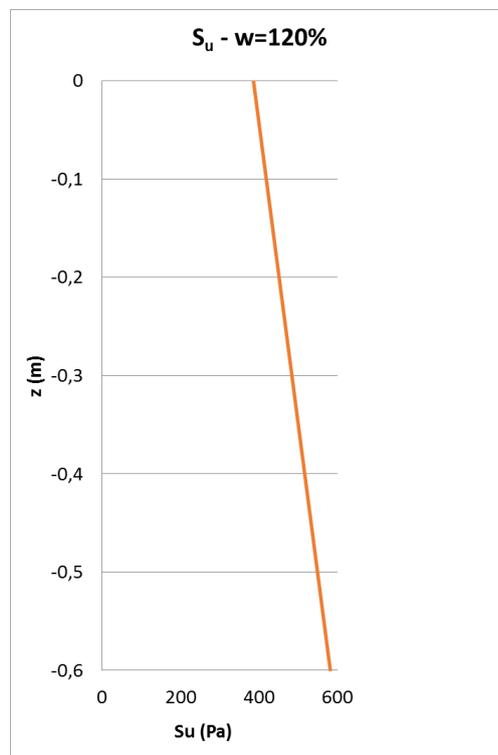


Figura 26: Ajuste linear dos resultados experimentais, através de ensaio com mini-palhetas, da resistência ao cisalhamento da argila "B" (120% de umidade).

Em função das limitações do software DIGIN foi necessário transformar os dados obtidos nos ensaios experimentais de S_u versus profundidade para escala real, esta transformação foi feita por meio de similaridade obtendo-se o S_u equivalente para situação real.

$$\lambda_\sigma = \frac{\lambda_F}{\lambda_A} \quad \text{Equação 12}$$

sendo:

λ_σ =escala de tensão

λ_F =escala de força

λ_A =escala de área

Pela análise dimensional realizada nos ensaios experimentais por Rocha (2014) temos:

$$\lambda_F = 1: 64000$$

$$\lambda_A = 1: 1600$$

logo:

$$\lambda_\sigma = 1: 40$$

A resistência não-drenada do protótipo pode ser descrita por:

$$(S_{ui})_{prot} = \frac{[(S_{ui})_{modelo} \cdot \pi \varphi_{mod} \cdot \Delta L_i] \times \lambda_F}{(\pi \varphi_{prot} \cdot \Delta L_i)_{prot}} \quad \text{Equação 13}$$

onde:

φ_{mod} =diâmetro da amarra do modelo (120mm)

φ_{prot} =diâmetro da amarra do protótipo (480mm)

ΔL_i =comprimento do segmento de amarra analisado

Na Tabela 06 são apresentados os resultados de S_u em escala real.

Tabela 06 – Determinação de Su em escala real para argila A (w=100%).

Modelo		Protótipo	
z _i	Su _i (Pa)	z _i	Su _i (kPa)
0,00	1453,11	0,00	58,12
-0,05	1454,90	-2,00	58,20
-0,10	1463,51	-4,00	58,54
-0,15	1482,71	-6,00	59,31
-0,20	1515,39	-8,00	60,62
-0,25	1564,07	-10,00	62,56
-0,30	1631,02	-12,00	65,24
-0,35	1718,31	-14,00	68,73
-0,40	1827,89	-16,00	73,12
-0,45	1961,59	-18,00	78,46
-0,50	2121,15	-20,00	84,85
-0,55	2308,24	-22,00	92,33
-0,60	2524,44	-24,00	100,98
-0,65	2771,29	-26,00	110,85
-0,70	3050,28	-28,00	122,01
-0,75	3362,84	-30,00	134,51

O mesmo procedimento foi aplicado para a argila B (w=120%). Os resultados obtidos para a resistência não drenada desta argila em escala real são apresentados na Tabela 07.

Tabela 07 – Determinação de Su em escala real para argila B(w=120%).

Modelo		Protótipo	
z _i	Su _i (Pa)	z _i	Su _i (kPa)
0	386,43	0	15,46
-0,05	423,10	-2	16,92
-0,1	444,98	-4	17,80
-0,15	463,41	-6	18,54
-0,2	479,91	-8	19,20
-0,25	495,10	-10	19,80
-0,3	509,33	-12	20,37
-0,35	522,81	-14	20,91
-0,4	535,68	-16	21,43
-0,45	548,03	-18	21,92
-0,5	559,94	-20	22,40
-0,55	571,47	-22	22,86
-0,6	582,66	-24	23,31
-0,65	593,55	-26	23,74
-0,7	604,18	-28	24,17
-0,75	614,56	-30	24,58

Assim como nos ensaios realizados na Bacia de Campos, cujos resultados foram apresentados na Figura 16, tanto a argila A quanto B apresentam um crescimento de resistência ao longo da profundidade. Na Figura 27 é apresentada uma comparação entre os perfis de S_u ao longo da profundidade para as argilas utilizadas nos ensaios experimentais e a argila da Bacia de Campos.

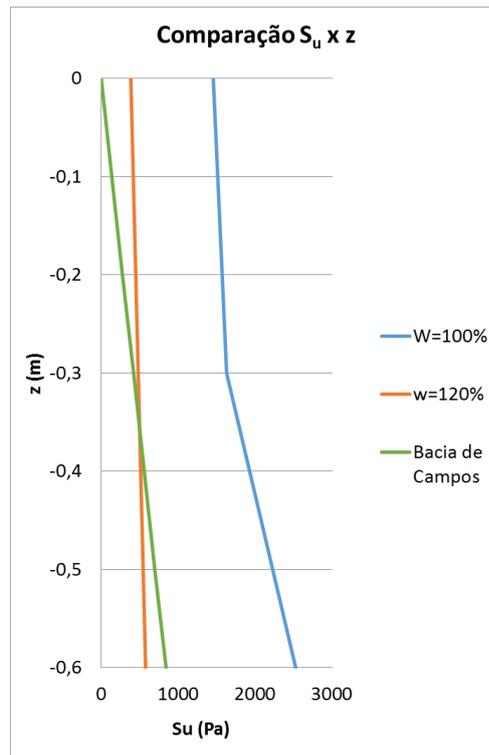


Figura 27: Comparação entre resistências das argilas experimentais e da Bacia de Campos.

Analisando o comportamento dos três materiais ao longo da profundidade verifica-se que a resistência da argila B ($W=120\%$) é a que mais se aproxima daquela verificada na Bacia de Campos. Serão estudadas as duas argilas preparadas em laboratório a fim de simular além de situações similares a da Bacia de Campos situações com um leito marinho mais resistente.

3.3.2 Equipamento utilizado no Ensaio de Carregamento Estático

A Figura 28 apresenta o equipamento desenvolvido por Rocha (2014) para realização dos ensaios em escala reduzida, sendo composto por um tanque de acrílico, amarra, cabo de aço, cabo kevlar, moitões, suporte para pesos e estrutura metálica.

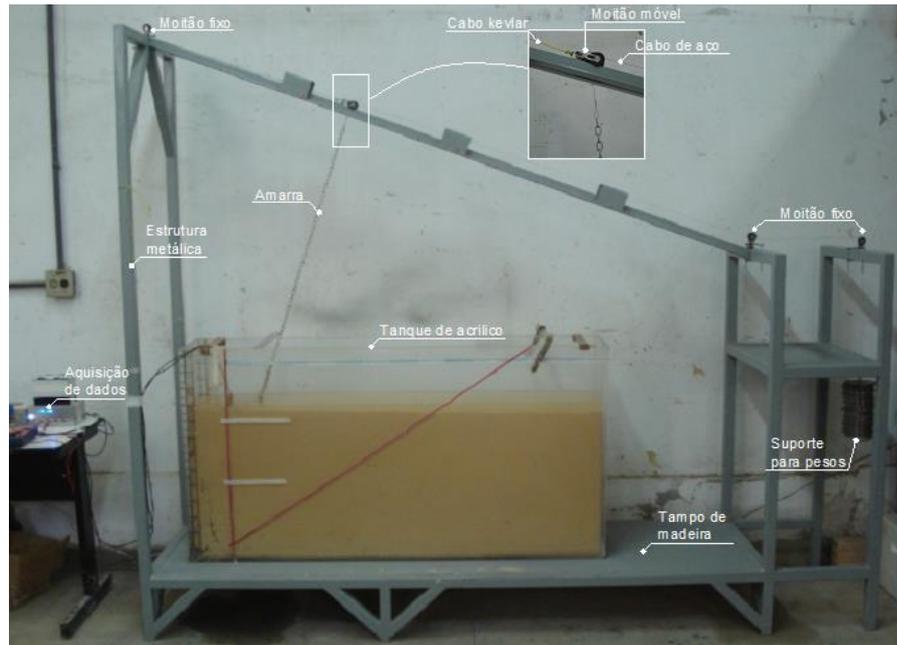


Figura 28: Conjunto de equipamentos utilizados por Rocha (2014) nos ensaios de carregamento estático.

O tanque de acrílico foi construído com chapas de acrílico de 1,5cm de espessura e dimensões externas de: 155cm de comprimento, 27cm de largura e 82cm de altura.

A linha de ancoragem consiste em uma amarra com elos soldados de 3mm de diâmetro e comprimento total de 170cm. Esta amarra foi fixada ao fundo do tanque de acrílico junto a uma célula de carga, simulando o olhal da estaca torpedo. A extremidade oposta da amarra foi acoplada a um cabo de aço, o qual deslizava em um sistema de moitões.

O sistema de carregamento foi apoiado em uma estrutura metálica, a qual também serviu como suporte para o tanque. O desenho esquemático desta estrutura está apresentado na Figura 29. O espaço indicado no projeto para vibrador mecânico foi deixado pensando em pesquisas futuras.

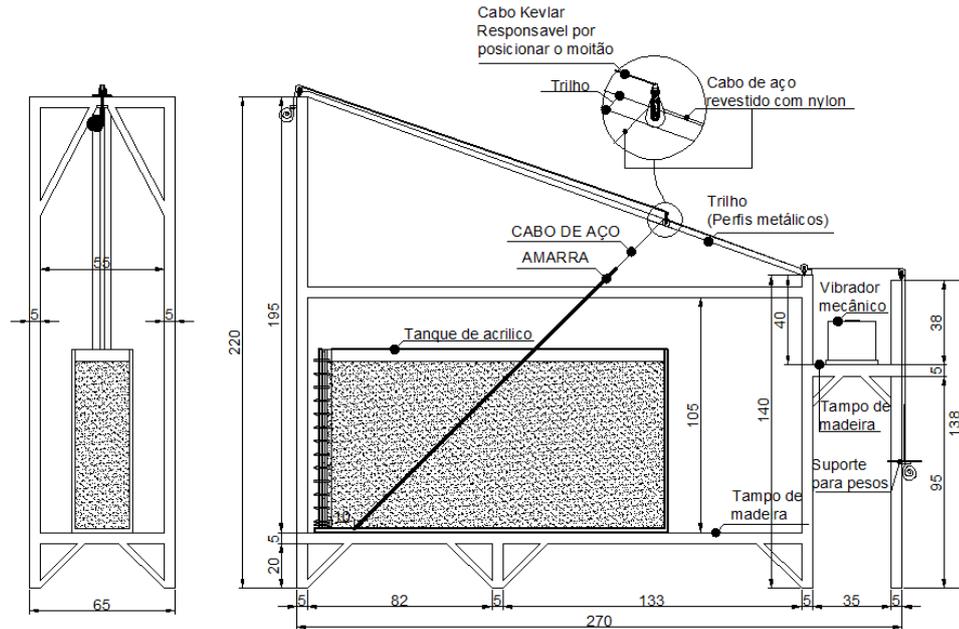


Figura 29: Projeto da estrutura metálica (ROCHA, 2014).

O sistema de carregamento estático desenvolvido por Rocha (2014) é composto por três moitões fixos suspensos na estrutura metálica da mesa que suporta o tanque em acrílico. Um trilho inclinado, formado por perfis metálicos permitiu que um único moitão trilho deslizasse, possibilitando assim a realização do ensaio com diferentes inclinações da linha de ancoragem.

Dos três moitões fixos um deles era responsável por controlar a posição do moitão triplo e ficava na parte mais elevada do conjunto. Os outros dois faziam parte do sistema responsável pela simulação dos carregamento no leito marinho. O carregamento era simulado através da colocação de pesos na extremidade do sistema que eram colocados sobre um suporte de aço acoplado ao conjunto.

A configuração da catenária invertida no trecho enterrado foi lida através de um detector de materiais, o qual escaneava a parede do tanque identificando a localização da amarra. A profundidade máxima de medição do equipamento utilizado por Rocha (2014) era de 15cm.

A medição da tração ao longo da amarra foi feita através de uma célula de carga com extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*). A célula de carga foi instalada no piso da caixa de acrílico, ponto correspondente ao olhal onde a corrente é fixada na estaca torpedo. A célula de carga utilizada por Rocha (2014) foi projetada a fim de permitir a obtenção do ângulo de incidência da carga, através de leitura das componentes vertical e horizontal da carga. Entre

cada estágio de carga, esperou-se o período de tempo necessário para a estabilização das deformações medidas pelos extensômetros. O ensaio era finalizado ao atingir a carga de 14 kgf, que corresponde a um carregamento sob o protótipo de 9000 kN (ROCHA, 2014). As características detalhadas dos equipamentos utilizados nos ensaios podem ser encontradas no trabalho de Rocha (2014).

O sistema de medição de força no ensaio foi composto por oito extensômetros distribuídos de forma a resultar em duas pontes completas de *Wheastone*, uma para força tangencial e outra para a força normal. Ponte de *Wheastone* é um esquema de montagem de elementos elétricos que permite a medição de uma resistência elétrica desconhecida.

A aquisição de dados foi realizada através da leitura de um multímetro de precisão. A cada incremento de carga foi registrado um par de leitura de voltagem, caracterizando os esforços normal e tangencial.

3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS

O programa de ensaios realizado por Rocha (2014) consistiu em ensaios de tração com registro das curvas carga *versus* deslocamento para diferentes inclinações da linha de ancoragem. Através destes ensaios foi avaliada e quantificada a atenuação ao longo do trecho enterrado para cada situação de ensaio, verificando assim a força que deve de fato ser resistida pela estaca torpedo.

Foram realizados 5 ensaios para cada argila (argila A e argila B) descrita no capítulo anterior. Em cada ensaio foram realizados ciclos de carga e descarga em doze posições em função do ângulo de incidência com relação ao eixo vertical. Os ângulos de incidência analisados por Rocha (2014) foram: 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50° e 55°. O carregamento foi feito por incrementos de pesos de 1kg até um carregamento máximo de 14kg (aproximadamente 140N) em cada uma das posições. Assim como no carregamento o descarregamento era feito a cada 1kg.

O carregamento foi executado em estágios iguais e sucessivos e em cada estágio de carga foi mantida até a estabilização da leitura do multímetro e estabilização dos deslocamentos observados no leito. Terminada a fase de carregamento a carga máxima foi mantida por 10 minutos e em seguida era realizado o descarregamento em estágios iguais aos do carregamento.

Na Figura 30 é apresentado um desenho esquemático do tanque, indicando os diferentes posicionamentos da corrente utilizados nos ensaios.

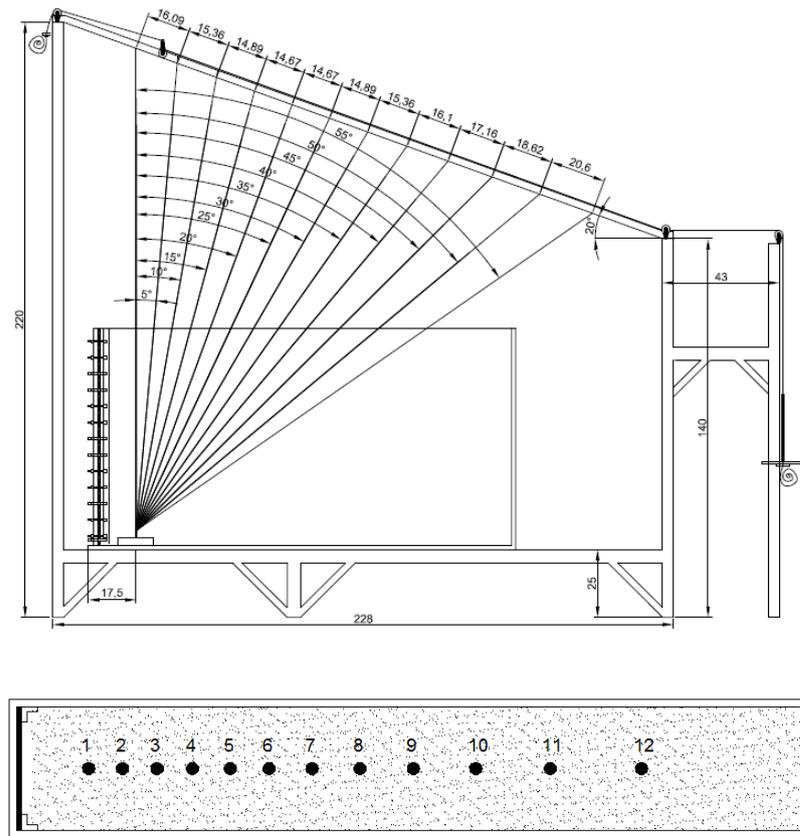


Figura 30: Indicação das posições analisadas (ROCHA, 2014).

Para a argila A os ensaios foram realizados com altura de solo de 72cm acima do topo da célula de carga. Já para a argila B foram feitos ensaio com altura de solo de 72cm, 48cm e 24cm, representando diferentes profundidades de cravação. Neste trabalho as retro análises serão feitas com os resultados obtidos nos ensaios realizados na profundidade de 72cm.

3.5 RESULTADOS OBTIDOS

3.5.1 Resultados para carregamento máximo

Em um primeiro momento Rocha (2014) apresenta a configuração da catenária invertida resultante da aplicação do carregamento para o carregamento máximo (14kg) em cada um dos ensaios. Foi verificada baixa variabilidade dos resultados obtidos, o que indicou confiabilidade aos resultados. As leituras para identificação da geometria da catenária invertida foi iniciada na posição relativa ao ângulo nominal de 15° (posição 4), em função dos pequenos deslocamentos da amarra nas posições anteriores.

Nas Figuras 31 e 32 são apresentadas as configurações da corrente no trecho enterrado referentes a média dos resultados obtidos para cada um dos ensaios realizados na argila A e B respectivamente. O gráfico relacionada a profundidade *versus* deslocamento da corrente após aplicação do carregamento máximo.

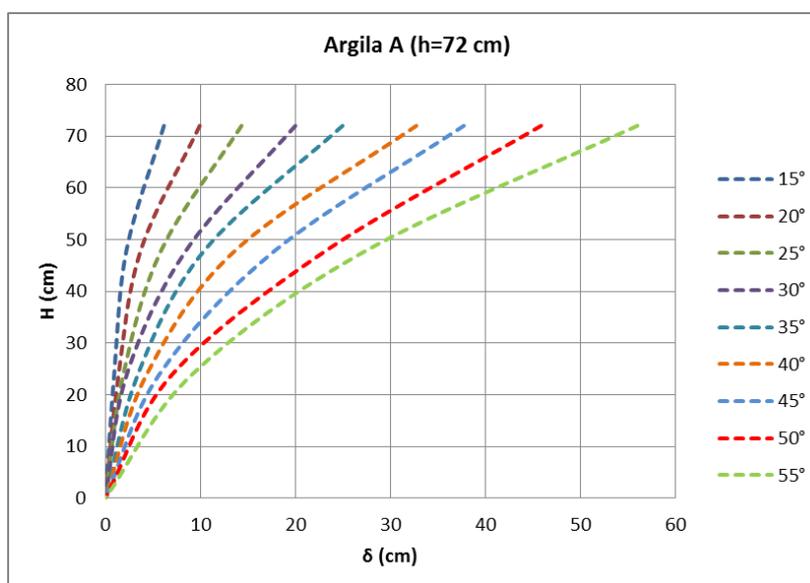


Figura 31: Configuração da catenária invertida para argila A para camada de 72cm de solo e carregamento de 14kg (ROCHA, 2014).

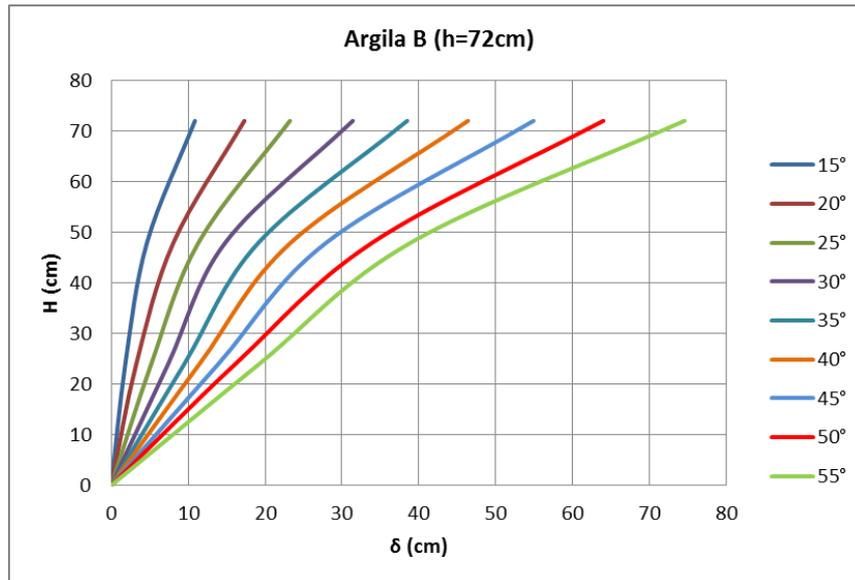


Figura 32: Configuração da catenária invertida para argila B para camada de 72cm de solo e carregamento de 14kg (ROCHA, 2014).

Rocha (2014) apresentou ainda a comparação da configuração da geométrica do trecho enterrado da linha de ancoragem com cravação em uma camada de 72cm nas argilas A e B. Esta comparação mostrou um deslocamento maior da corrente na argila B, o que é justificado em função da menor resistência dessa argila em função do maior teor de umidade. Esta comparação está apresentada graficamente na Figura 33.

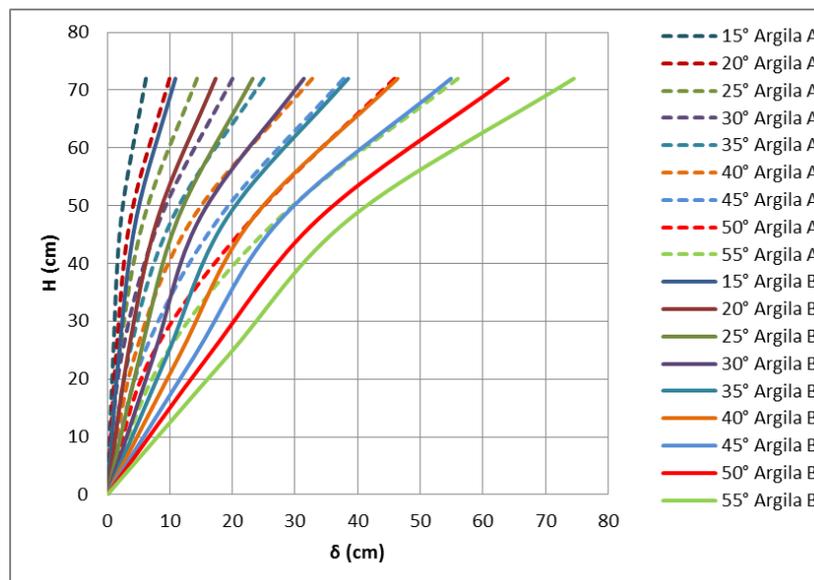


Figura 33: Comparação da configuração geométrica do trecho enterrado da linha de ancoragem nas argilas A e B para carregamento de 14kg (ROCHA, 2014).

3.5.2 Análise de atenuação de carga

Com base nos resultados obtidos Rocha (2014) concluiu que a atenuação ao longo do trecho enterrado da linha de ancoragem tem como condicionantes;

-força aplicada;

-ângulo de incidência;

-profundidade de cravação da estaca;

-comprimento e dimensões da amarra embutida no solo;

-resistência ao cisalhamento não drenada do solo.

Tais conclusões são verificadas nas análises numéricas realizadas neste trabalho.

4 METODOLOGIA UTILIZADA NA RETRO ANÁLISE

Neste capítulo serão descritas as formulações utilizadas na retro análise da catenária no trecho enterrado da linha de ancoragem. Esta teoria é a mesma utilizada pelo software DIGIN, o qual foi utilizado para simular em escala real os resultados obtidos no trabalho experimental. Este software é um subproduto da *Joint Industry Project* para o desenvolvimento de projetos de ancoragem em águas profundas. As premissas de cálculo utilizadas pelo DIGIN foram obtidas no Manual do Usuário do DIGIN, apresentado em um relatório técnico.

4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DIGIN

Este software foi desenvolvido para calcular o comportamento de ancoragens em solo argiloso. Para uma determinada tensão aplicada ele calcula o caminho de penetração da âncora bem como a profundidade de penetração da mesma. O software apresenta adicionalmente geometria, tensão ao longo da linha e direção da cravação da ancoragem.

Para cada força aplicada no topo da linha de ancoragem, o programa calcula a catenária do ponto inicial da linha até o leito marinho, a catenária invertida no trecho enterrado e o trecho intermediário ao longo do leito marinho.

O comportamento da ancoragem é analisado em um plano 2D, sendo simulada uma penetração gradual da ancoragem, onde o equilíbrio para cada incremento de profundidade é calculado independentemente do passo anterior. A direção da penetração da âncora a cada incremento de profundidade é a base para o caminho de penetração. Através deste programa é possível calcular a geometria da linha de ancoragem desde a alça até a âncora por meio de um equilíbrio de momentos de forças aplicadas em cada unidade de segmento da linha. Este programa foi validado através de retroanálises em testes instrumentados em escala real.

A seguir serão discutidos os embasamentos teóricos para o cálculo de cada um dos elementos da linha de ancoragem analisados pelo programa.

4.1.1 Solo

Os parâmetros do solo utilizados pelo programa são a resistência não-drenada indeformada (S_u) e a resistência não-drenada remoldada (S_{ur}). A resistência ao cisalhamento é determinada em alguns pontos pelo usuário e software faz uma interpolação linear para os intervalos entre os dados de entrada.

4.1.2 Linha de Ancoragem

4.1.2.1 Definição da linha de ancoragem e posição

O software permite determinar a geometria da linha de ancoragem desde seu ponto junto à plataforma até o topo da ancoragem, enterrada no leito marinho. Ao montar o modelo, a linha de ancoragem é dividida em segmentos, cada um com um comprimento determinado pelo usuário, bem como as propriedades dos materiais em cada trecho.

O segmento enterrado da linha de ancoragem é analisado considerando os eixos x e z iniciando na ponta do primeiro elemento a penetrar no solo, que então são transformados no sistema cartesiano principal.

Caso o peso da linha de ancoragem seja maior que a capacidade de carga da camada superficial do solo a profundidade inicial para determinação da catenária invertida é considerada a partir do momento que o solo possui resistência suficiente. Esta zona de menor resistência passa a ser considerada na profundidade do trecho de água.

4.1.2.2 Equilíbrio do trecho enterrado

Enquanto ocorre a penetração da estaca no solo a linha de ancoragem vai “cortando” o solo com a estaca e formando uma curva invertida, chamada de catenária invertida. Esta condição está representada na Figura 34.

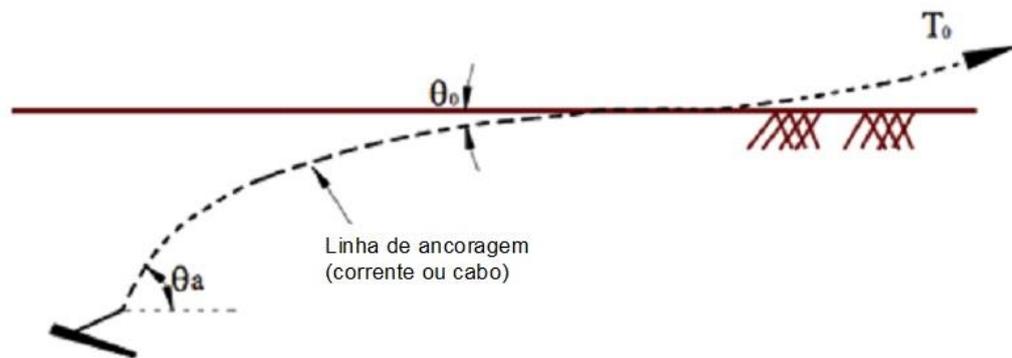


Figura 34: Configuração generalizada da âncora e sua linha de ancoragem (KIM, 2005).

O equilíbrio de forças do trecho enterrado utilizado pelo software é baseado no trabalho de Vivatrat et al. (1982), no qual o autor derivou as equações diferenciais que governam o comportamento da linha de ancoragem, incluindo o peso próprio, bem como a capacidade de carga do solo e a resistência ao atrito (KIM, 2005). Na Figura 35 é apresentado o esquema de forças atuantes na linha de ancoragem.

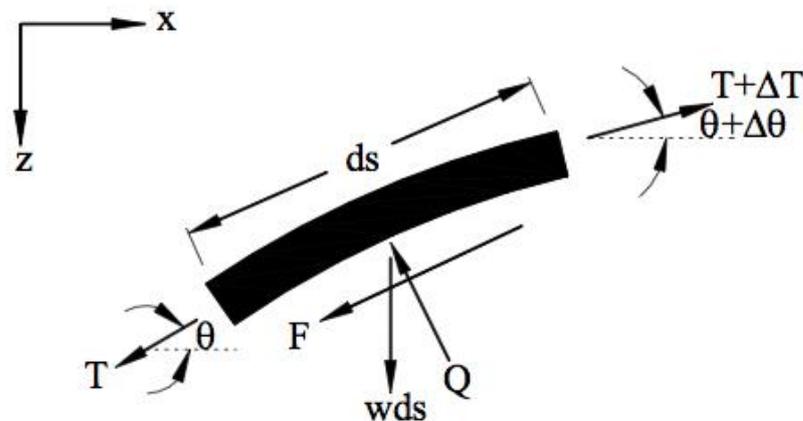


Figura 35: Esquema de forças aplicadas na linha de ancoragem no trecho enterrado (VIVATRAT et al., 1982 apud KIM, 2005).

onde a componente cisalhante F é resultado da adesão do solo à linha, e a cortante Q é consequência da resistência normal do solo. Ambas as forças F e Q são representadas por unidade de comprimento da linha de ancoragem e são calculadas através das tensões médias multiplicadas pelo diâmetro efetivo da linha. O equilíbrio de forças de cada segmento resulta nas equações a seguir.

$$\frac{dT}{ds} = F + w \sin \theta \quad \text{Equação 14}$$

$$T \frac{d\theta}{ds} = -Q + w \cos \theta \quad \text{Equação 15}$$

onde:

T= carga no trecho final do segmento

θ = ângulo entre da carga T com a horizontal

ds= unidade de comprimento

w= peso submerso da linha de ancoragem por unidade de comprimento

F= resistência tangencial por unidade de comprimento

Q= resistência normal por unidade de comprimento do segmento de linha

Os detalhes e conceitos que regem esta formulação são detalhados no item 4.2 deste trabalho.

4.1.2.3 Equilíbrio do trecho suspenso

O equilíbrio o trecho suspenso da linha de ancoragem é calculado no DIGIN de acordo com os procedimentos apresentados por Taylor et al. (1972). A Figura 36 mostra o esquema de forças consideradas no cálculo do equilíbrio deste trecho.

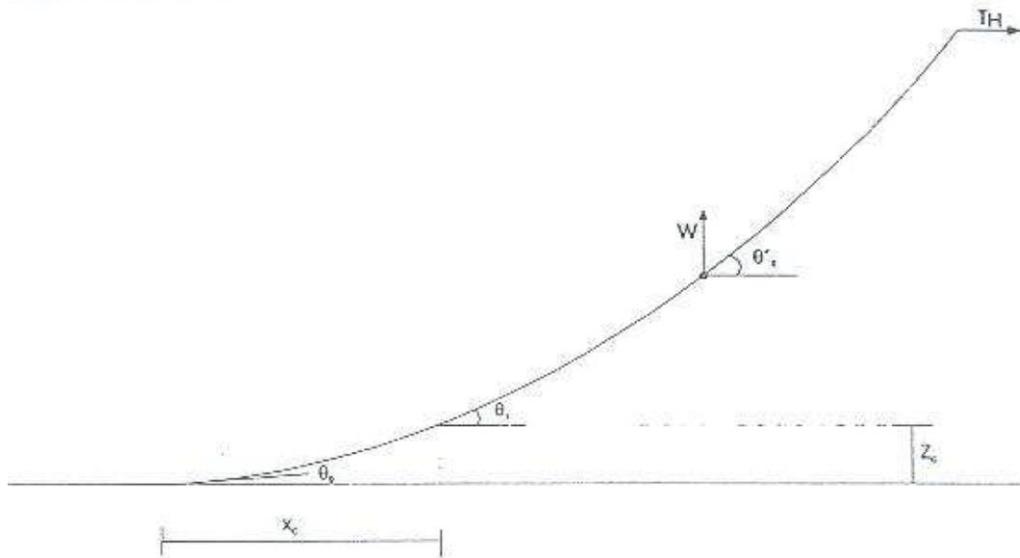


Figura 36: Esquema de forças aplicadas no trecho suspenso da linha de ancoragem (MANUAL DIGIN, 1996).

Em função do equilíbrio das forças apresentadas na Figura 35 é possível determinar as coordenadas de cada segmento da linha de ancoragem.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\tan \theta_0 + \frac{SW}{T_H}\right) \quad \text{Equação 16}$$

$$\Delta Z = \frac{T_H}{W} (\sec \theta_1 - \sec \theta_0) \quad \text{Equação 17}$$

$$\Delta X = \frac{T_H}{W} \ln \left[\frac{\tan\left(45 + \frac{\theta_1}{2}\right)}{\tan\left(45 + \frac{\theta_0}{2}\right)} \right] \quad \text{Equação 18}$$

sendo:

S= comprimento do segmento da linha de ancoragem

W= peso submerso da linha de ancoragem

TH= tensão horizontal

ΔZ = projeção vertical do segmento da linha de ancoragem

ΔX = projeção horizontal do segmento da linha de ancoragem

θ_0 = ângulo no início do segmento analisado

θ_1 = ângulo no fim do segmento analisado

4.1.2.4 Linha de ancoragem no leito marinho

O trecho da linha de ancoragem apoiada no leito marinho contribui para o equilíbrio total do sistema de ancoragem por meio da resistência de arraste. A perda total de tensão na linha é calculada pelo DIGIN através da fórmula apresentada a seguir.

$$\Delta T = \mu \cdot W \cdot \Delta L \quad \text{Equação 19}$$

onde

μ = coeficiente de atrito equivalente, sendo função das condições do solo e da linha de ancoragem enterrada no solo

W = peso submerso do segmento da linha de ancoragem

ΔL = comprimento da linha de ancoragem no leito marinho

4.1.2.5 Equilíbrio total da linha de ancoragem

No DIGIN o equilíbrio total da linha de ancoragem é determinado em função das condições de contorno e resolvido por meio de interações. Existem duas opções de análises:

- Distância horizontal constante entre o ponto de queda da âncora e o ponto de aplicação da força;
- Comprimento constante da linha de ancoragem.

A primeira análise geralmente é aplicada quando a linha de ancoragem esta sendo tensionada a partir de um guincho ou de algum elemento tensor capaz de transformar a força vertical em componentes horizontais diagonalmente opostas ao ponto de ancoragem.

O segundo tipo de análise deve ser aplicado quando a âncora sofre uma força de tração no ponto de amarração junto ao navio.

4.2 ANÁLISE DO TRECHO ENTERRADO DA LINHA DE ANCORAGEM

Na Figura 37 é apresentado um esquema típico do trecho enterrado da linha de ancoragem até a ancoragem. Para o estudo deste trecho é considerada uma tensão T_0 sendo aplicada no leito marinho a uma inclinação θ_0 com a horizontal. Esta força resulta em um corte no solo provocado pela corrente. Este movimento por sua vez faz com que a corrente adquira o formato de catenária invertida no trecho entre o leito marinho e sua conexão com a estaca, resultando, na extremidade da corrente junto a estaca, em uma força T_1 a uma inclinação θ_1 com a horizontal.

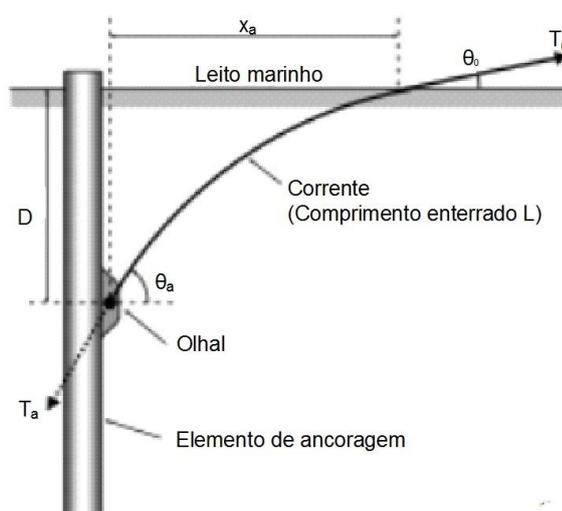


Figura 37: Esquema típico do trecho enterrado da linha de ancoragem (NEUBECKER, 2004).

É válido lembrar que o estudo do trecho enterrado da linha de ancoragem aqui apresentado independe do tipo de estaca utilizada, sendo aplicável tanto para âncoras de arraste como estacas torpedo.

Reese (1973) *apud* Neubecker (2004) propôs um procedimento numérico para analisar o comportamento da corrente, onde ele divide o solo desde o leito até o olhal da ancoragem em trechos com resistência uniforme e admite que a corrente forma um segmento de arco em cada um desses trechos. Esta configuração permite o cálculo do equilíbrio de forças de cada segmento. No entanto este método não considera as forças tangenciais que atuam na corrente nem o peso próprio da mesma. Gaul e Cox (1974) *apud* Neubecker (2004) refizeram o processo considerando o peso próprio da corrente e a resistência tangencial do solo, o que levou a uma redução das forças atuantes na extremidade da linha de ancoragem, junto ao olhal da

ancoragem. Vivatrat et al. (1982) simplificou o trabalho dos autores supracitados, removendo todas as considerações em torno do formato da corrente em cada trecho e dividindo a corrente em diversos segmentos curvilíneos. As forças atuantes em cada segmento são aquelas apresentadas na Figura 38 a qual será apresentada novamente aqui para detalhamento das fórmulas de equilíbrio.

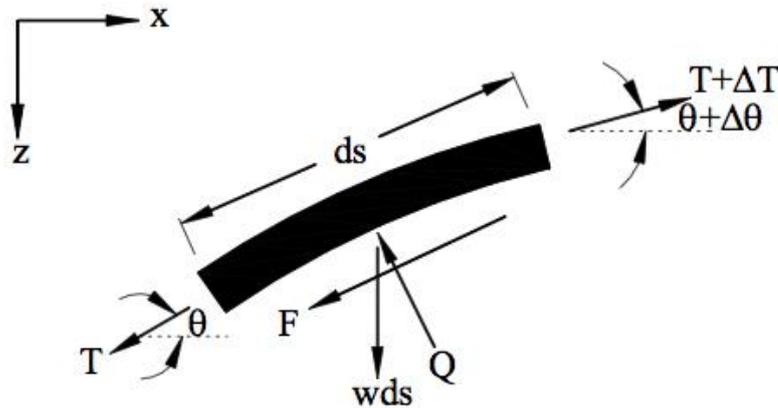


Figura 38: Esquema de forças aplicadas na linha de ancoragem no trecho enterrado (VIVATRAT et al., 1982).

sendo as equações de equilíbrio na direção tangencial:

$$F \cdot \Delta s + w \cdot \Delta s \cdot \sin\theta + \left((T + \Delta T) \cdot \cos \frac{d\theta}{ds} \Delta s \right) - \left((T + \Delta T) + \frac{dT}{ds} \Delta s \right) = 0 \quad \text{Equação 20}$$

sendo Δs um valor tão pequeno quanto possível:

$$\cos \left(\frac{d\theta}{ds} \cdot \Delta s \right) \cong 1 \quad \text{Equação 21}$$

logo:

$$F + w \cdot \sin\theta = \frac{dT}{ds} \quad \text{Equação 22}$$

Utilizando a abordagem de integração incremental tem-se para equilíbrio tangencial:

$$\frac{\Delta T}{\Delta s} = F + w \cdot \sin \theta \quad \text{Equação 23}$$

Já na direção normal tem-se o seguinte equilíbrio de forças:

$$w \cdot \Delta s \cdot \cos \theta - Q \cdot \Delta s - T \cdot \sin \left(\frac{d\theta}{ds} \Delta s \right) = 0 \quad \text{Equação 24}$$

sendo Δs um valor tão pequeno quanto possível:

$$\sin \left(\frac{d\theta}{ds} \Delta s \right) \cong \frac{d\theta}{ds} \Delta s \quad \text{Equação 25}$$

logo:

$$w \cdot \Delta s \cdot \cos \theta - Q \cdot \Delta s = T \cdot \frac{d\theta}{ds} \Delta s \quad \text{Equação 26}$$

Utilizando a abordagem de integração incremental tem-se para equilíbrio normal a corrente:

$$T \cdot \frac{\Delta \theta}{\Delta s} = w \cdot \cos \theta - Q \quad \text{Equação 27}$$

onde:

T= carga no trecho final do segmento

θ = ângulo entre da carga T com a horizontal

ds= unidade de comprimento

w= peso submerso da linha de ancoragem por unidade de comprimento

F= resistência tangencial por unidade de comprimento

Q= resistência normal por unidade de comprimento do segmento de linha

As forças resistentes do solo F e Q, as quais atuam tangencial e normalmente ao segmento de corrente, são determinadas como função das tensões unitárias médias do solo f e q

respectivamente, do diâmetro da corrente (d) e dos parâmetros de correção do diâmetro da corrente (E_t e E_n).

$$Q = (E_n d)q \quad \text{Equação 28}$$

$$F = (E_t d)f \quad \text{Equação 29}$$

As tensões médias unitárias q e f podem ser expressas em termos dos fatores de resistência N_c e α , multiplicados pela resistência ao cisalhamento do solo, como expresso nas formulações que seguem.

$$q = N_c S_u \quad \text{Equação 30}$$

$$f = \alpha S_u \quad \text{Equação 31}$$

sendo:

d = diâmetro efetivo da linha de ancoragem (corrente ou corda)

E_n , E_t = constantes para uniformizar o diâmetro da corrente tanto nas direções normal e tangencial respectivamente. Para cabos $E_n=E_t=1$, Para correntes estes parâmetros possuem valores diferentes, conforme explicitado a seguir..

N_c =fator de resistência de carga na linha de ancoragem

α =fator de aderência, sendo 1 para adesão completa e 0 quando não existe adesão

S_u =resistência não drenada

Segundo Neubecker (2004), aplicando a teoria de solos coesivos Yen e Tofani (1984) determinaram f como sendo igual a resistência não drenada S_u , enquanto q seria o produto de S_u pela capacidade de carga do solo, N_c . Com base em estudos experimentais Yen e Tofani (1984) e Degenkamp e Dutta (1989) calcularam valores similares para E_t e E_n , em torno de 8 e 2,5 respectivamente. Vivatrat et al. (1982) sugerem como sendo 10 e 2,6 os valores para E_t e E_n respectivamente. No item 2.3 deste trabalho foi feita uma discussão sobre os valores sugeridos para os parâmetros que envolvem a configuração da catenária invertida, sendo apresentado resultados de diversos autores.

Para o fator de capacidade de carga N_c , Vivatrat et al. (1982) sugerem valores entre 9 e 11, enquanto Degenkamp e Dutta (1989) assumiu valores entre 5,1 e 7,6 para o mesmo fator. O

coeficiente de atrito μ é definido como sendo a parcela entre as forças normal e a tangencial atuantes no trecho enterrado da corrente ($\mu=F/Q$). Para os valores típicos dos parâmetros de correção do diâmetro da corrente e do fator de capacidade de carga do solo obtêm-se valores entre 0,4 e 0,6 para o coeficiente de atrito. Mas a partir de estudos em laboratório House (2002) advertiu que este valor poderia ser mais baixo do que 0,4, nestes experimentos House (2002) chegou a valores abaixo de 0,2. Essa variação nos valores, segundo o autor, se dá em função da contribuição de atrito unilateral em solos pré-adensados. Os ensaios também mostraram que o coeficiente de atrito pode variar em função do nível de tensões ao qual a linha de ancoragem é submetida, resultando em coeficientes baixos quando a corrente está submetida a baixos níveis de tensão.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS DAS RETRO ANÁLISES

Este capítulo inicia-se apresentando o roteiro de cálculo utilizado no programa desenvolvido em Excel para determinação dos parâmetros que influenciam na atenuação da corrente no trecho enterrado. Este procedimento de cálculo foi utilizado tanto para os dados obtidos experimentalmente como aqueles extraídos do DIGIN e tem como base a teoria apresentada no capítulo 4. Nos dois casos os dados extraídos para realização da retro análise foram:

-coordenadas da catenária invertida (x,z);

-força aplicada no leito marinho;

-força lida junto à estaca.

Os parâmetros de correção da geometria da corrente foram arbitrados em função dos valores apresentados na bibliografia pesquisada para correntes. Estes parâmetros são respectivamente E_t e E_n .

$E_n = 8,0$ - constante para uniformizar o diâmetro da corrente na direção normal [adimensional]

$E_t = 2,0$ - constante para uniformizar o diâmetro da corrente na direção tangencial [adimensional]

A partir da configuração da catenária invertida foram determinados os seguintes dados:

- resistência não-drenada para cada profundidade lida – S_u (kN/m²)

$$S_u = \frac{40 * (386,4305 + 277,0182 * \left(\frac{-z}{40}\right)^{0,675}}{1000} \quad \text{Equação 32}$$

- comprimento dos segmentos - Δs (m)

$$\Delta s = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad \text{Equação 33}$$

- ângulo da força no olhal com a horizontal – θ (rad)

$$\theta = \tan^{-1} \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \quad \text{Equação 34}$$

- variação de θ ao longo da profundidade - $\Delta\theta$ (rad)

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_{i-1} \quad \text{Equação 35}$$

O próximo passo foi através de um processo iterativo usado para determinar a atenuação (ΔT) em cada segmento bem como a força T na extremidade de cada segmento. Para tal foi utilizada a equação apresentada abaixo.

$$\frac{\Delta T}{\Delta s} = F + w \cdot \sin\theta \quad \text{Equação 36}$$

A resistência tangencial F foi determinada a partir da equação:

$$F = (E_t d) * \alpha * S_u \quad \text{Equação 37}$$

O parâmetro E_t foi definido anteriormente através da bibliografia, sendo d e S_u propriedades conhecidas da corrente e do solo respectivamente.

O fator de adesão α , equivalente a aderência da corrente no solo, foi determinado de maneira interativa, uma vez que a força junto à estaca era uma medida conhecida em cada uma das configurações da corrente. Logo a atenuação final deveria resultar em uma força junto à estaca igual a força obtida através do DIGIN ou aquela lida pela célula de carga quando relacionada aos casos experimentais, desta forma o programa desenvolvido pesquisava o valor de α até que se obtivesse essa igualdade.

Na sequência foram determinadas as forças e parâmetros que relacionam a resistência normal da corrente. A força resistente normal (Q) foi determinada através da equação abaixo.

$$T \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta s} = w \cdot \cos\theta - Q \quad \text{Equação 38}$$

Uma vez que T em cada segmento foi determinado a partir da atenuação calculada e que os demais itens da equação são conhecidos, foi possível determinar o parâmetro N_c , definido como o fator de capacidade de carga do solo. Para tal foi utilizada a equação apresentada abaixo.

$$Q = (E_n d) N_c S_u \quad \text{Equação 39}$$

O parâmetro N_c também foi obtido de maneira iterativa. Foi necessário fazer uma correção em $\Delta\theta$, uma vez que os dados de saída apresentados pelo DIGIN são um valor médio ao longo da profundidade. Para realizar esta correção o programa desenvolvido neste trabalho aplicava novamente a Equação 38, sendo desta vez $\Delta\theta$ a incógnita. Feito este ajuste, a coordenada x foi determinada novamente em função do novo ângulo calculado. Com este novo valor de $\Delta\theta$ foi possível calcular N_c .

A seguir é apresentado o resumo dos resultados obtidos pela retroanálise em cada um dos solos estudados, cujos valores são apresentados em anexo

5.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

Neste item são descritos os procedimentos realizados para aquisição de dados do DIGIN e dos ensaios experimentais. Tanto das análises realizadas no DIGIN como dos resultados dos ensaios experimentais, foram extraídos os dados da configuração da catenária invertida (trecho enterrado) e as forças no leito marinho (*touch down point*) e no olhal (conexão com a estaca), estes dados foram posteriormente inseridos no programa em Excel a fim de se obter o fator de adesão, o fator de capacidade de carga e a atenuação em cada combinação de solo e força aplicada. Os resultados obtidos são apresentados na sequência deste trabalho.

5.1.1 Aquisição dos dados a partir do DIGIN

São apresentados neste item os dados de entrada utilizados no DIGIN e suas descrições para argila A e na argila B respectivamente. Estes dados são apresentados com a finalidade de expor as considerações feitas em termos de escala e caracterizar de forma concisa as condições de contorno do caso estudado.

O software DIGIN possui uma limitação quanto às dimensões analisadas, por este motivo os resultados dos ensaios realizados em escala reduzida foram convertidos a escala real, sempre respeitando os critérios estabelecidos na análise dimensional apresentada na descrição das análises experimentais.

O software conforme descrito anteriormente determina através de equilíbrio de forças a geometria da linha de ancoragem bem com as forças atuantes na mesma. Foi simulada a aplicação de uma série de carregamentos para cada uma das argilas. O software calcula a configuração de todo o trecho da linha de ancoragem, desde a plataforma até o olhal junto à estaca, como este trabalho está focado no trecho enterrado da linha de ancoragem serão mostrados apenas as análises e resultados referentes a este trecho para cada uma das argilas estudadas.

PROFUNDIDADES

	Esc. Reduz.	Esc. Real
Lâmina d'água	NFC	2135
Airgap	NFC	22,2

DADOS DO SOLO

Profundidades lidas		6							
Prof. (m)		Su (kN/m ²)		Sr (kN/m ²)		Peso Esp. (kN/m ³)			
Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real
0,00	0	1,453	58,12	1,453	58,12	13,5	13,5	13,5	13,5
0,15	6	1,483	59,31	1,483	59,31	13,5	13,5	13,5	13,5
0,30	12	1,631	65,24	1,631	65,24	13,5	13,5	13,5	13,5
0,45	18	1,961	78,46	1,961	78,46	13,5	13,5	13,5	13,5
0,60	24	2,524	100,98	2,524	100,98	13,5	13,5	13,5	13,5
0,75	30	3,363	134,51	3,363	134,51	13,5	13,5	13,5	13,5

LINHA DE ANCORAGEM

Configuração da linha=	3 (trecho embutido no solo)
Quantidade de segmentos analisados=	3 (amarra de topo, cabo de poliester e amarra de fundo)
Configuração para arrancamento=	1 (comprimento fixo da linha)
Modo de penetração=	0 (limites e ruptura)
Critério para equilíbrio de momentos=	0 (deve ser atingido equilíbrio de forças e momentos)
Dist. horizontal do ponto de amarração=	0 (informação relevante para outras configurações de arrancamento)

DESCRIÇÃO DOS SEGMENTOS DA LINHA DE ANCORAGEM

Segmento		Comp. segm. (m)		Tipo		Diâmetro (m)	
		Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real
amarra de fundo	1	NFC	550	corrente	2	0,003	0,12
cabo agua	2	NFC	2646,46	cabo poliester	3	NFC	0,206
amarra da topo	3	NFC	140	corrente	2	0,003	0,12

Segmento		Espessura (m)		Circunf. (m)		Peso/m _{ar} (kN/m)	
		Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real
amarra de fundo	1	0,012	0,48	0,055	2,2	4,41E-05	2,825
cabo agua	2	NFC	0,206	0,016	0,64	4,28E-06	0,274
amarra da topo	3	0,012	0,48	0,055	2,2	4,41E-05	2,825

Segmento		Proporção Par/Pag		Rigidez axial (kN)		Comp. na água (m)	
		Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real
amarra de fundo	1	3,84E-05	2,458	1,48E+01	9,46E+05		0
cabo agua	2	1,13E-06	0,072	2,86E+00	1,83E+05		0
amarra da topo	3	3,84E-05	2,458	1,48E+01	9,46E+05		0

Segmento		Comp. no solo (m)		*0 significa utilizar dados padrão do programa, os quais serão detalhados ao longo do texto
		Esc. Reduz.	Esc. Real	
amarra de fundo	1		0	
cabo agua	2		0	NFC- não foi considerada
amarra da topo	3		0	

Presença de lastro= 0

INTERAÇÃO LINHA/SOLO

Adesão do trecho enterrado= 0 (default - 0,5 para corrente e 0,3 para corda)
 Atrito entre a linha de anc.e o leito marinho= 0 (default - 0,7 para corrente e 0,2 para corda)

TIPO DE ANCORAGEM

1 (fixa)

PROFUNDIDADE DA ANCORAGEM

Profundidade mínima= 30 m
 Profundidade máxima= 30 m
 Passos para análise= 5 m

FORÇAS APLICADAS

Força mínima= 1000 kN
 Força máxima= 9000 kN
 Passos para aplicação da força= 100 kN

As forças analisadas para a argila A estão apresentadas na Tabela 08, sendo na primeira coluna a força lida no leito marinho e na segunda coluna a força no olhal, junto à estaca.

Tabela 08 – Forças analisadas no DIGIN para a argila A (w=100%).

F (kN)	F _{olhal} (kN)
17800	15308,79
18000	15504,36
18500	15993,28
19000	16482,27
19500	16971,29
20000	17460,97

A seguir são apresentados os dados de entrada utilizados no DIGIN e suas descrições para a argila B.

PROFUNDIDADES

	Esc. Reduz.	Esc. Real
Lâmina d'água		2135
Airgap		22,2

DADOS DO SOLO

Profundidades lidas		4						
Prof. (m)		Su (kN/m ²)		Sr (kN/m ²)		Peso Esp. (kN/m ³)		
Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	
	0	0	0,38643	15,4572	0,38643	15,4572	13,5	13,5
	0,15	6	4,63E-01	18,5364	4,63E-01	18,5364	13,5	13,5
	0,3	12	5,09E-01	20,3732	5,09E-01	20,3732	13,5	13,5
	0,45	18	5,48E-01	21,9212	5,48E-01	21,9212	13,5	13,5
	0,6	24	5,83E-01	23,3064	5,83E-01	23,3064	13,5	13,5
	0,75	30	6,15E-01	24,5824	6,15E-01	24,5824	13,5	13,5

LINHA DE ANCORAGEM

Configuração da linha=	3 (trecho embutido no solo)
Quantidade de segmentos analisados=	3 (amarra de topo, cabo de poliéster e amarra de fundo)
Configuração para arrancamento=	1 (comprimento fixo da linha)
Modo de penetração=	0 (limites e ruptura)
Critério para equilíbrio de momentos=	0 (deve ser atingido equilíbrio de forças e momentos)
Dist. horizontal do ponto de amarração=	0 (informação relevante para outras configurações de arrancamento)

DESCRIÇÃO DOS SEGMENTOS DA LINHA DE ANCORAGEM

Segmento		Comp. segm. (m)		Tipo		Diâmetro (m)	
		Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real
amarra de fundo	1	NFC	550	corrente	2	0,003	0,12
cabo agua	2	NFC	2646,46	cabo poliester	3	NFC	0,206
amarra da topo	3	NFC	140	corrente	2	0,003	0,12

Segmento		Espessura (m)		Circunf. (m)		Peso/m _{ar} (kN/m)	
		Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real
amarra de fundo	1	0,012	0,48	0,055	2,2	4,41E-05	2,825
cabo agua	2	NFC	0,208	0,016	0,64	4,28E-06	0,274
amarra da topo	3	0,012	0,48	0,055	2,2	4,41E-05	2,825

Segmento		Peso/m _{agua} (kN/m)		Rigidez axial (kN)		Comp. na água (m)	
		Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real	Esc. Reduz.	Esc. Real
amarra de fundo	1	3,84E-05	2,458	1,48E+01	9,46E+05		0
cabo agua	2	1,13E-06	0,072	2,86E+00	1,83E+05		0
amarra da topo	3	3,84E-05	2,458	1,48E+01	9,46E+05		0

Segmento		Comp. no solo (m)	
		Esc. Reduz.	Esc. Real
amarra de fundo	1		0
cabo agua	2		0
amarra da topo	3		0

*0 significa utilizar dados padrão do programa, os quais serão detalhados ao longo do texto
NFC- não foi considerada

Presença de lastro= 0

INTERAÇÃO LINHA/SOLO

Adesão do trecho enterrado= 0 (default - 0,5 para corrente e 0,3 para corda)
Atrito entre a linha de anc.e o leito marinho= 0 (default - 0,7 para corrente e 0,2 para corda)

TIPO DE ANCORAGEM

1 (fixa)

PROFUNDIDADE DA ANCORAGEM

Profundidade mínima= 28,8
Profundidade máxima= 28,8
Passos para análise= 5

FORÇAS APLICADAS

Força máxima= 1000
Força mínima= 20000
Passos para aplicação da força= 100

As forças analisadas para a argila B estão apresentadas na Tabela 09, sendo na primeira coluna a força lida no leito marinho e na segunda coluna a força no olhal.

Tabela 09– Forças analisadas no DIGIN para a argila B (w=120%).

F (kN)	F _{olhal} (kN)
4300	3561,00
5000	4252,98
6000	5241,40
7000	6230,60
8000	7220,60
9000	8211,40
10000	9203,00
11000	10195,10
12000	11187,70

5.1.2 Aquisição dos dados a partir dos ensaios experimentais

Durante o ensaio foram feitas 4 leituras da configuração da catenária com o ultrassom, obtendo-se as coordenadas x e z, essa configuração foi discretizada em 100 segmentos uniformes ao longo da profundidade no software Matlab. Desta forma pode-se ter um resultado mais preciso dos parâmetros envolvidos. Em escala real tem-se uma leitura de coordenadas a cada 28,8cm de profundidade, para uma altura final de cravação de 28,8m. Por representar uma extensa quantidade de resultados os mesmos não foram reproduzidos neste trabalho, podendo ser obtidos no trabalho de Rocha (2014).

Os dados utilizados para as retro análises referem-se aos ensaios onde foram aplicadas forças de 10kgf e 14kgf no leito marinho para as inclinações nominais variando de 20° a 55° com cada uma das forças, os procedimentos adotados nos ensaios experimentais estão apresentados no capítulo 3. Tanto para a argila A como para a argila B foram analisados os resultados de ensaios realizados em três dias diferentes.

5.2 CURVATURA DA CATENÁRIA INVERTIDA

A fim de relacionar a configuração da corrente no trecho enterrado com os fatores de adesão e capacidade de carga o parâmetro utilizado foi a curvatura. A curvatura representa o desenvolvimento da catenária ao longo do comprimento de corrente no trecho enterrado e pode

ser determinada através da Equação 40. Na Figura 39 é apresentado um desenho esquemático utilizado na determinação da curvatura da catenária.

$$\bar{C} = \frac{\theta_a - \theta_0}{L} \quad \text{Equação 40}$$

onde,

\bar{C} = curvatura da catenária [°/m]

θ_a = ângulo com a horizontal da catenária junto ao leito marinho (ver Figura 39) [°]

θ_0 = ângulo com a horizontal da catenária junto ao olhal da estaca (ver Figura 39) [°]

L = comprimento do trecho enterrado da catenária [m]

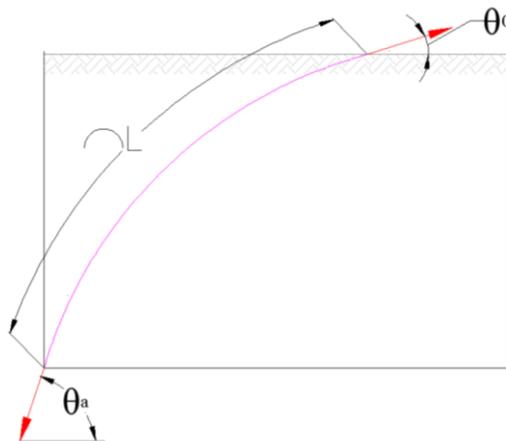


Figura 39: Desenho esquemático para determinação da curvatura da catenária.

A fim de verificar a influência da resistência do solo na curvatura da catenária foram plotadas as configurações resultantes da aplicação de forças de 10kg e 14kg, em cada uma das argilas, quando a corrente estava posicionada em ângulos nominais de 55° e 35°. Estas curvas são apresentadas na Figura 40.

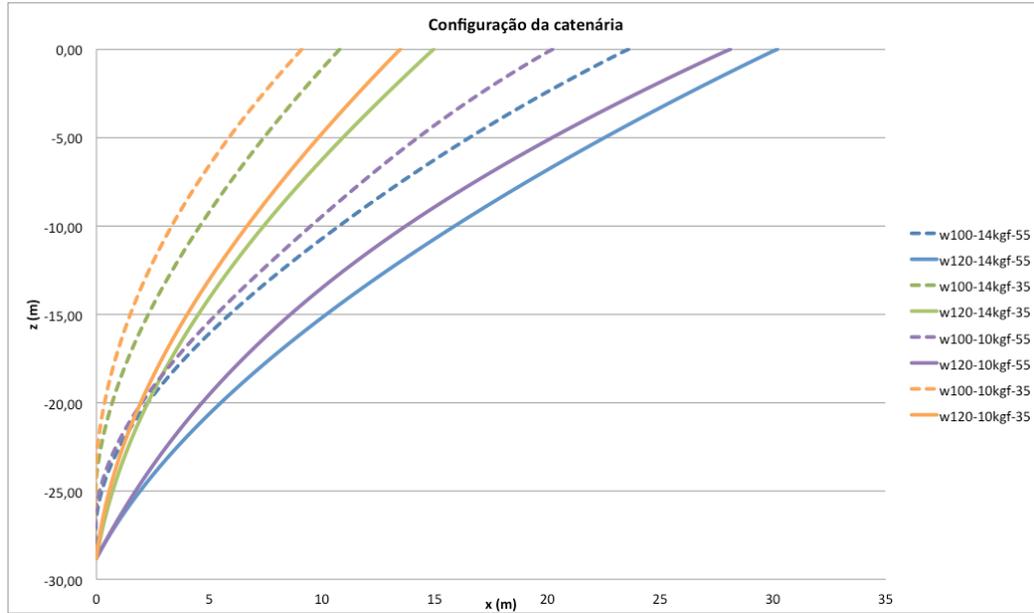


Figura 40: Comparação da configuração da catenária nas duas argilas para ângulos nominais de 55° e 35°.

Ao comparar as curvas obtidas na Figura 40 pode-se verificar de maneira clara a influência da resistência do solo na curvatura da catenária. Na argila A, a qual possui maior resistência não-drenada, o deslocamento da corrente é maior na parte superior da camada de solo, perdendo intensidade ao longo da profundidade, já na argila B pode-se verificar deslocamento da corrente ao longo de toda profundidade da camada de solo, o que resulta em uma variação menor nos valores de curvatura nos ensaios realizados nesta argila, já que a corrente se desloca de maneira mais uniforme ao longo da camada de solo.

5.3 FATOR DE ADESÃO α

Conforme descrito no item 2.2 deste trabalho, o fator de adesão em fundações profundas instaladas em solo argiloso é resultado da relação entre o atrito solo/estaca e a resistência não-drenada do solo. No presente trabalho o fator de adesão está sendo determinado para uma corrente inserida no solo através do peso próprio da estaca amarrada à extremidade da corrente, a qual apresenta dimensões de menor proporção quando comparadas a estacas cravadas, além de estar sujeita constantemente a forças de tração aplicadas em diferentes direções em função de condicionantes climáticas. Quando aplicada a uma composição dessas forças, a linha de ancoragem gera uma configuração diferente, o que resulta em variações nos fatores de adesão.

Em um primeiro momento foi avaliada a variação do fator de adesão para todas as análises realizadas, nas argilas A e B, com os carregamentos de 10 e 14kgf para os ângulos nominais de 0 a 55°. Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos para o fator de adesão em cada uma das retro análises, nesta tabela estão indicadas as forças aplicada e no olhal em cada ensaio bem como o ângulo nominal e o parâmetro α obtido.

Tabela 10 – Parâmetro α obtidos por retro análises.

ARGILA A (w=100%)				ARGILA B (w=120%)							
	β_{nominal} (°)	F (kN)	F_{ohal} (kN)	α (adim)		β_{nominal} (°)	F (kN)	F_{ohal} (kN)	α (adim)		
DIGIN	0	17800,00	15308,79	0,219	DIGIN	0	4300	3561,004	0,214		
	0	18000,00	15504,36	0,219		0	5000	4252,983	0,214		
	0	18500,00	15993,28	0,221		0	6000	5241,400	0,213		
	0	19000,00	16482,27	0,222		0	7000	6230,600	0,213		
	0	19500,00	16971,29	0,224		0	8000	7220,600	0,215		
	0	20000,00	17460,97	0,225		0	9000	8211,400	0,218		
Ensato 11/10/2013	55	8789,76	6890,80	0,168	Ensato 27/07/2013	0	10000	9203,000	0,221		
	50	8789,76	7013,24	0,227		0	11000	10195,100	0,224		
	45	8789,76	7073,17	0,232		0	12000	11187,700	0,227		
	40	8789,76	7112,85	0,232		55	8789,76	7838,940	0,263		
	35	8789,76	7192,88	0,230		50	8789,76	7838,940	0,272		
	30	8789,76	6911,91	0,281		45	8789,76	7754,210	0,333		
	25	8789,76	6750,97	0,317		40	8789,76	7918,090	0,288		
	20	8789,76	6530,09	0,358		35	8789,76	7779,110	0,358		
	0	8789,76	4259,67	0,323		30	8789,76	7856,220	0,338		
	55	6278,40	5224,54	0,125		25	8789,76	7952,350	0,313		
	50	6278,40	5063,37	0,158		20	8789,76	8060,530	0,273		
	45	6278,40	5304,52	0,129		0	8789,76	6242,026	0,947		
	40	6278,40	5183,87	0,151		55	6278,4	5525,980	0,210		
	35	6278,40	4962,85	0,191		50	6278,4	5497,080	0,237		
	30	6278,40	4782,10	0,191		45	6278,4	5478,410	0,256		
	25	6278,40	4641,41	0,255		40	6278,4	5458,420	0,276		
	20	6278,40	4520,94	0,277		35	6278,4	5431,600	0,301		
	0	6278,40	2170,08	0,293		30	6278,4	5433,360	0,308		
	Ensato 15/10/2013	55	8789,76	6707,30		0,253	Ensato 29/07/2013	25	6278,4	5511,790	0,288
		50	8789,76	6853,88		0,251		20	6278,4	5402,700	0,338
45		8789,76	6936,99	0,253	0	6278,4		3949,070	0,866		
40		8789,76	7112,85	0,235	55	8789,76		7845,380	0,265		
35		8789,76	6851,31	0,287	50	8789,76		7845,380	0,255		
30		8789,76	7032,02	0,267	45	8789,76		7917,090	0,275		
25		8789,76	6891,49	0,295	40	8789,76		7663,690	0,384		
20		8789,76	7173,08	0,253	35	8789,76		7919,930	0,303		
0		8789,76	6108,06	0,191	30	8789,76		7704,460	0,400		
55		6278,40	5059,72	0,150	25	8789,76		7542,860	0,482		
50		6278,40	4948,30	0,174	20	8789,76		7889,230	0,347		
45		6278,40	5124,99	0,156	0	8789,76		6004,449	1,035		
40		6278,40	5063,25	0,174	55	6278,4		5335,770	0,272		
35		6278,40	5043,13	0,182	50	6278,4		5408,250	0,265		
30		6278,40	5244,09	0,155	45	6278,4		5527,650	0,240		
25		6278,40	5063,29	0,187	40	6278,4		5263,720	0,351		
20	6278,40	4982,91	0,202	35	6278,4	5186,060	0,397				
0	6278,40	2029,48	0,303	30	6278,4	5282,780	0,371				
Ensato 17/10/2013	55	8789,76	7254,25	0,181	Ensato 30/07/2013	25	6278,4	5160,990	0,436		
	50	8789,76	7190,27	0,199		20	6278,4	4926,430	0,544		
	45	8789,76	7083,07	0,227		0	6278,4	3525,185	1,023		
	40	8789,76	7230,01	0,212		55	8789,76	7992,690	0,217		
	35	8789,76	7308,84	0,215		50	8789,76	7992,690	0,271		
	30	8789,76	7627,01	0,170		45	8789,76	7845,520	0,296		
	25	8789,76	7624,61	0,175		40	8789,76	8157,290	0,202		
	20	8789,76	7643,62	0,174		35	8789,76	8055,620	0,250		
	0	8789,76	6234,31	0,182		30	8789,76	8030,460	0,270		
	55	6278,40	5210,09	0,124		25	8789,76	7706,650	0,415		
	50	6278,40	5320,33	0,121		20	8789,76	7906,050	0,344		
	45	6278,40	5309,95	0,128		0	8789,76	5690,566	1,152		
	40	6278,40	5395,99	0,121		55	6278,4	5535,450	0,208		
	35	6278,40	5494,99	0,110		50	6278,4	5384,430	0,273		
	30	6278,40	5371,83	0,132		45	6278,4	6005,930	0,068		
	25	6278,40	5573,95	0,102		40	6278,4	5466,000	0,273		
20	6278,40	5410,12	0,130	35	6278,4	4667,860	0,601				
0	6278,40	3640,96	0,188	30	6278,4	5479,180	0,290				
				25	6278,4	5437,100	0,318				
				20	6278,4	5053,100	0,487				
				0	6278,4	3524,442	1,024				

Em um segundo momento os resultados obtidos para o fator de adesão nas retro análises foram plotados em conjunto e apresentados na Figura 41, sendo possível verificar a variabilidade deste fator quando a corrente é submetida a diferentes carregamentos nas duas argilas.

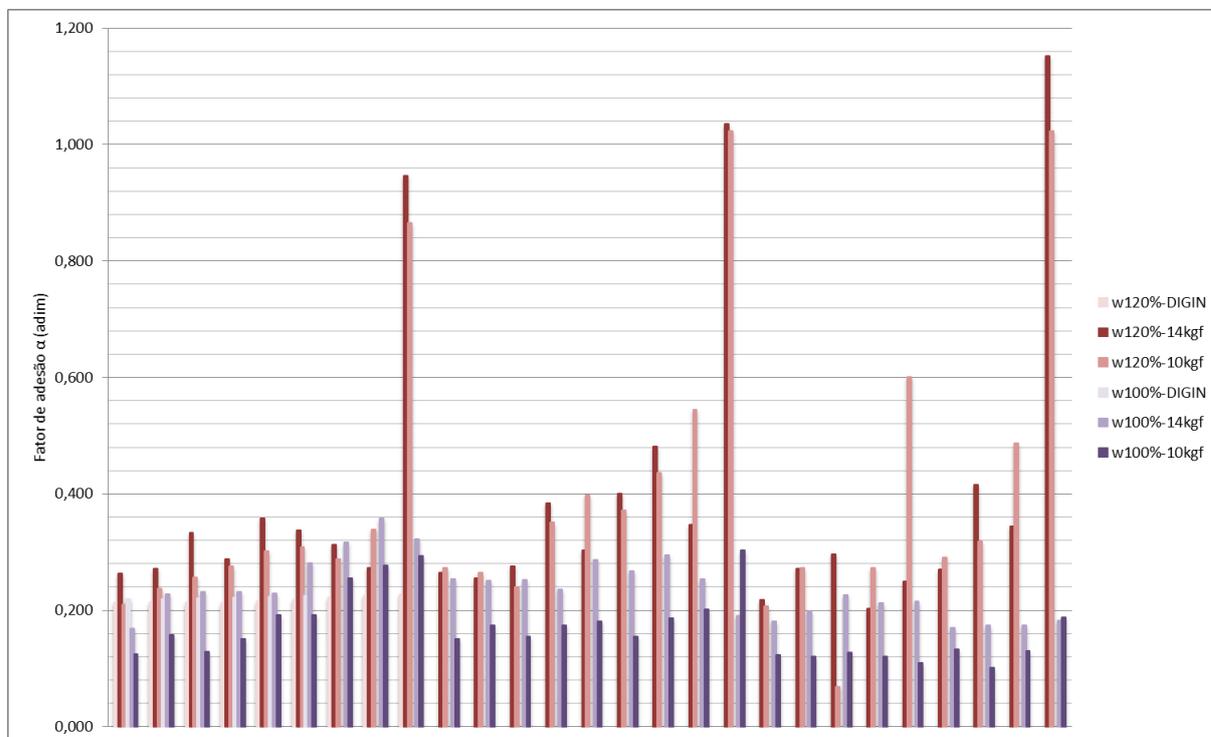


Figura 41: Representação gráfica dos fatores de adesão obtidos por retro-análise.

Foi verificada uma faixa de valores maior do fator de adesão para o solo menos resistente, resultado que corrobora com o estudo de Tomlinson (1997) apresentado no item 2.2, onde o fator de adesão reduz com o aumento da resistência não-drenada do solo. Os fatores expostos no estudo de Tomlinson (1997) para estacas escavadas apresentavam variação entre 1 para argilas com $S_u < 50\text{kPa}$ e 0,25 para argilas com $S_u > 200\text{kPa}$. Nos ensaios com ângulo nominal zero, ou seja, a corrente tensionada na posição vertical, os valores de α para argila B foram em torno de 1, valor aproximadamente 4 vezes maior do que quando a corrente foi submetida a ângulos nominais maiores, resultando em fatores próximos a 0,25. Esta diferença pode ter como influência os efeitos do deslocamento lateral da corrente no solo, provocando um descolamento entre o solo e a corrente.

A próxima etapa foi verificar o comportamento de α em função da curvatura da catenária, relacionando assim o deslocamento da corrente ao longo da camada de solo com a adesão entre

corrente e solo. Na Figura 41 é apresentado o gráfico ilustrando curvatura *versus* fator de adesão.

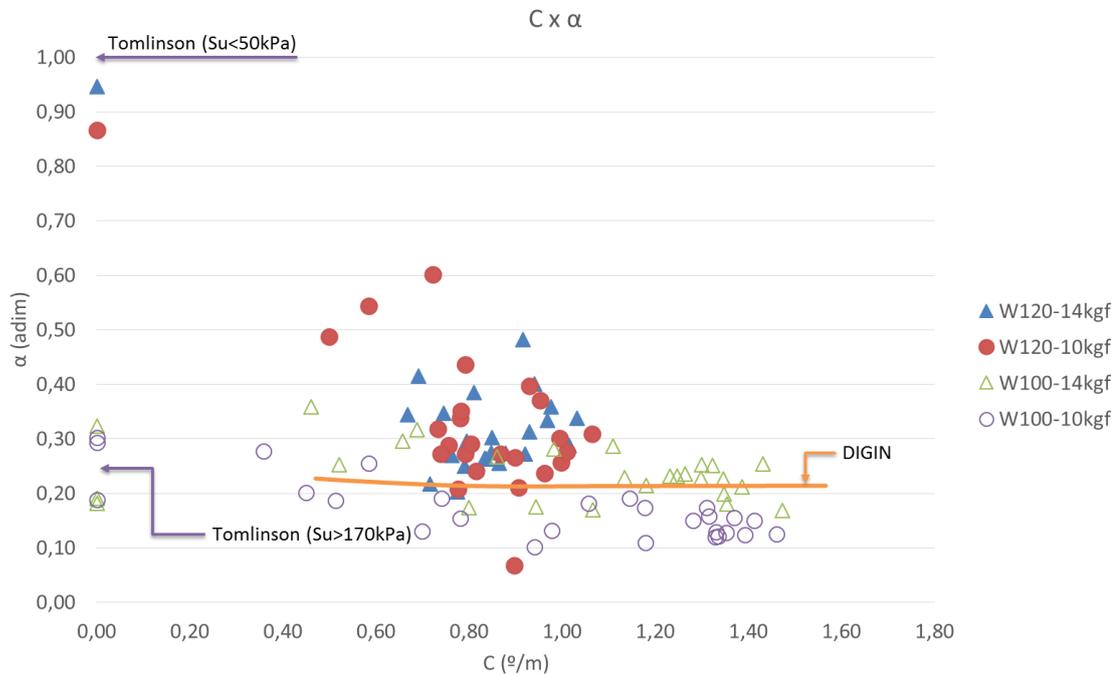


Figura 42: Curvatura versus fator de adesão.

Ao plotar o fator de adesão em função da curvatura verifica-se que existe uma curva característica para cada tipo de material. No caso da argila B, cujo material é menos resistente e mais compressível, o valor de α reduz da unidade para a corrente na vertical ($\bar{C}=0$) a valores decrescentes com o aumento da curvatura. Estes valores aparentam atingir um valor mínimo da ordem de 0,20.

Para a argila A, cujo material é mais resistente o valor de α apresentou valores na ordem de 0,25 para curvatura igual a 0 e o seu comportamento indica um decréscimo suave no valor de α com o aumento da curvatura. Este comportamento vai de encontro a teoria de estacas cravadas apresentada no item 2.2 e reafirmado na análise da Figura 41 onde foi verificado que quanto mais resistente o solo menor será o fator de adesão, pois é mais difícil o rearranjo do solo após ser submetido a um corte como é o caso da linha de ancoragem.

Ainda na Figura 42 é apresentado o valor utilizado como padrão pela Petrobras, elucidado através do DIGIN. Analisando os resultados plotados pode-se verificar que em se tratando de solos menos resistentes, como é o caso da argila B, a qual apresenta um comportamento

próximo ao do material encontrado na Bacia de Campos, conforme ilustrado no item 3.3.1, o valor de α em torno de 0,25 adotado pela Petrobras é satisfatório, pois encontra-se na faixa de valores mínimos em relação aos encontrados nas retro análises. Já para solos mais resistentes sugere-se a utilização de valores mais baixos.

5.4 FATOR DE CAPACIDADE DE CARGA N_c

A análise do fator de capacidade de carga N_c é relacionada ao comportamento da catenária invertida no que diz respeito às forças normais atuantes. A exemplo do que foi feito na análise do fator de adesão, em um primeiro momento foi verificada a variação deste fator nas duas argilas, com os carregamentos de 10 e 14kgf e com ângulos nominais de 0 a 55°. Na Tabela 11 são apresentados os resultados obtidos para o fator de capacidade de carga em cada uma das retro análises, nesta tabela estão indicadas as forças aplicada e no olhal em cada ensaio bem como o ângulo nominal e o parâmetro N_c obtido.

Tabela 11 – Parâmetro N_c obtidos por retro análises.

ARGILA A (w=100%)					ARGILA B (w=120%)					
	$\beta_{nominal}$ (°)	F (kN)	F _{folha} (kN)	N_c (adim)		$\beta_{nominal}$ (°)	F (kN)	F _{folha} (kN)	N_c (adim)	
DIGIN	0	17800,0	15308,79	5,874	DIGIN	0	4300	3561,004	5,772	
	0	18000,0	15504,36	5,835		0	5000	4252,983	5,784	
	0	18500,0	15993,28	5,987		0	6000	5241,400	5,822	
	0	19000,0	16482,27	5,874		0	7000	6230,600	5,816	
	0	19500,0	16971,29	5,595		0	8000	7220,600	5,783	
	0	20000,0	17460,97	5,749		0	9000	8211,400	5,745	
Ensaio 11/10/2013	55	8789,76	6890,80	3,306	Ensaio 27/07/2013	0	10000	9203,000	5,706	
	50	8789,76	7013,24	5,776		0	11000	10195,100	5,723	
	45	8789,76	7073,17	5,239		0	12000	11187,700	5,758	
	40	8789,76	7112,85	2,471		55	8789,76	7838,940	7,467	
	35	8789,76	7192,88	2,113		50	8789,76	7838,940	7,782	
	30	8789,76	6911,91	1,656		45	8789,76	7754,210	7,766	
	25	8789,76	6750,97	1,127		40	8789,76	7918,090	8,042	
	20	8789,76	6530,09	0,741		35	8789,76	7779,110	8,055	
	0	8789,76	4259,67	0,000		30	8789,76	7856,220	8,245	
	55	6278,40	5224,54	2,242		25	8789,76	7952,350	7,682	
	50	6278,40	5063,37	1,976		20	8789,76	8060,530	6,284	
	45	6278,40	5304,52	1,901		0	8789,76	6242,026	0,000	
	40	6278,40	5183,87	1,657		55	6278,4	5525,980	5,286	
	35	6278,40	4962,85	1,285		50	6278,4	5497,080	5,693	
	30	6278,40	4782,10	0,906		45	6278,4	5478,410	5,289	
	25	6278,40	4641,41	0,656		40	6278,4	5458,420	5,795	
	20	6278,40	4520,94	0,427		35	6278,4	5431,600	5,857	
	0	6278,40	2170,08	0,000		30	6278,4	5433,360	5,829	
	Ensaio 15/10/2013	55	8789,76	6707,30		2,949	25	6278,4	5511,790	4,730
		50	8789,76	6853,88		2,764	20	6278,4	5402,700	3,658
45		8789,76	6936,99	2,545	0	6278,4	3949,070	0,000		
40		8789,76	7112,85	2,326	55	8789,76	7845,380	7,086		
35		8789,76	6851,31	1,781	50	8789,76	7845,380	6,960		
30		8789,76	7032,02	1,471	45	8789,76	7917,090	7,315		
25		8789,76	6891,49	1,091	40	8789,76	7663,690	7,172		
20		8789,76	7173,08	0,802	35	8789,76	7919,930	7,455		
0		8789,76	6108,06	0,000	30	8789,76	7704,460	6,691		
55		6278,40	5059,72	2,144	25	8789,76	7542,860	5,423		
50		6278,40	4948,30	1,924	20	8789,76	7889,230	4,723		
45		6278,40	5124,99	1,803	0	8789,76	6004,449	0,000		
40		6278,40	5063,25	1,420	55	6278,4	5335,770	3,853		
35		6278,40	5043,13	1,208	50	6278,4	5408,250	3,921		
30		6278,40	5244,09	0,964	45	6278,4	5527,650	4,281		
25		6278,40	5063,29	0,666	40	6278,4	5263,720	4,236		
20		6278,40	4982,91	0,466	35	6278,4	5186,060	3,956		
0		6278,40	2029,48	0,000	30	6278,4	5282,780	4,062		
Ensaio 17/10/2013		55	8789,76	7254,25	2,883	25	6278,4	5160,990	3,513	
		50	8789,76	7190,27	2,782	20	6278,4	4926,430	2,480	
	45	8789,76	7083,07	2,490	0	6278,4	3525,185	0,000		
	40	8789,76	7230,01	2,369	55	8789,76	7992,690	5,538		
	35	8789,76	7308,84	1,977	50	8789,76	7992,690	4,957		
	30	8789,76	7627,01	1,839	45	8789,76	7845,520	5,254		
	25	8789,76	7624,61	1,377	40	8789,76	8157,290	5,912		
	20	8789,76	7643,62	1,031	35	8789,76	8055,620	5,665		
	0	8789,76	6234,31	0,000	30	8789,76	8030,460	5,389		
	55	6278,40	5210,09	2,111	25	8789,76	7706,650	6,155		
	50	6278,40	5320,33	2,032	20	8789,76	7906,050	5,748		
	45	6278,40	5309,95	1,780	0	8789,76	5690,566	0,000		
	40	6278,40	5395,99	1,580	55	6278,4	5535,450	3,657		
	35	6278,40	5494,99	1,399	50	6278,4	5384,430	3,590		
	30	6278,40	5371,83	1,139	45	6278,4	6005,930	4,643		
	25	6278,40	5573,95	0,867	40	6278,4	5466,000	4,673		
	20	6278,40	5410,12	0,608	35	6278,4	4667,860	3,617		
	0	6278,40	3640,96	0,000	30	6278,4	5479,180	4,590		
					25	6278,4	5437,100	4,893		
					20	6278,4	5053,100	3,999		
				0	6278,4	3524,442	0,000			

Os valores de N_c resultantes das retro análises e apresentados na Tabela 11 foram plotados e apresentados na Figura 43, sendo possível verificar a variabilidade deste fator quando a corrente é submetida a diferentes carregamentos nas duas argilas estudadas.

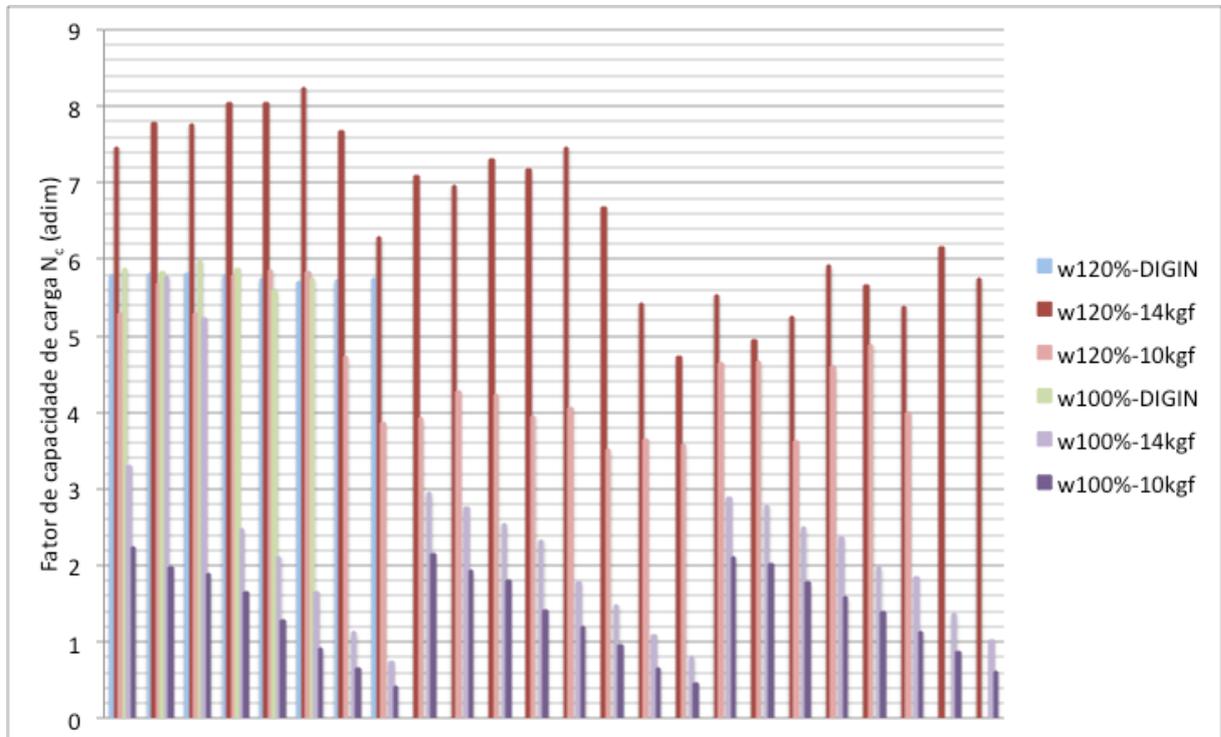


Figura 43: Representação gráfica dos fatores de capacidade de carga obtidos por retro-análise.

Foi verificada variabilidade nos valores do fator de capacidade de carga obtidos nos ensaios, desta forma foram pesquisadas as condicionantes desta variação. Na Figura 43 é possível verificar a influência da resistência não-drenada do solo na determinação do fator de capacidade de carga do solo, sendo a faixa de valores de N_c para a argila B, material menos resistente, maior do que para a argila A.

Foi então analisado o comportamento do fator N_c quando relacionado a curvatura da catenária, este estudo está apresentado na Figura 44.

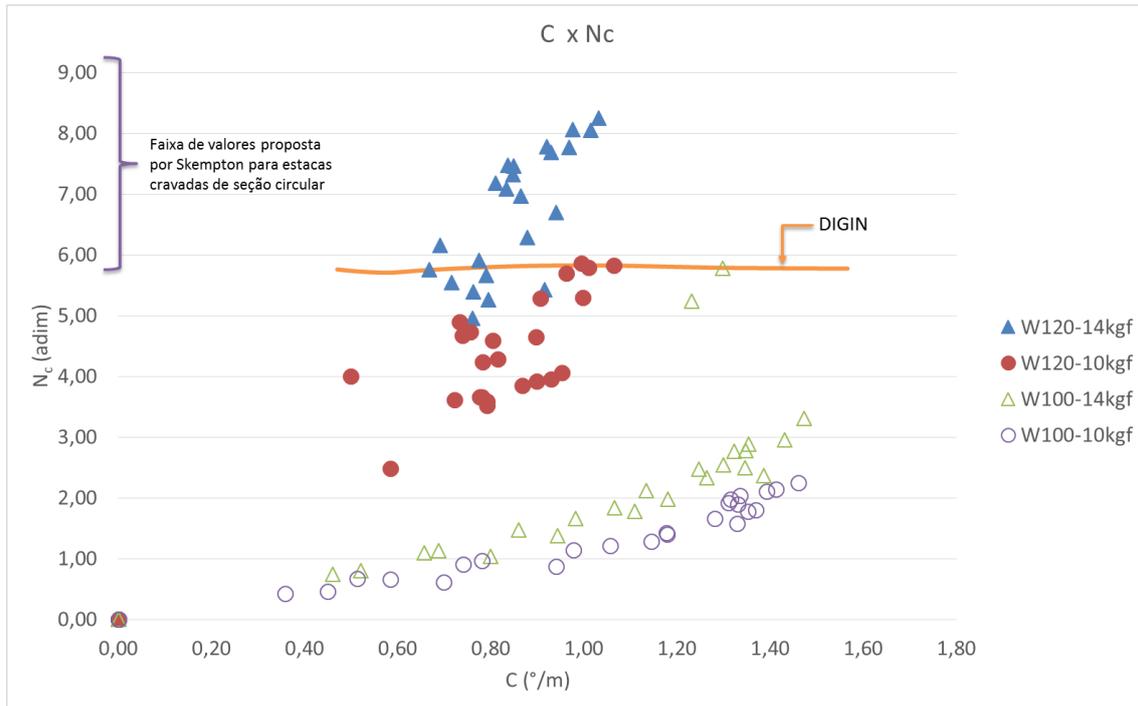


Figura 44: Curvatura versus fator de capacidade de carga.

Ao analisar a Figura 44 observa-se que para a corrente na posição vertical ($\bar{C}=0$) o valor de N_c é zero, tanto para a argila A como para a argila B, uma vez que não existem forças laterais a serem resistidas e em ambos os casos é verificado aumento no valor de N_c com o aumento da curvatura, indicando que quanto mais inclinada está a corrente maior será a força normal resistida, mas a intensidade com que ocorre o aumento de N_c é distinta para cada um dos materiais estudados. O fato de N_c aumentar com o aumento da curvatura se dá devido ao maior embutimento da corrente a cada processo de carregamento, ou seja, o peso de solo atuando sobre a corrente é maior, contribuindo para resistência da linha de ancoragem.

Sendo a força normal resistente dada em função da corrente, de N_c e S_u conforme apresentado na equação 39, quando a mesma corrente é submetida a um mesmo nível de carregamento a tendência é que o fator de capacidade de seja menor no solo mais resistente, ou seja, com maior S_u , conforme pode-se verificar na Figura 44, onde verifica-se valores mais baixos de N_c para a argila A, a qual é mais resistente. Esta situação acontece porque solos mais resistentes tendem a demorar mais para recompor sua estrutura antes do corte realizado pela corrente, gerando dessa forma um vão na parte superior da corrente, diminuindo dessa forma a parcela de peso de solo que atua como força resistente.

A aplicação dos valores calculados de N_c à catenária deve ser vista com cautela. Equilíbrio limite ou expansão de cavidade pressupõe algumas condições de contorno, como simetria de tensões e estado plano de deformações. Estas condições não são observadas na catenária invertida, cuja inclinação se modifica ao longo do comprimento.

Conforme citado anteriormente, a Petrobras adota em seu software de previsão de capacidade de carga fatores N_c em torno de 5,75 (ilustrado na Figura 44), a fim de elucidar a comparação entre os resultados obtidos nas retro análises e o valor adotado pelo DIGIN foi plotado um gráfico, apresentado na Figura 45 relacionando o fator calculado com o fator de capacidade de carga estimado pela Petrobras.

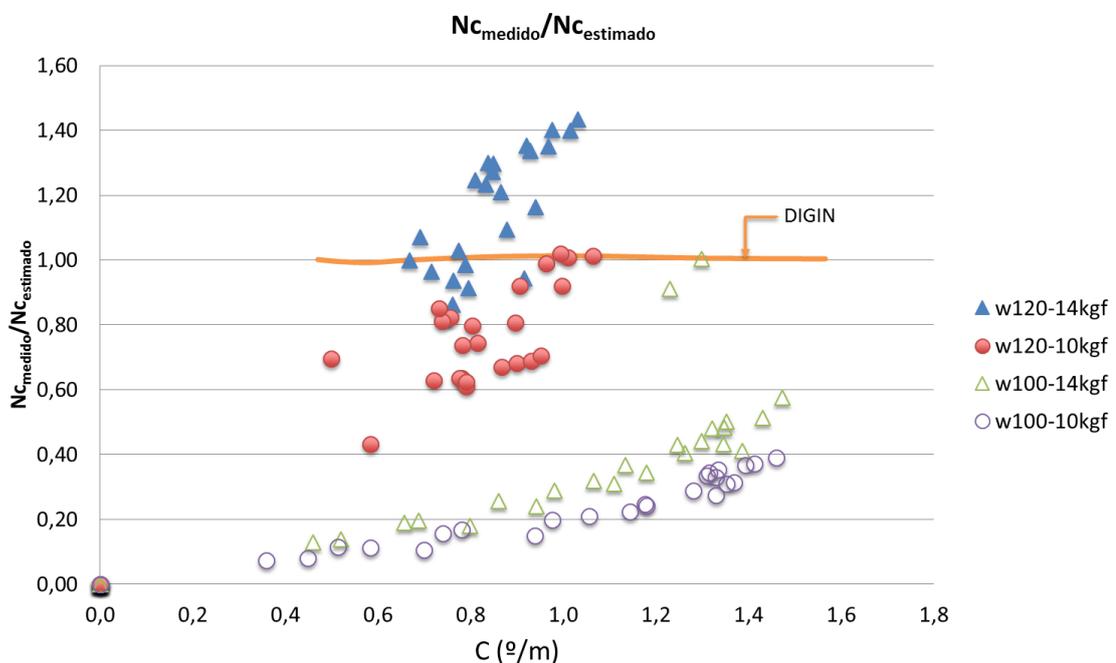


Figura 45: Comparação entre N_c medido e N_c estimado.

Analisando a Figura 45 observa-se que para argilas mais resistentes o software DIGIN apresenta valores superestimados de N_c , quando comparado com os resultados obtidos na retro-análise para curvaturas até 1,5, nota-se ainda uma tendência de da relação $N_{c_{medido}}/N_{c_{calculado}}$ se aproximar de 1 com o aumento da curvatura na argila A. Já para argila B, com menor valor de resistência não-drenada os valores de N_c tendem a se aproximar de 1 quando atingem curvaturas menores, em torno de 1.

5.5 ATENUAÇÃO

O equilíbrio das forças tangenciais e normais atuantes sobre o trecho enterrado da linha de ancoragem gera uma atenuação da carga aplicada em relação à carga que atua efetivamente sobre estaca. Analisando os resultados obtidos foi verificada atenuação em função das curvaturas obtidas nos ensaios. Sendo a atenuação definida por:

$$\Delta T\% = 100 * \frac{T_0 - T_a}{T_0} \quad \text{Equação 41}$$

onde,

ΔT = atenuação absoluta [%]

T_0 = força de tração na amarra junto ao leito marinho [kN]

T_a = fora de tração junto à estaca torpedo [kN]

A atenuação *versus* curvatura é apresentada na Figura 46.

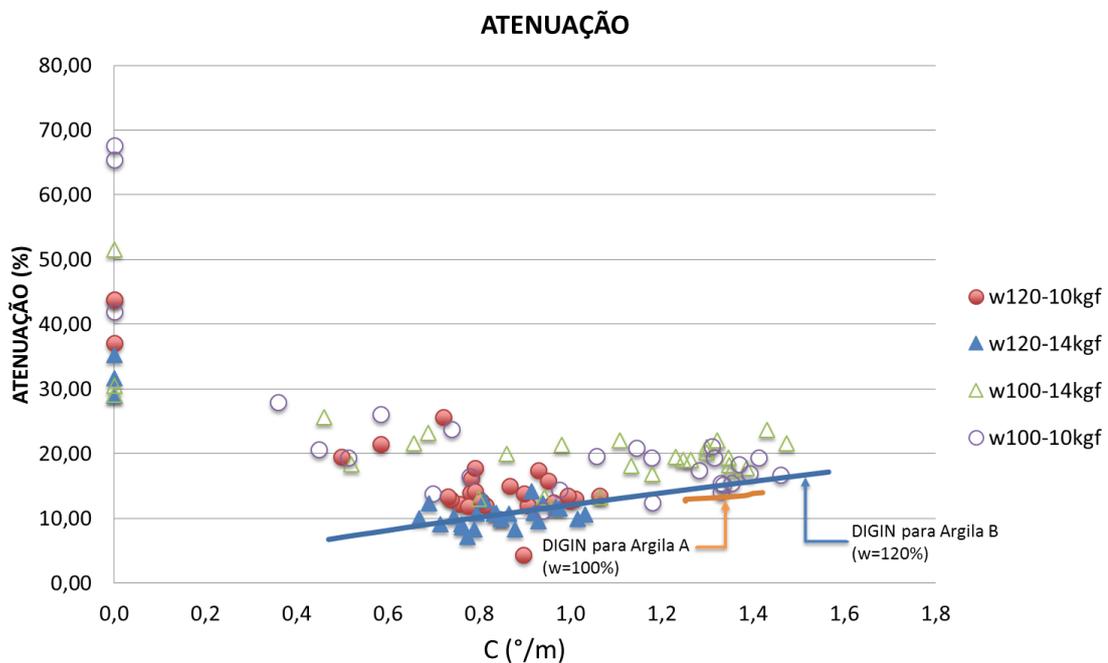


Figura 46: Curvatura versus atenuação.

Analisando os valores de atenuação nos dois materiais, conforme ilustrado na Figura 46 verifica-se que tanto na argila A como na argila B os maiores valores de atenuação foram apurados quando a corrente estava na posição vertical, posição na qual não há forças atuando na direção normal à corrente, e nesta posição do ensaio a corrente ainda não havia sido movimentada, logo a adesão da corrente ao solo apresentava seu valor máximo. A argila A apresentou uma faixa de valores maior de atenuação, indicando que quanto mais resistente o solo menor será a sollicitação na estaca quando aplicada a mesma situação em um solo menos resistente e a uma mesma profundidade de cravação.

Ao avaliar o comportamento da atenuação resultante na argila A verifica-se que a mesma apresentou uma diminuição com o aumento da curvatura, isso ocorreu até uma curvatura de aproximadamente 0,6, a partir deste ponto a atenuação apresentou comportamento constante em torno de 20%. Essa diminuição acontece uma vez que a corrente vai sendo movimentada no solo e a adesão da corrente com o solo vai diminuindo e as forças normais a serem resistidas aumentam conforme aumenta a curvatura da corrente.

A exemplo do comportamento observado na argila A, na argila B também foi verificada queda no valor da atenuação, neste caso foi observada queda até uma curvatura de aproximadamente 0,75 e partir deste momento demonstrando tendência a um valor constante em torno de 12%. A intensidade da atenuação na argila B é menor em função da resistência do solo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho consistiu no estudo paramétrico da atenuação de cargas estáticas na linha de ancoragem de fundações offshore por meio da retro análise de resultados obtidos experimentalmente e através do software DIGIN. Os parâmetros que permeiam o comportamento da linha de ancoragem de fundações offshore no trecho enterrado são: o fator de adesão (α) e o fator de capacidade de carga N_c .

As análises dos parâmetros foram realizadas em função da curvatura da corrente após a aplicação de um novo carregamento. O conceito de curvatura utilizado indica a relação do ângulo da corrente junto à estaca e junto ao leito marinho ao longo do comprimento do trecho enterrado.

O fator de adesão, responsável pela força tangencial atuando na corrente, é função principalmente da geometria da corrente e da resistência do solo, a exemplo do que acontece em estacas cravadas, onde este fator é função da resistência do solo, do tipo de estaca, da estratigrafia do solo e do método construtivo. Quando analisado em um solo mais resistente (Argila A), este fator apresentou tendência a ter um comportamento mais constante quando comparado a argila B, resultando em valor médio de 0,20, próximo ao valor de 0,25 apresentados por Tomlinson (1997) para materiais cujo $S_u \geq 170 \text{kPa}$. O software DIGIN, utilizado pela Petrobras para previsão de capacidade de carga de estacas torpedo utiliza o valor médio de 0,25 para este fator, o que, a partir das análises realizadas, mostrou ser um valor satisfatório para materiais mais resistentes. Já na argila B os valores de α apresentaram uma faixa mais alta de valores quando relacionados com a curvatura, quando a corrente foi analisada na posição vertical a adesão resultante foi 1, ou seja adesão total entre solo e corrente, conforme a corrente foi sendo submetida a novos ângulos nominais apresentou uma tendência a se manter constante em torno de 0,30, valor também próximo ao utilizado pela Petrobrás nas análises de previsão de capacidade de carga.

O fator de capacidade de carga apresentou variabilidade nos resultados quando analisado em solos com resistências distintas, o que vai de encontro à abordagem clássica de previsão de capacidade de carga em estacas, onde verificou-se a de variação de N_c em função do

comportamento tensão-deformação do solo. Nas análises realizadas na argila A, mais resistente a faixa de valores de N_c foi mais baixa, variando de 0 quando a corrente estava na posição vertical até 3 na curvatura máxima analisada. Já na argila B a faixa de valores de N_c foi de 0 na posição vertical até 8 na curvatura máxima analisada. Os valores de N_c apresentaram tendência de crescimento constante com o aumento da curvatura, mostrando a influência deslocamento da corrente no parâmetro. O software DIGIN utiliza um valor médio de N_c em torno de 5,7, este valor está no limite inferior daqueles apresentados por Skempton na abordagem clássica de previsão de capacidade de carga e é satisfatório para argilas menos resistentes, já para argilas mais resistentes este parâmetro está superestimado no software DIGIN. Valores mais baixos de N_c indicam menor resistência normal do solo.

Foi ainda analisada a atenuação resultante em cada situação estudada, e comparada com os resultados obtidos no DIGIN. Na argila menos resistente os resultados experimentais e do software apresentaram valores próximos, apresentando aumento da atenuação com o aumento da curvatura da corrente. Já na argila A atenuação resultante do DIGIN foi menor do que a verificada nos ensaios experimentais, indicando maior solicitação à estaca.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se o estudo de mais combinações de solo/corrente experimentalmente e numericamente, a fim de validar definitivamente o comportamento atribuído aos parâmetros aferidos neste trabalho.

Conhecer todos os parâmetros que envolvem a configuração da linha de ancoragem e ter domínio sobre os efeitos resultantes da modificação destes parâmetros, e o que pode vir a causar modificações nos mesmos, permite a escolha adequada dos materiais e do tipo de ancoragem para cada situação específica, podendo gerar economias em grande escala na instalação de plataformas de petróleo.

REFERÊNCIAS

- BOND, A. J. JARDINE, R J. *Effects os installing displacement piles in a high OCR clay*. 1991. Geotechnique, 41 (3). Pp 341-63.
- BRUM, S. A. J. **Ensaio de centrifugação para avaliação do desempenho de pentrômetros dinâmicos para ancoragens de estruturas offshore**. 2009. 128f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- CARNEIRO, F. L. **Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos**. Rio de Janeiro. Editora da UFRJ, 2ª edição. 1996. 258p.
- COSTA, R. G. B.. **Análise paramétrica das condições de ancoragem de plataformas offshore utilizando estacas torpedo a partir de modelos em elementos finitos**. 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro.
- COSTA, A. M. e AMARAL, C. S. **Avaliação da Penetração de Estacas Lançadas por Gravidade em Solos Argilosos**. 1996. 14f. Superintendência de engenharia Básica/Divisão de Projetos de Exploração/Setor de Desenvolvimento e Métodos.
- DEGENKAMP, G. DUTTA, A. **Soil resistances to embedded anchor chain in soft clay**. 1989. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, vol. 115, nº 10 pag. 1420-1438, Pp 1420-1438.
- GAUER, E. A. **Influência da Velocidade de Rotação da Mini Palheta na Resistência de um solo siltoso**. 2010. 126p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- HOUSE, A. R. **Suction caisson foundations for buoyant offshore facilities**. 2002. PhD Thesis, Departamento f Civil and Resource Engineering – University of Western Australia, Australia.
- JUNIOR, H. C.; CINTRA, D. T. Simulação do Lançamento e Cravação de Estacas-Torpedo em Solo Marinho com a Utilização do Método dos Elementos Discretos. 2005. 17f. **Proceedings of the XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE 2005**. Guarapari.
- KIM, B. M. **Upper Bound Analysis for Drag Anchors in Soft Clays**. 2005. 275 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Texas A&M University, Texas.
- 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. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro.

LIMA, A.L.de. **Avaliação de Metodologias de Análise de Unidades Estacionárias de Produção de Petróleo Offshore**. 2006. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LIMA, A. L. **Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Offshore Considerando Aspectos do Projeto de Risers**. 2011. 206 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro.

NEUBECKER, S. R. O'NEILL M. P. **Study of chain slippage for embedded anchors**. 2004. Offshore Technology Conference, OTC 16445, Houston.

NEUBECKER, S. R.; RANDOLPH M. F. **Profile and Frictional Capacity of Embedded Anchor Chains**. 1995. *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 121, No. II, November, 1995. Paper No. 9173.

POULOS H. G.; DAVIS E. H. **Pile Foundation Analysis and design**. John Wiley & Sons, Inc. 1980. 397 p. (Series in geotechnical engineering)

RANDOLPH, M. CASSIDY, M. GOURVENEC, S. ERBRICH, C. **Challenges of offshore geotechnical engineering**. XVI ICSMGE, Osaka, 2005. Millpress Vol. 1.

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

SARAMAGO, R. P. **Estudo da influência da compactação no comportamento de muros de solo reforçado com a utilização de modelos físicos**. 2002. 294p. Tese – COPPE/UFRJ. D,Sc. Engenharia Civil. Rio de Janeiro.

SKEMPTON, A. W. **The bearing capacity of clays**. Proc. Building Research Congress, vol 1. 1951. Pp. 180-189. Inglaterra.

STRACKE, F. **Fluidização de Solo Arenoso Associada À injeção de Agente Cimentante para Ancoragem de Estruturas Offshore**. 202. 181p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

REESE, L. C. **A design method for na anchor pile in a mooring system**. 1973. 5th Annual offshore Technology Conference, OTC 1745, Houston.

TAYLOR, R. J. LEE, H. J. Direct embedment anchor holding capacity. 1972. NCEL TN-1245

TECHNICAL REPORT: Joint Industry Project – Deep water anchors – User's Manual DIGIN ver. 5.3. Report 96-3637. 1996.

TOMLINSON, M. J. **Pile design and construction practice**. 1997. E & FN SPON. 4th edition. Londres.

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

VELLOSO, D. A. LOPES, R. L. **Fundações, volume 2: Fundações profundas**. 2010. Oficina de Textos. São Paulo.

VIVATRAT, V; VALENT P. J., PONTERIO A. A. **The Influence of Chain Friction on Anchor Pile Design**. In: Proceedings of the 14th annual offshore technology conference, OTC, 4178. Houston, USA. 1982.

WANG, L. YUAN, F. Three-dimensional interaction between anchor chain and seabed. 2010. Journal Elsevier. Applied Ocean Research.

YEN, B. C. TOFANI, G. D. **Soil resistance to stud link chain**. 1984. 16th Annual Offshore Technology Conference, OTC 4769, Houston.

APÊNDICE A – Análises do DIGIN para argila A (w=100%)

Esc. Reduzida		Esc. Real	
β (°)	F (kgf)	β (°)	F (kN)
			Folhal (kN)
		18500,00	15993,28

2506,720
86,450162

w = 2,825 kN/m
d = 0,480 m
 $\alpha = 0,221$ adim

Et = 8,000 adim
En = 2,000 adim
Nc = 5,987 adim
5,7473

0,00
0,000
correção α
correção Nc

z (m)	x (m)	Su (kN/m ²)	Δs (m)	θ (rad)	$\Delta\theta$ (rad)	F (kN/m)	w.sin θ (kN/m)	[T1-T2] (kN)	T2 (kN)	Q1 (kN/m)	w.cos θ (kN/m)	T2 (kN)	$\Delta\theta$ corr. (rad)	θ corr. (rad)	xcorr. (m)
0,00	21,36	58,12	0,4801	0,5897	0,0046	49,219	1,5711	24,3842	18500,00	334,059	2,3478	18500,00	0,00861	0,55935	21,356
-0,27	20,96	58,12	0,4798	0,5926	0,0029	49,220	1,5779	24,3737	18475,62	334,061	2,3413	18475,62	0,00861	0,55797	20,929
-0,54	20,56	58,13	0,4801	0,5972	0,0046	49,221	1,5887	24,3945	18451,24	334,072	2,3360	18451,24	0,00863	0,55766	20,509
-0,81	20,16	58,12	0,4796	0,6030	0,0058	49,225	1,6022	24,3762	18426,85	334,096	2,3267	18426,85	0,00863	0,55824	20,094
-1,08	19,77	58,14	0,4807	0,6065	0,0034	49,231	1,6102	24,4408	18402,47	334,138	2,3212	18402,47	0,00867	0,55930	19,684
-1,35	19,37	58,15	0,4794	0,6135	0,0070	49,240	1,6264	24,3863	18378,03	334,201	2,3099	18378,03	0,00866	0,60256	19,278
-1,63	18,98	58,16	0,4798	0,6181	0,0046	49,253	1,6370	24,4149	18353,64	334,290	2,3024	18353,64	0,00868	0,61124	18,877
-1,91	18,59	58,18	0,4805	0,6273	0,0092	49,270	1,6581	24,4693	18329,23	334,406	2,2872	18329,23	0,00871	0,61995	18,480
-2,19	18,20	58,21	0,4798	0,6360	0,0087	49,292	1,6780	24,4563	18304,76	334,555	2,2727	18304,76	0,00871	0,62866	18,085
-2,47	17,81	58,24	0,4800	0,6435	0,0075	49,320	1,6950	24,4871	18280,30	334,741	2,2600	18280,30	0,00873	0,63739	17,693
-2,76	17,43	58,28	0,4802	0,6510	0,0075	49,353	1,7119	24,5221	18255,82	334,966	2,2472	18255,82	0,00875	0,64614	17,304
-3,05	17,05	58,33	0,4797	0,6598	0,0088	49,393	1,7315	24,5224	18231,29	335,236	2,2321	18231,29	0,00876	0,65490	16,918
-3,35	16,67	58,38	0,4806	0,6689	0,0091	49,439	1,7518	24,6002	18206,77	335,552	2,2162	18206,77	0,00880	0,66370	16,535
-3,64	16,29	58,45	0,4801	0,6777	0,0088	49,494	1,7712	24,6113	18182,12	335,922	2,2008	18182,12	0,00881	0,67251	16,154
-3,94	15,92	58,52	0,4796	0,6865	0,0088	49,557	1,7905	24,6282	18157,56	336,347	2,1851	18157,56	0,00883	0,68134	15,776
-4,25	15,55	58,61	0,4800	0,6939	0,0075	49,628	1,8068	24,6893	18132,93	336,833	2,1717	18132,93	0,00886	0,69020	15,401
-4,56	15,18	58,70	0,4796	0,7027	0,0088	49,709	1,8258	24,7183	18108,24	337,383	2,1557	18108,24	0,00888	0,69907	15,030
-4,87	14,81	58,81	0,4807	0,7118	0,0090	49,800	1,8453	24,8270	18083,52	338,001	2,1391	18083,52	0,00893	0,70800	14,661
-5,18	14,45	58,93	0,4798	0,7190	0,0072	49,902	1,8607	24,8342	18058,70	338,694	2,1257	18058,70	0,00894	0,71694	14,294
-5,50	14,09	59,06	0,4802	0,7294	0,0104	50,016	1,8827	24,9200	18033,86	339,463	2,1062	18033,86	0,00898	0,72593	13,932
-5,82	13,73	59,21	0,4800	0,7382	0,0088	50,141	1,9012	24,9779	18008,94	340,316	2,0895	18008,94	0,00901	0,73494	13,571
-6,14	13,37	59,38	0,4798	0,7471	0,0088	50,280	1,9196	25,0438	17983,97	341,257	2,0727	17983,97	0,00905	0,74399	13,214
-6,46	13,02	59,56	0,4804	0,7545	0,0074	50,432	1,9349	25,1547	17958,92	342,290	2,0584	17958,92	0,00910	0,75309	12,860
-6,79	12,67	59,75	0,4795	0,7648	0,0103	50,599	1,9559	25,2009	17933,77	343,420	2,0384	17933,77	0,00913	0,76222	12,509
-7,13	12,33	59,97	0,4802	0,7721	0,0074	50,780	1,9709	25,3293	17908,57	344,652	2,0239	17908,57	0,00919	0,77140	12,161
-7,46	11,98	60,20	0,4801	0,7810	0,0088	50,977	1,9887	25,4306	17883,24	345,991	2,0064	17883,24	0,00924	0,78064	11,816
-7,80	11,64	60,45	0,4794	0,7913	0,0103	51,191	2,0093	25,5057	17857,81	347,442	1,9858	17857,81	0,00927	0,78991	11,475
-8,14	11,30	60,73	0,4809	0,8001	0,0088	51,422	2,0267	25,7029	17832,30	349,011	1,9680	17832,30	0,00936	0,79927	11,137
-8,48	10,97	61,02	0,4796	0,8090	0,0089	51,673	2,0441	25,7599	17806,60	350,709	1,9499	17806,60	0,00939	0,80867	10,802
-8,83	10,64	61,34	0,4797	0,8178	0,0088	51,941	2,0613	25,9033	17780,84	352,531	1,9317	17780,84	0,00946	0,81812	10,470
-9,18	10,31	61,68	0,4806	0,8281	0,0102	52,229	2,0810	26,0996	17754,93	354,488	1,9105	17754,93	0,00954	0,82767	10,143
-9,54	9,99	62,04	0,4794	0,8371	0,0090	52,539	2,0980	26,1905	17728,83	356,592	1,8918	17728,83	0,00959	0,83726	9,817
-9,89	9,66	62,44	0,4803	0,8473	0,0102	52,870	2,1173	26,4125	17702,64	358,837	1,8702	17702,64	0,00969	0,84694	9,496
-10,25	9,35	62,85	0,4799	0,8547	0,0074	53,224	2,1311	26,5631	17676,23	361,242	1,8544	17676,23	0,00976	0,85670	9,178
-10,61	9,03	63,30	0,4803	0,8665	0,0118	53,601	2,1528	26,7779	17649,67	363,799	1,8293	17649,67	0,00985	0,86655	8,864
-10,98	8,72	63,77	0,4800	0,8769	0,0104	54,003	2,1717	26,9646	17622,89	366,529	1,8068	17622,89	0,00993	0,87648	8,553
-11,35	8,41	64,28	0,4798	0,8843	0,0075	54,431	2,1851	27,1556	17595,93	369,432	1,7905	17595,93	0,01002	0,88651	8,246
-11,72	8,11	64,81	0,4802	0,8961	0,0117	54,884	2,2060	27,4166	17568,77	372,507	1,7648	17568,77	0,01013	0,89664	7,944
-12,09	7,81	65,38	0,4799	0,9035	0,0075	55,366	2,2191	27,6370	17541,35	375,776	1,7482	17541,35	0,01023	0,90687	7,644
-12,47	7,51	65,98	0,4798	0,9140	0,0104	55,875	2,2372	27,8845	17513,72	379,229	1,7250	17513,72	0,01034	0,91722	7,349
-12,85	7,22	66,62	0,4806	0,9256	0,0117	56,413	2,2572	28,1968	17485,83	382,882	1,6988	17485,83	0,01048	0,92769	7,058
-13,24	6,93	67,29	0,4792	0,9365	0,0108	56,983	2,2755	28,3978	17457,64	386,752	1,6742	17457,64	0,01057	0,93826	6,770
-13,62	6,65	68,00	0,4799	0,9452	0,0087	57,583	2,2900	28,7318	17429,24	390,826	1,6542	17429,24	0,01072	0,94898	6,487
-14,01	6,37	68,75	0,4808	0,9568	0,0116	58,216	2,3091	29,1011	17400,51	395,122	1,6275	17400,51	0,01087	0,95985	6,203
-14,40	6,09	69,54	0,4796	0,9678	0,0109	58,885	2,3267	29,5055	17371,41	399,659	1,6022	17371,41	0,01099	0,97084	5,938
-14,80	5,82	70,37	0,4798	0,9782	0,0104	59,586	2,3433	29,7152	17342,05	404,422	1,5779	17342,05	0,01115	0,98199	5,663
-15,20	5,55	71,24	0,4801	0,9886	0,0104	60,324	2,3596	30,0946	17312,33	409,430	1,5534	17312,33	0,01131	0,99330	5,397
-15,60	5,28	72,15	0,4799	1,0007	0,0121	61,100	2,3782	30,4625	17282,24	414,692	1,5247	17282,24	0,01147	1,00477	5,136
-16,00	5,03	73,11	0,4806	1,0140	0,0133	61,913	2,3982	30,9084	17251,78	420,215	1,4930	17251,78	0,01166	1,01644	4,879
-16,41	4,77	74,13	0,4794	1,0221	0,0082	62,769	2,4104	31,2440	17220,87	426,022	1,4733	17220,87	0,01182	1,02825	4,625
-16,82	4,52	75,18	0,4802	1,0354	0,0132	63,661	2,4297	31,7370	17189,62	432,079	1,4413	17189,62	0,01203	1,04028	4,380
-17,23	4,28	76,29	0,4798	1,0493	0,0139	64,598	2,4495	32,1673	17157,89	438,437	1,4073	17157,89	0,01222	1,05250	4,138
-17,65	4,04	77,44	0,4804	1,0597	0,0103	65,579	2,4639	32,6878	17125,72	445,092	1,3819	17125,72	0,01245	1,06495	3,901
-18,07	3,80	78,65	0,4797	1,0708	0,0111	66,604	2,4792	33,1413	17093,03	452,051	1,3544	17093,03	0,01265	1,07760	3,668
-18,49	3,57	79,92	0,4804	1,0857	0,0150	67,673	2,4991	33,7120	17059,89	459,307	1,3172	17059,89	0,01290	1,09050	3,442
-18,91	3,35	81,24	0,4799	1,0969	0,0112	68,792	2,5137	34,2187	17026,18	466,904	1,2892	17026,18	0,01312	1,10362	3,221
-19,34	3,13	82,62	0,4799	1,1109	0,0140	69,958	2,5314	34,7850	16991,96	474,815	1,2540	16991,96	0,01337	1,11699	3,005
-19,77	2,92	84,05	0,4804	1,1230	0,0121	71,174	2,5464	35,4128	16957,17	483,067	1,2232	16957,17	0,01365	1,13064	2,796
-20,20	2,71	85,55	0,4792	1,1380	0,0150	72,441	2,5645	35,9423	16921,76	491,670	1,1850	16921,76	0,01389	1,14453	2,592
-20,64	2,51	87,10	0,4808	1,1509	0,0129	73,759	2,5796	36,7011	16885,82	500,613	1,1517	16885,82	0,01422	1,15875	2,394
-21,08	2,31	88,73	0,4798	1,1659	0,0150	75,134	2,5966	37,2948	16849,12	509,948	1,1128	16849,12	0,01449	1,17324	2,202
-21,52	2,12	90,41	0,4802	1,1798	0,0139	76,563	2,6118	38,0223	16811,82	519,642	1,0765	16811,82	0,01481	1,18806	2,017
-21,96	1,94	92,17	0,4795	1,1949	0,0151	78,049	2,6278	38,6819	16773,80	529,727	1,0370	16773,80			

APÊNDICE B – Análises do DIGIN para argila B (w=120%)

Esc. Reduzida		Esc. Real	
β (°)	F (kgf)	β (°)	F (kN)
		12000,00	11187,7

812,30000

w = 2,825 kN/m
 d = 0,480 m
 α = 0,227 adim

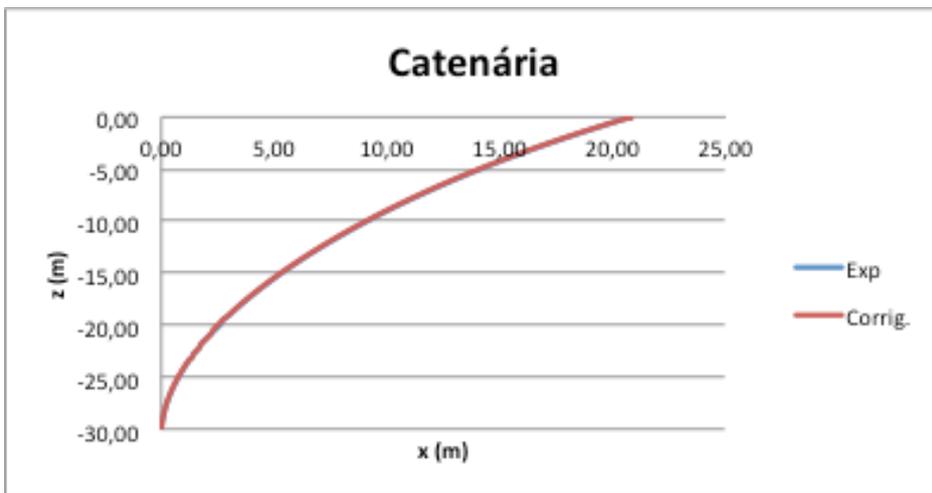
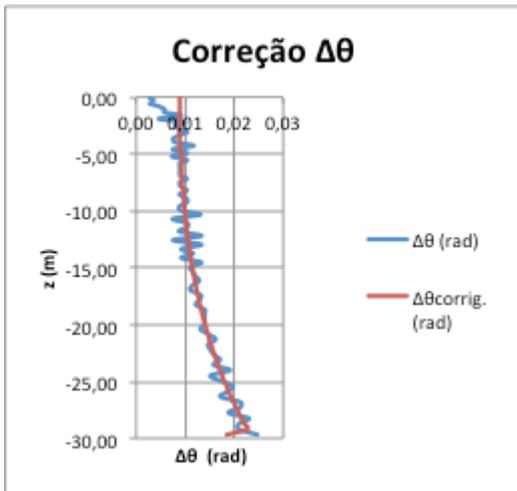
Et = 8,000 adim
 En = 2,000 adim
 Nc = 5,758 adim

0,00 correção α
 0,00 correção Nc

z(m)	x(m)	Su (kN/m ²)	Δs (m)	θ (rad)	$\Delta\theta$ (rad)	F (kN/m)	w.sin θ (kN/m)	[T1-T2] (kN)	T2 (kN)	Q (kN/m)	w.cos θ (kN/m)	T2 (kN)	$\Delta\theta$ corr (rad)	θ corr (rad)	xcorr (m)
0,00	31,12	15,86	0,47982	0,58511	-0,00462	13,48871	1,56023	7,22075	12000,00	85,45	2,355	12000,00	0,00332	0,57578	31,12
-0,27	30,72	15,83	0,47982	0,58511	-0,00000	13,81584	1,56023	7,37771	11992,78	87,52	2,355	11992,78	0,00341	0,57919	30,71
-0,53	30,32	16,06	0,48009	0,58974	0,00462	14,01099	1,57110	7,48087	11985,40	88,76	2,348	11985,40	0,00346	0,58265	30,30
-0,80	29,92	16,25	0,48009	0,58974	0,00000	14,17658	1,57110	7,56036	11977,92	89,81	2,348	11977,92	0,00351	0,58616	29,90
-1,06	29,52	16,42	0,48009	0,58974	0,00000	14,32471	1,57110	7,63148	11970,36	90,74	2,348	11970,36	0,00355	0,58970	29,50
-1,33	29,12	16,57	0,47955	0,59552	0,00579	14,46111	1,58466	7,69477	11962,73	91,61	2,339	11962,73	0,00358	0,59328	29,10
-1,60	28,72	16,72	0,48068	0,59897	0,00344	14,58974	1,59270	7,77852	11955,03	92,42	2,333	11955,03	0,00362	0,59690	28,70
-1,87	28,33	16,86	0,47903	0,60132	0,00235	14,71239	1,59819	7,81319	11947,26	93,20	2,329	11947,26	0,00364	0,60055	28,30
-2,14	27,93	16,99	0,48016	0,60475	0,00343	14,82938	1,60618	7,89171	11939,44	93,94	2,324	11939,44	0,00368	0,60423	27,90
-2,42	27,54	17,12	0,48096	0,60936	0,00461	14,94245	1,61687	7,95642	11931,55	94,66	2,317	11931,55	0,00372	0,60795	27,51
-2,69	27,14	17,25	0,48023	0,61226	0,00290	15,05222	1,62358	8,00829	11923,59	95,35	2,312	11923,59	0,00375	0,61170	27,11
-2,97	26,75	17,37	0,47999	0,61516	0,00290	15,15878	1,63029	8,05863	11915,59	96,03	2,307	11915,59	0,00378	0,61547	26,72
-3,24	26,36	17,49	0,47952	0,62098	0,00581	15,26252	1,63677	8,10688	11907,53	96,68	2,298	11907,53	0,00380	0,61927	26,33
-3,52	25,97	17,61	0,48010	0,62277	0,00169	15,36414	1,64756	8,16739	11899,42	97,33	2,295	11899,42	0,00383	0,62311	25,94
-3,80	25,58	17,72	0,48046	0,62727	0,00460	15,46352	1,65809	8,22631	11891,25	97,96	2,287	11891,25	0,00387	0,62697	25,55
-4,08	25,19	17,83	0,47944	0,63140	0,00414	15,56124	1,66754	8,26008	11883,03	98,58	2,280	11883,03	0,00389	0,63086	25,16
-4,37	24,80	17,94	0,48062	0,63476	0,00336	15,65712	1,67519	8,33022	11874,77	99,18	2,275	11874,77	0,00392	0,63478	24,77
-4,65	24,41	18,05	0,47961	0,63891	0,00415	15,75166	1,68462	8,36252	11866,44	99,78	2,268	11866,44	0,00394	0,63872	24,38
-4,94	24,03	18,16	0,48000	0,64350	0,00459	15,84465	1,69500	8,41903	11858,07	100,37	2,260	11858,07	0,00397	0,64269	24,00
-5,23	23,64	18,26	0,47980	0,64842	0,00292	15,93655	1,70159	8,46281	11849,65	100,95	2,255	11849,65	0,00400	0,64669	23,61
-5,52	23,26	18,37	0,48021	0,65300	0,00458	16,02712	1,71189	8,51851	11841,19	101,53	2,247	11841,19	0,00403	0,65072	23,23
-5,81	22,88	18,47	0,48003	0,65392	0,00292	16,11677	1,71845	8,56137	11832,67	102,10	2,242	11832,67	0,00405	0,65477	22,85
-6,10	22,50	18,57	0,47966	0,65976	0,00585	16,20527	1,73153	8,60363	11824,11	102,66	2,232	11824,11	0,00407	0,65884	22,47
-6,39	22,12	18,67	0,48028	0,66141	0,00165	16,293	1,73520	8,65853	11815,51	103,21	2,229	11815,51	0,00410	0,66295	22,09
-6,69	21,74	18,77	0,47994	0,66726	0,00585	16,37971	1,74820	8,70023	11806,85	103,76	2,219	11806,85	0,00413	0,66707	21,71
-6,98	21,36	18,87	0,48039	0,67182	0,00456	16,46577	1,75830	8,75471	11798,15	104,31	2,211	11798,15	0,00416	0,67123	21,33
-7,28	20,99	18,97	0,47945	0,67604	0,00423	16,55122	1,76764	8,78304	11789,40	104,85	2,204	11789,40	0,00417	0,67540	20,96
-7,58	20,61	19,06	0,48071	0,67929	0,00325	16,63581	1,77478	8,85011	11780,61	105,38	2,198	11780,61	0,00421	0,67961	20,58
-7,89	20,24	19,16	0,47978	0,68353	0,00424	16,71987	1,78088	8,87791	11771,76	105,92	2,190	11771,76	0,00423	0,68384	20,21
-8,19	19,87	19,26	0,48028	0,68807	0,00454	16,80317	1,79402	8,93180	11762,88	106,44	2,182	11762,88	0,00426	0,68810	19,84
-8,49	19,50	19,35	0,47937	0,69233	0,00426	16,88601	1,80330	8,95912	11753,95	106,97	2,175	11753,95	0,00427	0,69237	19,47
-8,80	19,13	19,44	0,47988	0,69687	0,00454	16,96816	1,81315	9,01283	11744,99	107,49	2,166	11744,99	0,00430	0,69668	19,10
-9,11	18,76	19,54	0,47976	0,69981	0,00294	17,04991	1,81950	9,05279	11735,98	108,01	2,161	11735,98	0,00433	0,70100	18,73
-9,42	18,39	19,63	0,48029	0,70434	0,00453	17,13102	1,82927	9,10641	11726,93	108,52	2,153	11726,93	0,00436	0,70536	18,36
-9,73	18,03	19,73	0,48007	0,71021	0,00587	17,21188	1,84188	9,14705	11717,82	109,03	2,142	11717,82	0,00438	0,70974	18,00
-10,04	17,66	19,82	0,47996	0,71315	0,00294	17,29225	1,84816	9,18670	11708,67	109,54	2,137	11708,67	0,00440	0,71414	17,63
-10,35	17,30	19,91	0,47977	0,71903	0,00588	17,37214	1,86069	9,22729	11699,49	110,05	2,127	11699,49	0,00443	0,71857	17,27
-10,67	16,94	20,00	0,48034	0,72553	0,00450	17,45175	1,87025	9,28108	11690,26	110,55	2,117	11690,26	0,00446	0,72302	16,91
-10,99	16,58	20,09	0,48025	0,73247	0,00294	17,53109	1,87646	9,32952	11680,98	111,06	2,112	11680,98	0,00448	0,72750	16,55
-11,31	16,22	20,18	0,47943	0,73800	0,00433	17,60994	1,88559	9,34666	11671,66	111,56	2,104	11671,66	0,00450	0,73200	16,19
-11,63	15,86	20,27	0,48069	0,73684	0,00604	17,68831	1,89252	9,41511	11662,31	112,05	2,092	11662,31	0,00453	0,73653	15,83
-11,95	15,51	20,36	0,47921	0,73964	0,00280	17,76671	1,90411	9,42651	11652,90	112,55	2,087	11652,90	0,00454	0,74107	15,48
-12,27	15,15	20,45	0,48050	0,74565	0,00601	17,84442	1,91663	9,49528	11643,47	113,04	2,075	11643,47	0,00458	0,74565	15,12
-12,60	14,80	20,54	0,47972	0,75001	0,00436	17,92219	1,92566	9,52138	11633,97	113,53	2,067	11633,97	0,00460	0,75025	14,77
-12,93	14,45	20,63	0,48036	0,75448	0,00447	17,99953	1,93487	9,57559	11624,45	114,02	2,058	11624,45	0,00463	0,75488	14,42
-13,26	14,10	20,71	0,47959	0,75886	0,00438	18,07671	1,94386	9,60161	11614,88	114,51	2,050	11614,88	0,00464	0,75952	14,07
-13,59	13,75	20,80	0,48024	0,76331	0,00445	18,15351	1,95297	9,65599	11605,28	115,00	2,041	11605,28	0,00467	0,76419	13,72
-13,92	13,40	20,89	0,48019	0,76920	0,00589	18,23015	1,96496	9,69746	11595,62	115,48	2,030	11595,62	0,00470	0,76889	13,38
-14,25	13,06	20,98	0,48017	0,77214	0,00294	18,30667	1,97093	9,73655	11585,92	115,97	2,024	11585,92	0,00472	0,77361	13,03
-14,59	12,71	21,07	0,48014	0,77803	0,00589	18,38283	1,98281	9,77833	11576,19	116,45	2,012	11576,19	0,00475	0,77836	12,69
-14,92	12,37	21,15	0,47942	0,78245	0,00441	18,45887	1,99168	9,80441	11566,41	116,93	2,003	11566,41	0,00476	0,78312	12,35
-15,26	12,03	21,24	0,48013	0,78687	0,00442	18,53458	2,00052	9,85943	11556,60	117,41	1,995	11556,60	0,00480	0,78792	12,01
-15,60	11,69	21,33	0,48014	0,79276	0,00589	18,61019	2,01223	9,90162	11546,74	117,89	1,983	11546,74	0,00482	0,79274	11,67
-15,94	11,36	21,41	0,47945	0,79720	0,00444	18,6857	2,02101	9,92787	11536,84	118,37	1,974	11536,84	0,00484	0,79758	11,33
-16,29	11,02	21,50	0,48019	0,80160	0,00440	18,76091	2,02967	9,98340	11526,91	118,85	1,965	11526,91	0,00487	0,80245	11,00
-16,63	10,69	21,58	0,48024	0,80749	0,00589	18,83604	2,04121	10,02615	11516,93	119,32	1,953	11516,93	0,00489	0,80734	10,66
-16,98	10,36	21,67	0,48026	0,81043	0,00294	18,91111	2,04695	10,06565	11506,90	119,80	1,947	11506,90	0,00492	0,81226	10,33
-17,33	10,02	21,76	0,47967	0,81784	0,00741	18,98587	2,05131	10,09572	11496,84	120,27	1,932	11496,84	0,00494	0,81720	10,00
-17,68	9,70	21,84	0,47972	0,82078	0,00295	19,06059	2,06699	10,13529	11486,74	120,74	1,926	11486,74	0,00496	0,82216	9,67
-18,03	9,37	21,93	0,47983	0,82667	0,00589	19,13503	2,07830	10,17873	11476,61	121,22	1,913	11476,61	0,00499	0,82715	9,35
-18,38	9,04	22,01	0,48063	0,83102	0,00435	19,20943	2,08660	10,23542	11466,43	121,69	1,904	11466,43	0,00502	0,83217	9,02
-18,74	8,72	22,10	0,47935	0,83705	0,00603	19,28378	2,09805	10,24939	11456,19	122,16	1,892	11456,19	0,00503	0,83720	8,70

APÊNDICE C – Retro análises para argila A (w=100)

Esc. Reduzida		Esc. Real		w = 2,825 d = 0,480 α = 0,227	kN/m m adim	Et = 8,000 En = 2,000 Nc = 5,776	adim adim adim	0,00 0,000	correção α correção Nc						
β (°)	F (kgf)	β (°)	F (kN)												
			8789,76	7013,23802	1776,522										
z (m)	x (m)	Su (kN/m²)	Δs (m)	θ (rad)	Δθ (rad)	F (kN/m)	w.sinθ (kN/m)	[T1-T2] (kN)	T2 (kN)	Q (kN/m)	w.cosθ (kN/m)	T2 (kN)	Δθcorr. (rad)	Bcorr. (rad)	xcorr. (m)
0,00	18,040	58,12	0,4177	0,7704	0,0069	50,696	1,9674	21,9986	8789,76	322,317	2,0273	8789,76	0,01522	-0,30374	18,040
-0,29	17,740	58,12	0,4147	0,7774	0,0070	50,696	1,9816	21,8468	8767,76	322,319	2,0134	8767,76	0,01515	-0,28859	18,968
-0,58	17,445	58,13	0,4118	0,7843	0,0069	50,698	1,9954	21,7017	8745,91	322,332	1,9997	8745,91	0,01508	-0,27351	19,948
-0,87	17,153	58,13	0,4091	0,7911	0,0068	50,703	2,0089	21,5635	8724,21	322,361	1,9862	8724,21	0,01502	-0,25848	20,985
-1,16	16,865	58,14	0,4064	0,7977	0,0066	50,710	2,0220	21,4326	8702,65	322,410	1,9729	8702,65	0,01497	-0,24352	22,085
-1,45	16,582	58,15	0,4039	0,8041	0,0064	50,722	2,0347	21,3089	8681,22	322,483	1,9598	8681,22	0,01491	-0,22860	23,256
-1,75	16,301	58,17	0,4015	0,8104	0,0063	50,738	2,0469	21,1927	8659,91	322,584	1,9470	8659,91	0,01487	-0,21374	24,506
-2,04	16,025	58,20	0,3992	0,8165	0,0061	50,758	2,0587	21,0840	8638,72	322,715	1,9345	8638,72	0,01482	-0,19892	25,847
-2,33	15,751	58,23	0,3970	0,8224	0,0059	50,784	2,0701	20,9828	8617,63	322,880	1,9223	8617,63	0,01479	-0,18413	27,290
-2,62	15,481	58,26	0,3949	0,8281	0,0057	50,816	2,0810	20,8893	8596,65	323,081	1,9105	8596,65	0,01475	-0,16938	28,852
-2,91	15,214	58,31	0,3929	0,8336	0,0055	50,854	2,0915	20,8035	8575,76	323,320	1,8990	8575,76	0,01473	-0,15465	30,553
-3,20	14,950	58,36	0,3911	0,8389	0,0053	50,898	2,1016	20,7254	8554,96	323,602	1,8879	8554,96	0,01471	-0,13994	32,419
-3,49	14,689	58,41	0,3893	0,8440	0,0051	50,949	2,1111	20,6552	8534,23	323,926	1,8772	8534,23	0,01469	-0,12525	34,484
-3,78	14,430	58,48	0,3876	0,8488	0,0049	51,007	2,1202	20,5927	8513,58	324,297	1,8669	8513,58	0,01468	-0,11057	36,795
-4,07	14,174	58,56	0,3860	0,8535	0,0046	51,073	2,1288	20,5382	8492,98	324,717	1,8571	8492,98	0,01468	-0,09590	39,415
-4,36	13,920	58,64	0,3846	0,8579	0,0044	51,147	2,1370	20,4916	8472,44	325,186	1,8477	8472,44	0,01468	-0,08122	42,439
-4,65	13,669	58,74	0,3832	0,8620	0,0041	51,229	2,1446	20,4530	8451,95	325,709	1,8388	8451,95	0,01468	-0,06654	46,013
-4,95	13,419	58,84	0,3819	0,8659	0,0039	51,320	2,1517	20,4224	8431,50	326,285	1,8305	8431,50	0,01470	-0,05184	50,378
-5,24	13,172	58,95	0,3808	0,8695	0,0036	51,420	2,1584	20,3999	8411,08	326,919	1,8226	8411,08	0,01472	-0,03712	55,985
-5,53	12,926	59,08	0,3797	0,8729	0,0034	51,528	2,1646	20,3856	8390,68	327,611	1,8153	8390,68	0,01474	-0,02238	63,817
-5,82	12,682	59,21	0,3787	0,8761	0,0031	51,647	2,1702	20,3794	8370,29	328,363	1,8085	8370,29	0,01477	-0,00761	76,812
-6,11	12,440	59,36	0,3778	0,8789	0,0029	51,775	2,1754	20,3816	8349,91	329,178	1,8023	8349,91	0,01481	0,00720	115,045
-6,40	12,199	59,52	0,3770	0,8815	0,0026	51,913	2,1800	20,3920	8329,53	330,057	1,7967	8329,53	0,01486	0,02206	174,659
-6,69	11,959	59,69	0,3763	0,8838	0,0023	52,062	2,1841	20,4109	8309,14	331,001	1,7917	8309,14	0,01491	0,03697	251,474
-6,98	11,720	59,87	0,3756	0,8858	0,0020	52,221	2,1878	20,4382	8288,73	332,014	1,7873	8288,73	0,01497	0,05193	353,608
-7,27	11,483	60,07	0,3751	0,8876	0,0017	52,391	2,1909	20,4742	8268,29	333,095	1,7835	8268,29	0,01503	0,06696	483,011
-7,56	11,246	60,28	0,3747	0,8890	0,0015	52,572	2,1935	20,5188	8247,82	334,248	1,7803	8247,82	0,01510	0,08207	643,674
-7,85	11,010	60,50	0,3743	0,8902	0,0012	52,765	2,1956	20,5723	8227,30	335,474	1,7777	8227,30	0,01518	0,09725	847,350
-8,15	10,774	60,73	0,3740	0,8911	0,0009	52,970	2,1971	20,6346	8206,72	336,774	1,7757	8206,72	0,01527	0,11252	1105,875
-8,44	10,539	60,98	0,3739	0,8917	0,0006	53,186	2,1982	20,7060	8186,09	338,149	1,7744	8186,09	0,01536	0,12788	1434,500
-8,73	10,304	61,24	0,3738	0,8920	0,0003	53,415	2,1987	20,7865	8165,38	339,603	1,7738	8165,38	0,01546	0,14334	1838,318
-9,02	10,069	61,52	0,3738	0,8920	0,0000	53,656	2,1988	20,8764	8144,60	341,135	1,7737	8144,60	0,01557	0,15892	2400,302
-9,31	9,835	61,81	0,3738	0,8917	-0,0003	53,909	2,1983	20,9757	8123,72	342,749	1,7743	8123,72	0,01569	0,17461	3148,847
-9,60	9,600	62,11	0,3740	0,8912	-0,0005	54,176	2,1974	21,0831	8102,74	344,444	1,7754	8102,74	0,01582	0,19042	4088,838
-9,89	9,365	62,44	0,3741	0,8910	-0,0003	54,456	2,1969	21,1924	8081,66	346,224	1,7760	8081,66	0,01594	0,20637	5329,329
-10,18	9,130	62,77	0,3741	0,8910	0,0000	54,749	2,1969	21,3021	8060,47	348,088	1,7760	8060,47	0,01607	0,22244	7000,939
-10,47	8,895	63,12	0,3740	0,8912	0,0003	55,056	2,1974	21,4122	8039,17	350,039	1,7754	8039,17	0,01620	0,23864	9253,253
-10,76	8,660	63,49	0,3738	0,8918	0,0006	55,377	2,1984	21,5228	8017,76	352,079	1,7741	8017,76	0,01633	0,25497	12147,587
-11,05	8,425	63,88	0,3736	0,8927	0,0008	55,712	2,1999	21,6337	7996,23	354,207	1,7723	7996,23	0,01646	0,27144	15614,204
-11,35	8,190	64,28	0,3732	0,8938	0,0011	56,061	2,2019	21,7451	7974,60	356,427	1,7698	7974,60	0,01660	0,28804	19896,296
-11,64	7,957	64,69	0,3728	0,8952	0,0014	56,424	2,2044	21,8569	7952,85	358,740	1,7667	7952,85	0,01673	0,30477	25014,314
-11,93	7,724	65,13	0,3723	0,8969	0,0017	56,803	2,2074	21,9692	7931,00	361,146	1,7629	7931,00	0,01687	0,32164	31189,879
-12,22	7,491	65,58	0,3717	0,8989	0,0020	57,196	2,2110	22,0818	7909,03	363,647	1,7585	7909,03	0,01701	0,33865	38516,156
-12,51	7,260	66,05	0,3710	0,9012	0,0023	57,605	2,2150	22,1949	7886,95	366,245	1,7534	7886,95	0,01715	0,35580	47219,690
-12,80	7,030	66,53	0,3703	0,9038	0,0026	58,029	2,2195	22,3084	7864,75	368,941	1,7477	7864,75	0,01729	0,37308	57490,907
-13,09	6,800	67,04	0,3694	0,9066	0,0029	58,469	2,2245	22,4222	7842,44	371,736	1,7413	7842,44	0,01743	0,39051	69414,164
-13,38	6,573	67,56	0,3685	0,9098	0,0032	58,924	2,2301	22,5364	7820,02	374,632	1,7342	7820,02	0,01757	0,40809	83158,458
-13,67	6,347	68,10	0,3675	0,9133	0,0035	59,395	2,2361	22,6510	7797,48	377,629	1,7264	7797,48	0,01772	0,42580	98820,785
-13,96	6,122	68,66	0,3664	0,9171	0,0038	59,883	2,2427	22,7659	7774,83	380,730	1,7179	7774,83	0,01786	0,44367	116742,143
-14,25	5,899	69,24	0,3653	0,9213	0,0041	60,387	2,2497	22,8812	7752,07	383,935	1,7086	7752,07	0,01801	0,46168	137111,531
-14,55	5,678	69,83	0,3641	0,9257	0,0044	60,908	2,2573	22,9967	7729,19	387,246	1,6986	7729,19	0,01816	0,47984	160340,987
-14,84	5,459	70,45	0,3628	0,9305	0,0048	61,446	2,2654	23,1126	7706,19	390,664	1,6878	7706,19	0,01831	0,49815	186710,346
-15,13	5,243	71,09	0,3614	0,9356	0,0051	62,000	2,2740	23,2287	7683,08	394,190	1,6762	7683,08	0,01846	0,51661	216519,853
-15,42	5,028	71,74	0,3600	0,9410	0,0055	62,572	2,2831	23,3451	7659,85	397,826	1,6638	7659,85	0,01862	0,53523	250239,941
-15,71	4,816	72,42	0,3584	0,9469	0,0058	63,161	2,2927	23,4618	7636,50	401,573	1,6505	7636,50	0,01877	0,55400	288080,850
-16,00	4,607	73,11	0,3569	0,9530	0,0062	63,768	2,3029	23,5788	7613,04	405,491	1,6363	7613,04	0,01893	0,57293	330539,880
-16,29	4,400	73,83	0,3552	0,9596	0,0065	64,393	2,3135	23,6960	7589,46	409,403	1,6212	7589,46	0,01909	0,59202	378299,729
-16,58	4,196	74,57	0,3535	0,9665	0,0069	65,036	2,3246	23,8136	7565,77	413,489	1,6052	7565,77	0,01925	0,61126	431970,786



APÊNDICE D – Retro análises para argila B (w=120%)

Esc. Reduzida		Esc. Real		
β (°)	F (kgf)	β (°)	F (kN)	Folha (kN)
55	14	55	8789,76	792,69

797,07

w = 2,825 kN/m
 d = 0,480 m
 α = 0,217 adim

Et = 8,000 adim
 En = 2,000 adim
 Nc = 5,538 adim

0,00 correção α
 0,00 correção Nc

z(m)	x(m)	Su (kN/m ²)	Δs (m)	θ (rad)	$\Delta \theta$ (rad)	F (kN/m)	w.sin θ (kN/m)	[T1-T2] (kN)	T2 (kN)	Q (kN/m)	w.cos θ (kN/m)	T2 (kN)	$\Delta \theta$ corrige (rad)	θ corrige (rad)	xcorrige (m)
0,00	30,04	15,46	0,58461	0,52082	0,00295	12,90819	1,40570	8,36810	8789,76	82,18	2,450	8789,76	0,00530	0,52065	30,04
-0,29	29,53	15,86	0,58132	0,52407	0,00325	13,24157	1,41366	8,51939	8781,39	84,30	2,446	8781,39	0,00542	0,52607	29,53
-0,58	29,03	16,09	0,57777	0,52763	0,00355	13,44046	1,42234	8,58735	8772,87	85,57	2,441	8772,87	0,00547	0,53154	29,03
-0,87	28,53	16,30	0,57441	0,53104	0,00342	13,60803	1,43068	8,63836	8764,29	86,63	2,436	8764,29	0,00552	0,53706	28,53
-1,16	28,04	16,47	0,57096	0,53469	0,00355	13,75802	1,43931	8,67711	8755,65	87,59	2,431	8755,65	0,00555	0,54261	28,05
-1,45	27,54	16,64	0,56749	0,53842	0,00383	13,89616	1,44862	8,70801	8746,97	88,47	2,425	8746,97	0,00558	0,54819	27,57
-1,75	27,06	16,80	0,56392	0,54200	0,00358	14,02559	1,45728	8,73114	8738,26	89,29	2,420	8738,26	0,00561	0,55380	27,09
-2,04	26,57	16,94	0,56033	0,54587	0,00387	14,14811	1,46663	8,74938	8729,53	90,07	2,414	8729,53	0,00563	0,55943	26,62
-2,33	26,09	17,08	0,55683	0,54969	0,00382	14,26506	1,47585	8,76498	8720,78	90,82	2,409	8720,78	0,00564	0,56507	26,15
-2,62	25,62	17,22	0,55308	0,55385	0,00416	14,37733	1,48584	8,77363	8712,02	91,53	2,403	8712,02	0,00566	0,57073	25,70
-2,91	25,15	17,35	0,54951	0,55787	0,00402	14,48562	1,49549	8,78184	8703,24	92,22	2,397	8703,24	0,00567	0,57640	25,24
-3,20	24,68	17,47	0,54587	0,56204	0,00417	14,59043	1,50547	8,78628	8694,46	92,89	2,390	8694,46	0,00568	0,58208	24,79
-3,49	24,22	17,59	0,54215	0,56636	0,00433	14,69219	1,51580	8,78720	8685,67	93,53	2,384	8685,67	0,00569	0,58777	24,32
-3,78	23,76	17,71	0,53844	0,57075	0,00438	14,79123	1,52623	8,78605	8676,89	94,17	2,377	8676,89	0,00570	0,59347	23,85
-4,07	23,31	17,83	0,53466	0,57529	0,00455	14,88781	1,53703	8,78176	8668,10	94,78	2,370	8668,10	0,00570	0,59917	23,38
-4,36	22,86	17,94	0,53081	0,58001	0,00472	14,98218	1,54819	8,77448	8659,32	95,38	2,363	8659,32	0,00570	0,60487	22,91
-4,65	22,42	18,05	0,52719	0,58474	0,00473	15,07453	1,55955	8,76921	8650,54	95,97	2,356	8650,54	0,00571	0,61057	22,44
-4,95	21,98	18,16	0,52322	0,58954	0,00480	15,16505	1,57064	8,75647	8641,78	96,55	2,348	8641,78	0,00570	0,61628	21,97
-5,24	21,54	18,27	0,51949	0,59436	0,00482	15,25382	1,58193	8,74596	8633,02	97,11	2,341	8633,02	0,00570	0,62198	21,51
-5,53	21,11	18,37	0,51552	0,59957	0,00521	15,341	1,59411	8,73034	8624,27	97,67	2,332	8624,27	0,00570	0,62768	21,04
-5,82	20,69	18,47	0,51164	0,60475	0,00518	15,4267	1,60618	8,71477	8615,54	98,21	2,324	8615,54	0,00569	0,63337	21,00
-6,11	20,27	18,57	0,50778	0,61002	0,00526	15,51102	1,61839	8,69805	8606,83	98,75	2,315	8606,83	0,00569	0,63906	20,61
-6,40	19,85	18,67	0,50378	0,61559	0,00557	15,59405	1,63126	8,67770	8598,13	99,28	2,306	8598,13	0,00568	0,64474	20,22
-6,69	19,44	18,77	0,49987	0,62113	0,00554	15,67586	1,64403	8,65761	8589,45	99,80	2,297	8589,45	0,00567	0,65042	19,83
-6,98	19,03	18,87	0,49589	0,62688	0,00575	15,75652	1,65721	8,63527	8580,79	100,31	2,288	8580,79	0,00566	0,65608	19,45
-7,27	18,63	18,96	0,49185	0,63285	0,00596	15,83609	1,67083	8,61074	8572,16	100,82	2,278	8572,16	0,00565	0,66174	19,07
-7,56	18,23	19,06	0,48791	0,63879	0,00594	15,91464	1,68433	8,58663	8563,55	101,32	2,268	8563,55	0,00564	0,66738	18,70
-7,85	17,84	19,15	0,48388	0,64524	0,00645	15,99221	1,69892	8,56040	8554,96	101,81	2,257	8554,96	0,00563	0,67301	18,33
-8,15	17,46	19,24	0,47976	0,65146	0,00623	16,06888	1,71294	8,53092	8546,40	102,30	2,246	8546,40	0,00562	0,67863	17,96
-8,44	17,07	19,33	0,47579	0,65784	0,00637	16,14463	1,72722	8,50323	8537,87	102,78	2,235	8537,87	0,00560	0,68423	17,60
-8,73	16,70	19,42	0,47168	0,66458	0,00674	16,21955	1,74225	8,47230	8529,37	103,26	2,224	8529,37	0,00559	0,68982	17,24
-9,02	16,33	19,51	0,46760	0,67143	0,00686	16,29365	1,75746	8,44074	8520,90	103,73	2,212	8520,90	0,00557	0,69539	16,89
-9,31	15,96	19,60	0,46346	0,67835	0,00711	16,36698	1,77315	8,40731	8512,45	104,20	2,199	8512,45	0,00555	0,70094	16,54
-9,60	15,60	19,69	0,45943	0,68565	0,00710	16,43957	1,78873	8,37459	8504,05	104,66	2,187	8504,05	0,00554	0,70648	16,20
-9,89	15,24	19,77	0,45534	0,69302	0,00737	16,51145	1,80480	8,34009	8495,67	105,12	2,173	8495,67	0,00552	0,71200	15,86
-10,18	14,89	19,86	0,45143	0,70024	0,00722	16,58265	1,82043	8,30764	8487,33	105,57	2,160	8487,33	0,00550	0,71750	15,52
-10,47	14,55	19,94	0,44761	0,70744	0,00720	16,65319	1,83594	8,27600	8479,02	106,02	2,147	8479,02	0,00548	0,72298	15,19
-10,76	14,21	20,03	0,44375	0,71491	0,00747	16,72309	1,85192	8,24268	8470,75	106,46	2,133	8470,75	0,00547	0,72845	14,86
-11,05	13,87	20,11	0,44013	0,72238	0,00747	16,79238	1,86781	8,21288	8462,51	106,91	2,119	8462,51	0,00545	0,73390	14,53
-11,35	13,54	20,19	0,43647	0,72948	0,00710	16,86111	1,88281	8,18120	8454,29	107,34	2,106	8454,29	0,00543	0,73933	14,21
-11,64	13,22	20,27	0,43291	0,73687	0,00739	16,92924	1,89832	8,15055	8446,11	107,78	2,092	8446,11	0,00542	0,74475	13,89
-11,93	12,90	20,35	0,42936	0,74438	0,00751	16,99682	1,91398	8,11960	8437,96	108,21	2,078	8437,96	0,00540	0,75015	13,57
-12,22	12,58	20,43	0,42606	0,75154	0,00716	17,06387	1,92980	8,09209	8429,84	108,63	2,064	8429,84	0,00539	0,75553	13,25
-12,51	12,27	20,51	0,42264	0,75913	0,00759	17,1304	1,94422	8,06182	8421,75	109,06	2,049	8421,75	0,00537	0,76090	12,92
-12,80	11,96	20,59	0,41946	0,76635	0,00722	17,19642	1,95916	8,03052	8413,69	109,48	2,035	8413,69	0,00536	0,76626	12,65
-13,09	11,66	20,67	0,41630	0,77368	0,00733	17,26197	1,97403	8,00799	8405,65	109,89	2,021	8405,65	0,00534	0,77160	12,35
-13,38	11,36	20,75	0,41317	0,78112	0,00744	17,32704	1,98901	7,98074	8397,65	110,31	2,006	8397,65	0,00533	0,77693	12,05
-13,67	11,07	20,83	0,41019	0,78833	0,00721	17,39165	2,00342	7,95575	8389,66	110,72	1,992	8389,66	0,00532	0,78225	11,75
-13,96	10,78	20,90	0,40717	0,79582	0,00749	17,45582	2,01828	7,92935	8381,71	111,13	1,977	8381,71	0,00530	0,78755	11,46
-14,25	10,50	20,98	0,40439	0,80323	0,00742	17,51955	2,03289	7,90677	8373,78	111,53	1,962	8373,78	0,00529	0,79284	11,18
-14,55	10,22	21,06	0,40155	0,81023	0,00700	17,58289	2,04656	7,88217	8365,87	111,94	1,947	8365,87	0,00528	0,79812	10,87
-14,84	9,94	21,13	0,39880	0,81750	0,00727	17,64579	2,06066	7,85896	8357,99	112,34	1,932	8357,99	0,00527	0,80339	10,60
-15,13	9,67	21,21	0,39614	0,82468	0,00718	17,7083	2,07448	7,83683	8350,13	112,74	1,918	8350,13	0,00526	0,80864	10,32
-15,42	9,40	21,28	0,39351	0,83196	0,00728	17,77041	2,08838	7,81457	8342,29	113,13	1,902	8342,29	0,00525	0,81389	10,07
-15,71	9,13	21,35	0,39102	0,83895	0,00700	17,83214	2,10164	7,79461	8334,48	113,52	1,888	8334,48	0,00524	0,81913	9,74
-16,00	8,87	21,43	0,38850	0,84623	0,00728	17,89351	2,11532	7,77335	8326,69	113,92	1,872	8326,69	0,00523	0,82436	9,42
-16,29	8,61	21,50	0,38618	0,85301	0,00679	17,95451	2,12798	7,75505	8318,91	114,30	1,858	8318,91	0,00522	0,82958	9,22
-16,58	8,36	21,57	0,38383	0,86008	0,00707	18,01516	2,14105	7,73649	8311,16	114,69	1,843	8311,16	0,00521	0,83479	8,96
-16,87	8,11	21,64	0,38155	0,86703	0,00695	18,07546	2,15381	7,71853	8303,42	115,07	1,828	8303,42	0,00520	0,83999	8,69
-17,16	7,86	21,72	0,37943	0,87366	0,00663	18,13543	2,16689	7,70284	8295,70	115,46	1,814	8295,70	0,00520	0,84519	8,43
-17,45	7,62	21,79	0,37733	0,88074	0,00708	18,19507	2,17967	7,68750	8288,00	115,84	1,798	8288,00	0,00519	0,85038	8,18
-17,75	7,38	21,86	0,37516	0,88735	0,00661	18,25444	2,19052	7,67010	8280,31	116,21	1,784	8280,31	0,00518	0,85557	7,92
-18,04	7,14	21,93	0,37321	0,89380	0,00644	18,31341	2,20196	7,							

