

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

Atenuação de cargas estáticas em modelo reduzido de linha de
ancoragem de sistema *offshore*

Cynthia Cristina Morais Rocha

Porto Alegre
2014

CINTHIA CRISTINA MORAIS ROCHA

**ATENUAÇÃO DE CARGAS ESTÁTICAS EM MODELO
REDUZIDO DE LINHA DE ANCORAGEM DE SISTEMA
*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

Porto Alegre

2014

ROCHA, Cinthia Cristina Morais

Atenuação de cargas estáticas em modelo reduzido de linha de ancoragem de sistema *offshore*/ Cinthia Cristina Morais Rocha. – Local: PPGEC/UFRGS, 2014.

201 f.

Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre; Mestre em Engenharia. Orientadores: Fernando Schnaid, Marcelo Maia Rocha.

1. Atenuação. 2. Catenária Invertida. 3. Modelo Reduzido. 4. Solo Argiloso. 5. Fundações *offshore*.
I.Schnaid, Fernando, orient. II. Rocha, Marcelo Maia, orient. III Título

CINTHIA CRISTINA MORAIS ROCHA

**ATENUAÇÃO DE CARGAS ESTÁTICAS EM MODELO
REDUZIDO DE LINHA DE ANCORAGEM DE SISTEMA
OFFSHORE**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA 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. *Oxford University*, Reino Unido
Orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. *Tecn. Universität Innsbruck*, Austria
Orientador

Prof. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alessander Christopher Morales Kormann
Dr. Universidade de São Paulo, Brasil

Prof. Edgar Odebrecht
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Eng. Msc. Claudio dos Santos Amaral
PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A; Msc. pela PUC-RJ

Prof. Acir Mércio Loredo Souza
Ph.D. *University of Western Ontario*, Canadá

Dedico este trabalho à memória de meus avós Francisco e Olivina, à minha mãe Dulce e ao meu amor Diego pelo apoio, compreensão e incentivo, que me fizeram seguir em frente, transpor obstáculos e vencer mais essa etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Professores Fernando e Marcelo, orientadores deste trabalho, pela confiança, empenho, disponibilidade, paciência e por toda a ajuda e ensinamentos, sem os quais a realização deste projeto não seria possível.

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por me proporcionar este curso de Mestrado, em especial ao Professor Luiz Carlos pelo acolhimento e ao Professor Nilo, por ter inicialmente me aceito como sua aluna de mestrado, agradeço muito pela confiança que depositaram em mim.

Agradeço a receptividade e atenção de toda a equipe da secretaria do programa de pós-graduação e aos professores por todo conhecimento transmitido.

Ao laboratorista do LEGG, João Diniz pela disponibilidade e empenho em ajudar.

Agradeço à Petrobras e, particularmente, ao Engenheiro Claudio Amaral pelo suporte dado.

Aos colegas do PPGEC/ UFRGS pela convivência e amizade, em especial ao David, Emanuele e Larissa pelo compartilhamento de conhecimentos e equipamentos.

Agradeço à minha mãe, pelos conselhos, apoio incondicional e incentivo. Agradeço também pelo imenso carinho da minha família, em especial aos meus primos Victor e Rodrigo, meus tios Marcos e Dora e à querida Claudete.

Agradeço imensamente ao meu namorado Diego, pelo amor, compreensão e auxílio.

Aos meus amigos pelos momentos de alegria e descontração.

A todos que colaboraram com este trabalho, mas que não foram citados nominalmente nesta dissertação.

Acima de tudo a Deus, companheiro de todas as horas.

É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com pobres de espíritos que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nesta penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota.

Theodore Roosevelt

RESUMO

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

O desenvolvimento de pesquisas relativas ao comportamento das estruturas *offshore* são de fundamental importância para as atividades de exploração de petróleo a fim de permitir uma análise mais precisa do desempenho do sistema de ancoragem. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento das linhas de ancoragem submetidas a esforços de tração bem como avaliar e quantificar a atenuação das cargas ao longo do trecho enterrado determinando assim as forças que efetivamente chegam à estaca torpedo. Inicialmente foram projetados e construídos os equipamentos, em modelo reduzido, para a realização dos ensaios experimentais de carregamento estático conduzidos na escala de 1:40. As argilas empregadas nos ensaios foram produzidas em laboratório com o objetivo de obter um solo com propriedades físicas similares à da argila típica do leito marinho, a partir da mistura caulim, bentonita e água, sendo definida a composição em massa seca de 85% de caulim, 15% de bentonita e teores de 100% de umidade para a mistura denominada como argila A, e 120% de umidade para a mistura referida como argila B. Após a caracterização geotécnica concluiu-se que a argila B se assemelha às condições de campo. A força que chega ao ponto de ancoragem, equivalente ao que seria o ponto de fixação da amarra ao torpedo, foi medida experimentalmente através de uma célula de carga para duas componentes (vertical e horizontal) instalada no piso do tanque. A catenária invertida formada pela amarra foi registrada em alguns pontos não visíveis através de um sensor por ultrassom. O carregamento da linha de ancoragem foi produzido para diferentes ângulos de incidência, em ciclos de carga e descarga. Os resultados mostram que, mesmo em uma abordagem estática, flutuações de carga na linha de ancoragem não são inteiramente transmitidas ao ponto de ancoragem (torpedo), sendo parcialmente absorvidas ao longo do trecho enterrado da amarra. A atenuação de carga na argila A foi de 24%, enquanto que a atenuação apresentada na argila B variou entre 14 %, 6% e tendendo a 0 nos ensaios realizados respectivamente nas alturas de solo de 72 cm, 48 cm e 24 cm. Verificou-se também que a qualidade dos critérios de similaridade inicialmente adotados foi satisfatória.

Palavras-chave: comportamento das linhas de ancoragem; atenuação de carga; modelo reduzido; solo argiloso; catenária invertida.

ABSTRACT

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

Attenuation of static forces in model reduced of mooring lines of offshore systems

The research development on the behavior of offshore structures is fundamentally important for the exploration of oil in order to allow a more precise analysis of the performance of offshore mooring systems. In this sense, the present work aims to analyze the behavior of embedded mooring lines subjected to tensile stresses and to evaluate and quantify the attenuation of loads along the stretch buried thus determining the forces that effectively reach the torpedo pile. Initially, the equipment were designed and built, in a reduced model, so the experimental tests of conducted static load on the scale of 1:40 could be conducted. The clays used in the tests were produced in the laboratory in order to obtain a soil with similar physical properties to the typical clay seabed, from mixing kaolin, bentonite and water, the composition being set on dry matter of 85% kaolin 15% bentonite content and 100% humidity for mixing clay called as A, and 120% humidity for mixing said clay as B. After geotechnical characterization, it was found that the clay B is similar to field conditions. The force that reaches the anchor point, equivalent to what would be the point of attachment of mooring the torpedo, was experimentally measured by a load cell for two components (vertical and horizontal) installed on the floor of the tank. The reverse catenary formed by the embedded mooring line was recorded in some not visible spots through an ultrasound sensor. The load of the anchor line has been produced for different incidence angles, in loading and unloading cycles. The results show that, even in a static approach, load fluctuations in the anchor line are not fully transmitted to the anchor point (torpedo). Partially absorbed along the stretch of mooring buried. The attenuation of the load on the clay A was 24%, while the attenuation shown in clay B ranged from 14%, 6% and approaches 0 in the tests performed respectively on the ground heights of 72 cm, 48 cm and 24 cm. It was also found that the quality of similarity criteria adopted initially was satisfactory.

Keywords: behavior of mooring lines; attenuation of force; reduced model; cleyey soil; reverse catenary.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Comparação do raio de ancoragem em catenária livre e <i>taut leg</i> (SAGRILO et al, 2012).....	31
Figura 2.2: Representação dos tipos de amarras (LIMA, 2011).....	33
Figura 2.3: Representação dos tipos de cabos de aço (API, 2005).....	34
Figura 2.4: Estacas de sucção (SHARMA, 2004).....	35
Figura 2.5: Detalhes de uma ancora convencional (VRIHOF, 2010).....	36
Figura 2.6: Âncora VLA (LOUREIRO, 2007).....	36
Figura 2.7: Detalhe da geometria da estaca torpedo (SAGRILO et al., 2010).....	37
Figura 2.8: Forças de atuação no projétil.....	39
Figura 2.9: Configuração típica da linha de ancoragem no leito marinho.....	41
Figura 2.10: Geometria da catenária suspensa (BANG, 1996).....	43
Figura 2.11: Elemento infinitesimal da linha de ancoragem (BANG, 1996; 2003).....	45
Figura 2.12: Solução simplificada da amarra (adaptado de NEUBECKER & RANDOLPH, 1995)	48
Figura 2.13: Representação esquemática do programa experimental (adaptado de DEGENKAMP <i>et al</i> , 1989)	50
Figura 2.14: Comparação da geometria do trecho embutido da linha de ancoragem (adaptado de BANG <i>et al</i> , 2003)	52
Figura 2.15: Curva carga na estaca <i>versus</i> carga na superfície do leito marinho para diferentes penetrações de estaca (adaptado de AMARAL & COSTA, 2010) ..	53
Figura 2.16: Curva ângulo de incidência da carga no topo da estaca <i>versus</i> carga na superfície do leito marinho para diferentes penetrações da estaca (adaptado de AMARAL & COSTA, 2010)	54
Figura 2.17: Resultados de ensaios em centrífuga (adaptado de WANG <i>et al</i> , 2010)	56
Figura 2.18: Comparação da geometria do trecho embutido da linha de ancoragem para 4 ângulos de incidência na fundação (adaptado de LIU <i>et al</i> , 2013)	58
Figura 3.1: Resultados de ensaios de campo e laboratório realizados na Baía de Santos (TECHNICAL REPORT, 2010).....	61
Figura 3.2: Esquema ilustrativo da linha de ancoragem analisada.....	62
Figura 3.3: Espectro de cargas	63
Figura 3.4: Gráfico da geometria da linha de ancoragem.....	65
Figura 3.5: Gráfico da geometria da linha de ancoragem próxima ao <i>fairlead</i>	65
Figura 3.6: Gráfico da geometria da linha de ancoragem do trecho enterrado.....	66
Figura 3.7: Gráfico da variação de tração ao longo da profundidade.....	67
Figura 5.1: Curva granulométrica do caulim.....	77
Figura 5.2: Curva granulométrica da bentonita.....	78

Figura 5.3: Curva granulométrica da mistura caulim e bentonita.....	79
Figura 5.4: Equipamento de palheta de laboratório automatizado (GAUER, 2010)	81
Figura 5.5: Calibração da célula de torque do equipamento de mini palheta (GAUER, 2010)	82
Figura 5.6: Molde para corpo de prova do ensaio de mini palheta (GAUER, 2010).....	83
Figura 5.7 : Gráfico de torque <i>versus</i> tempo	84
Figura 5.8 : Gráfico de resistência não drenada (Su) <i>versus</i> tempo	84
Figura 5.9: Tanque de acrílico utilizado nos ensaios de palheta	85
Figura 5.10: Palheta e hastes prolongadoras	85
Figura 5.11: Execução de ensaio de mini palheta em profundidade	86
Figura 5.12: Projeto do tanque de acrílico (medidas em cm)	88
Figura 5.13: Detalhe da parede móvel (medidas em cm)	89
Figura 5.14: Lateral móvel do tanque de acrílico	89
Figura 5.15: Detalhe da amarra	90
Figura 5.16: Projeto da estrutura metálica (medidas em cm)	91
Figura 5.17: Representação esquemática do conjunto de equipamentos	91
Figura 5.18: Moitões fixos e móvel, respectivamente	92
Figura 5.19: Detalhes das anilhas e suporte	93
Figura 5.20: Detector por ultrassom	93
Figura 5.21: Extensômetro colável, modelo unidimensional simples de forma tradicional (EXCEL SENSORES, 2013)	95
Figura 5.22: Vista inferior e vista superior, respectivamente	96
Figura 5.23: Fixação e vedação da célula de carga	97
Figura 5.24: Representação esquemática da ligação dos extensômetros	99
Figura 5.25: Equipamentos de aquisição dos dados: (a) Bateria, (b) Amplificador e (c) Multímetro.....	100
Figura 5.26: Calibração da célula de carga em água	101
Figura 5.27: Calibração da célula de carga.....	102
Figura 5.28: Moldagem: (a) mistura A (100% de umidade) e (b) mistura B (120% de umidade), respectivamente	104
Figura 5.29: Marcação da posição da corrente ao longo da profundidade	106
Figura 5.30: Vista superior do tanque – indicação do posicionamento para realização dos ensaios	107
Figura 5.31: Vista geral do tanque preenchido com 72 cm de altura de solo	108
Figura 5.32: Vista geral do tanque preenchido com 48 cm de altura de solo	108
Figura 5.33: Vista geral do tanque preenchido com 24 cm de altura de solo	109

Figura 5.34: Ruptura do solo devido à aplicação de carga com componente horizontal da amarra	109
Figura 5.35: Variação de S_u ao longo da profundidade para a argila A	111
Figura 5.36: Variação de S_u ao longo da profundidade para a argila B	113
Figura 5.37: Variação de S_u ao longo da profundidade	115
Figura 5.38: Resistência ao cisalhamento não drenada normalizada (S_u/σ'_{vo}) versus profundidade	116
Figura 6.1: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila A com altura de solo de 72 cm, para carregamento de 14 kg	121
Figura 6.2: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 72 cm, para carregamento de 14 kg	122
Figura 6.3: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 48 cm, para carregamento de 14 kg	122
Figura 6.4: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 24 cm, para carregamento de 14 kg	123
Figura 6.5: Comparação dos deslocamentos e da configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida nas argilas A e B, para o carregamento de 14 kg	124
Figura 6.6: Comparação dos deslocamentos e da configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila B com alturas de solo de 72 cm, 48 cm e 24 cm para carregamento de 14 kg	125
Figura 6.7: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila A com altura de solo de 72 cm, sem carregamento	127
Figura 6.8: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila A com altura de solo de 72 cm, para carregamento de 10 kg	128
Figura 6.9: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 72 cm, sem carregamento	128
Figura 6.10: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 72 cm, para carregamento de 10 kg	129
Figura 6.11: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 48 cm, sem carregamento	129
Figura 6.12: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 48 cm, para carregamento de 10 kg	130
Figura 6.13: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 24 cm, sem carregamento	130
Figura 6.14: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 24 cm, para carregamento de 10 kg	131
Figura 6.15: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios sob diferentes carregamentos e posições na argila A	132
Figura 6.16: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios sob diferentes carregamentos e posições na argila B, com 72 cm de altura de solo	132

Figura 6.17: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios sob diferentes carregamentos e posições na argila B, com 48 cm de altura de solo	133
Figura 6.18: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios sob diferentes carregamentos e posições na argila B, com 24 cm de altura de solo	133
Figura 6.19: Comparação entre os resultado obtidos experimentalmente na argila A e os resultados gerados pelo DIGIN	135
Figura 6.20: Comparação entre os resultado obtidos experimentalmente na argila B com altura de solo de 72 cm e os resultados gerados pelo DIGIN	136
Figura 6.21: Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente na argila B com altura 48 cm e os resultados gerados pelo DIGIN	136
Figura 6.22: Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente na argila B com altura 24 cm e os resultados gerados pelo DIGIN	137
Figura 7.1: Componente horizontal <i>versus</i> componente vertical das forças medidas nos ensaios realizados na argila A com altura de solo de 72 cm	141
Figura 7.2: Componente horizontal <i>versus</i> componente vertical das forças medidas nos ensaios realizados na argila B com altura de solo de 72 cm	142
Figura 7.3: Componente horizontal <i>versus</i> componente vertical das forças medidas nos ensaios realizados na argila B com altura de solo de 48 cm	143
Figura 7.4: Componente horizontal <i>versus</i> componente vertical das forças medidas nos ensaios realizados na argila B com altura de solo de 24 cm	144
Figura 7.5: Carga aplicada (F_a) <i>versus</i> carga medida (F_m) em cada ensaio realizado na Argila A, com altura de solo de 72 cm	145
Figura 7.6: Carga aplicada (F_a) <i>versus</i> carga medida (F_m) em cada ensaio realizado na Argila B com altura de solo de 72 cm	146
Figura 7.7: Carga aplicada (F_a) <i>versus</i> carga medida (F_m) em cada ensaio realizado na Argila B com altura de solo de 48 cm	147
Figura 7.8: Carga aplicada (F_a) <i>versus</i> carga medida (F_m) em cada ensaio realizado na Argila B com altura de solo de 24 cm	148
Figura 7.9: Comparação entre carga aplicada (F_a) <i>versus</i> carga medida (F_m) em cada condição de ensaio.....	149
Figura 7.10: Carga aplicada (F_a) <i>versus</i> carga medida (F_m) em ensaios com ciclos de carga e descarga realizado na Argila A, com altura de solo de 72 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 0°	150
Figura 7.11: Carga aplicada (F_a) <i>versus</i> carga medida (F_m) em ensaios com ciclos de carga e descarga realizado na Argila A, com altura de solo de 72 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 55°	150
Figura 7.12: Carga aplicada (F_a) <i>versus</i> carga medida (F_m) em ensaios com ciclos de carga e descarga realizado na Argila B, com altura de solo de 24 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 0°	151
Figura 7.13: Carga aplicada (F_a) <i>versus</i> carga medida (F_m) em ensaios com ciclos de carga e descarga realizado na Argila B, com altura de solo de 24 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 55°	151

Figura 8.1: Comparação entre os resultados médios das componentes horizontais e verticais nas diferentes condições de ensaio	155
Figura 8.2: Comparação entre os resultados médios das forças medidas (Fm) em relação às forças aplicadas (Fa) nas diferentes condições de ensaio	157
Figura 8.3: Relação entre carga aplicada e atenuação em cada ensaio realizado na argila A (H=72 cm)	159
Figura 8.4: Relação entre carga aplicada e atenuação em cada ensaio realizado na argila B (H=72 cm)	160
Figura 8.5: Relação entre carga aplicada e atenuação em cada ensaio realizado na argila B (H=48 cm)	161
Figura 8.6: Relação entre carga aplicada e atenuação em cada ensaio realizado na argila B (H=24 cm)	162
Figura 8.7: Comparação entre os ângulos de incidência da carga no topo da estaca em cada condição de ensaio	163
Figura 8.8: Comparação da atenuação da carga <i>versus</i> L/H nas diferentes condições de ensaio	164
Figura 8.9: Relação entre os resultados médios de atenuação e carga aplicada em cada condição de ensaio	166
Figura 8.10: Comparação da atenuação <i>versus</i> ângulo nominal nas diferentes condições de ensaio	167
Figura 8.11: Relação entre atenuação e carga aplicada em cada ciclo de carga e descarga realizado na argila A, com altura de solo de 72 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 0°	169
Figura 8.12: Relação entre atenuação e carga aplicada em cada ciclo de carga e descarga realizado na argila A, com altura de solo de 72 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 55°	169
Figura 8.13: Relação entre atenuação e carga aplicada em cada ciclo de carga e descarga realizado na argila B, com altura de solo de 24 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 0°	170
Figura 8.14: Relação entre atenuação e carga aplicada em cada ciclo de carga e descarga realizado na argila B, com altura de solo de 24 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 55°	171
Figura 8.15: Resultados de força aplicada (Fa) <i>versus</i> força transmitida (Fm) de BANG et al (2003), DEGENKAMP (1989), AMARAL & COSTA (2010), WANG et al (2010) e presente pesquisa	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resultados dos ensaios com amarra inserida em solo argiloso (adaptado de DEGENKAMP <i>et al</i> , 1989)	51
Tabela 2.2: Resultados dos ensaios de linha de ancoragem em solo arenoso (adaptado de BANG <i>et al</i> , 2003)	52
Tabela 2.3: Resultados de ensaios em centrífuga (adaptado de WANG <i>et al</i> , 2010)	55
Tabela 2.4: Comparação entre resultados obtidos nos programas MATHCAD, ÂNCORA e DIGIN (adaptado de KAWASAKI, 2010)	57
Tabela 3.1: Propriedades Físicas e Geométricas das linhas de Ancoragem	62
Tabela 3.2: Resumo dos resultados fornecidos pelo programa DIGIN	64
Tabela 4.1 Grandezas fundamentais (LOBO CARNEIRO, 1996)	69
Tabela 4.2: Expoentes dimensionais com grandezas usuais em análise dinâmica (ROCHA, 2013)	70
Tabela 4.3: Matriz dimensional (LOBO CARNEIRO, 1996)	71
Tabela 4.4: Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio de tração axial da linha de ancoragem	74
Tabela 5.1: Propriedades físicas do caulim	78
Tabela 5.2: Propriedades físicas da bentonita	79
Tabela 5.3: Propriedades físicas da mistura caulim e bentonita	80
Tabela 5.4: Propriedades das misturas estudadas	80
Tabela 5.5: Características dos extensômetros	95
Tabela 5.6: Resultados de S_u nos ensaios de mini palheta na argila A	110
Tabela 5.7: Resultados de S_u nos ensaios de mini palheta na argila B	112
Tabela 5.8: Resultados da normalização do S_u médio ao longo da profundidade	116
Tabela 6.1: Ângulos de incidência no leito (TDP), para carga de 14 kgf	119
Tabela 6.2: Ângulos de incidência no topo da estaca, para carga de 14 kgf	120
Tabela 6.3: Comparação entre os ângulos de incidência no leito e no topo da célula de carga para carregamentos de 0, 10 e 14 kg	126
Tabela 6.4: Comparação entre resultados fornecidos pelo DIGIN e os resultados obtidos experimentalmente nas argilas A e B com altura de solo de 72 cm	138
Tabela 6.5: Comparação entre resultados fornecidos pelo DIGIN e os resultados obtidos experimentalmente na argila B com altura de solo de 48 cm	138
Tabela 6.6: Comparação entre resultados fornecidos pelo DIGIN e os resultados obtidos experimentalmente na argila B com altura de solo de 24 cm	139
Tabela 7.1: Ensaio realizados	140
Tabela 8.1: Resultados dos ensaios de carregamento estático	153

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

CALM	<i>Catenary Anchor Leg Mooring</i>
DICAS	<i>Differentiated Compliance Anchoring System</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
EA	Rigidez axial
EWB	Fator de conversão do diâmetro equivalente para os efeitos da força normal
EWS	Fator de conversão do diâmetro equivalente em área para os efeitos da força tangencial, para o caso de linhas compostas por amarras
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading Vessel</i>
FSO	<i>Floating Storage and Offloading Vessel</i>
LYS	<i>Large Yaw System</i>
MBL	<i>Minimum Breaking Load</i>
SALM	<i>Single Anchor Leg Mooring</i>
SM	<i>Spread Mooring</i>
SPM	<i>Single Point Moring</i>
SYS	<i>Small Yaw System</i>
TLP	<i>Tension Leg Platforms</i>
VLA	<i>Vertical Load Anchor</i>
D	Diâmetro da linha ou de um elo da amarra
N	Força normal
N_c	Fator de capacidade carga
Q	Capacidade de carga do solo por elemento
S_c	Comprimento do segmento
S_{wr}	Comprimento do último segmento
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenado do solo
T_1	Tração inicial no elemento

T_2	Tração final no elemento
TH	Componente horizontal da tração
W	Peso submerso por unidade de comprimento do segmento apoiado no solo
W_c	Peso submerso por unidade de comprimento do elemento
W_{wr}	Peso submerso por unidade de comprimento do último segmento
W	Peso submerso por unidade de comprimento do segmento apoiado no solo
f	A força tangencial no elemento
n	Número total de parâmetros
r	Número de grandezas do problema cujas unidades possam ser arbitrariamente escolhidas
q	Capacidade de carga do solo por unidade de comprimento
w	Peso por unidade de comprimento do elemento
z	Profundidade do leito marinho
α	Fator de adesão do solo
β	Fator de conversão da área de contato linha-solo
δ	Ângulo de atrito na interface entre a linha de ancoragem e o solo
ΔX_c	Projeção horizontal do comprimento do segmento
ΔY_c	Projeção vertical do comprimento do segmento
ΔX_{wr}	Projeção horizontal do comprimento do último segmento
ΔY_{wr}	Projeção vertical do comprimento do último segmento
ΔL	Comprimento do segmento apoiado no solo
ΔT	Varição da tração
μ	Coefficiente de atrito solo-linha
θ_0	Ângulo inicial do elemento em relação à horizontal
θ_b	Ângulo final do elemento em relação à horizontal
θ_1	Ângulo inicial do elemento em relação à horizontal

θ_1	Ângulo final do elemento em relação à horizontal
ϕ_2	Ângulo final do elemento em relação à horizontal
μ	Coefficiente de atrito solo-linha
$\sum F_T$	Somatório de forças tangenciais
$\sum F_N$	Somatório de forças normais
$\sum M$	Somatório de momentos
Π	Números Π
H	Altura de solo
δ	Deslocamento horizontal
ζ	Atenuação
Fa	Força aplicada
Fm	Força medida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 ASPECTOS GERAIS	25
1.2 JUSTIFICATIVA	26
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA	26
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2 SISTEMAS FLUTUANTES DE EXPLORAÇÃO OFFSHORE.....	28
2.1 PLATAFORMAS FLUTUANTES	29
2.2 SISTEMAS DE ANCORAGEM	29
2.3 CONFIGURAÇÕES DE LINHAS DE ANCORAGEM	30
2.3.1 Ancoragem em catenária livre	30
2.3.2 Linha de ancoragem retasada (<i>taut leg</i>)	31
2.3.3 Linha de ancoragem vertical	32
2.4 COMPONENTES DE LINHA DE ANCORAGEM	32
2.4.1 Amarras	32
2.4.2 Cabos de aço	33
2.4.3 Cabos de poliéster	34
2.5 FUNDAÇÕES PARA ANCORAGEM DE SISTEMAS FLUTUANTES	35
2.5.1 Âncora de Sucção	35
2.5.2 Âncora Convencional	35
2.5.3 VLA	36
2.5.4 Estaca Torpedo	37
2.6 MÉTODO DE ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DE CRAVAÇÃO DA ESTACA TORPEDO	38
2.7 MÉTODO DE ANÁLISE DE LINHAS DE ANCORAGEM	40

2.7.1 Equilíbrio da catenária suspensa	41
2.7.2 Equilíbrio do trecho apoiado no leito marinho	44
2.7.3 Equilíbrio do trecho embutido no leito marinho	44
2.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE ATENUAÇÃO	49
2.8.1 Influência do trecho enterrado da linha de ancoragem	49
3 ESTUDO DE CASO	59
3.1 CASO TÍPICO	59
3.1.1 Descrição da Plataforma	59
3.1.2 Caracterização do solo	59
3.1.3 Propriedades físicas e geométricas das linhas de ancoragem	61
3.1.4 Estaca Torpedo	62
3.2 ESFORÇOS ATUANTES E GEOMETRIA	63
4 ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA	68
4.1 ANÁLISE DIMENSIONAL	68
4.1.1 Expoentes dimensionais	69
4.1.2 Mudança de base	71
4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEMELHANÇA FÍSICA E EFEITO DE ESCALA	73
4.3 ANÁLISE DIMENSIONAL APLICADA AO CASO TÍPICO	73
4.3.1 Linha de ancoragem	74
4.3.2 Tanque de acrílico	74
4.3.3 Definição do solo	75
4.3.4 Sistema de carregamento estático	75
5 MATERIAIS E MÉTODOS	76
5.1 MATERIAIS	76

5.1.1 Argila	76
5.1.1.1 Caulim	77
5.1.1.2 Bentonita	78
5.1.1.3 Mistura caulim e bentonita	79
5.1.2 Ensaio de mini palheta	80
5.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO ESTÁTICO	87
5.2.1 Tanque de acrílico	87
5.2.2 Linha de ancoragem	89
5.2.3 Suporte metálico	90
5.2.4 Detector de materiais	93
5.3 INSTRUMENTAÇÃO	94
5.3.1 Fixação da célula de carga	96
5.3.2 Leitura dos extensômetros	97
5.3.3 Aquisição dos dados	99
5.4 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA	100
5.5 PROGRAMA DE ENSAIOS	103
5.5.1 Ensaio de tração	103
5.5.1.1 Preparação da argila	103
5.5.1.2 Preparação do tanque e do sistema de carregamento estático	104
5.5.1.3 Procedimentos relativos aos ensaios de tração	104
5.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MINI PALHETA	110
5.6.1 Argila A	110
5.6.2 Argila B	111
5.6.3 Comparação entre as argilas A e B	113

6 CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DO TRECHO ENTERRADO DA LINHA DE ANCORAGEM – RESULTADOS E ANÁLISES	117
6.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA CARREGAMENTO MÁXIMO	118
6.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA DIFERENTES CARREGAMENTOS	125
6.2.1 Comparação entre os resultados de diferentes carregamentos	131
6.3 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS	134
7 ENSAIOS DE CARREGAMENTO ESTÁTICO - RESULTADOS	140
7.1 TRANSFERÊNCIA DE CARGA	140
7.1.1 Forças transmitidas	141
7.1.2 Forças transmitidas <i>versus</i> forças aplicadas	145
7.1.3 Resultados de ciclos de carga e descarga	149
8 ENSAIOS DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – ANÁLISES	152
8.1 ANÁLISE DAS FORÇAS MEDIDAS EM FUNÇÃO DAS FORÇAS APLICADAS	154
8.2 ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DE CARGA	158
8.2.1 Considerações iniciais	158
8.2.1.1 Análise de ciclos de carga e descarga	168
8.2.2 Comparação com resultados de outras pesquisas	171
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	173
9.1 CONCLUSÕES	173
9.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	175

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176
---	------------

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

A crescente demanda por petróleo e a escassez de reservas *onshore*, aumentou a busca por novas reservas localizadas em regiões marítimas. O desenvolvimento da infraestrutura para a exploração *offshore* tem avançado rapidamente e atingindo lâminas d'água cada vez mais profundas. As estruturas rígidas e fixas empregadas em águas rasas tornaram-se inviáveis para lâminas de água superiores a 500m. Então, para compor novas alternativas na exploração de petróleo em águas profundas e ultraprofundas, foram introduzidos os sistemas flutuantes ancorados por meio de linhas de ancoragem fixadas no subleito marinho por estacas ou âncoras.

As linhas de ancoragem são estruturas flexíveis que podem ser compostas por amarras, cabos de aço e/ou poliéster. De acordo com a geometria das linhas são utilizadas diferentes configurações, como ancoragem em catenária, de raio curto (*taut leg*) e vertical. As linhas de ancoragem em uma unidade flutuante tem como função transferir o carregamento para a fundação bem como limitar o movimento da unidade flutuante no plano horizontal.

Nos últimos anos a Petrobras tem otimizado e reduzido os custos dos sistemas de ancoragem através da utilização de estacas torpedo como elemento de fixação no fundo marinho, que são projetadas para suportar as componentes verticais das cargas transmitidas pelas linhas de ancoragem, podendo-se com isso adotar configurações com raios de ancoragem mais curtos (NOGUEIRA *et al.*, 2005). A estaca torpedo é uma estaca tubular de ponta cônica, com peso e tamanho adequados, instalada por queda livre a partir de uma determinada altura de lançamento acima do leito marinho (MEDEIROS, 2001).

Os sistemas de ancoragem são responsáveis pela fixação dos elementos que compõem os sistemas de produção. Sendo assim, devem manter a unidade flutuante, que está sujeita a movimentos devidos à ação de cargas ambientais como vento, onda e corrente, posicionada dentro de limites que não afetem a atividade de exploração. Segundo COLLIAT (2002), o critério de escolha do sistema de ancoragem depende principalmente do tipo de embarcação, da lâmina d'água, do tipo de operação e do custo envolvido.

Neste cenário justifica-se a necessidade de pesquisas relativas ao estudo de linhas de ancoragem, em particular, no que se refere à distribuição e atenuação de esforços na catenária e suas implicações na capacidade de carga do sistema de fundações.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de pesquisas relativas ao comportamento das estruturas *offshore* é de fundamental importância às atividades de exploração de petróleo, de modo a permitir uma análise mais precisa do desempenho do sistema de ancoragem e conseqüentemente propiciar projetos econômicos, confiáveis e otimizados.

A solução de problemas em engenharia, em especial de engenharia *offshore*, depende da combinação de análise teórica e validação através de ensaios experimentais. Comumente utiliza-se um modelo analítico simples para fornecer uma solução de projeto. Em seguida, fazem-se as medições experimentais para verificar a acurácia das previsões para, com base nos resultados, verificar e/ou modificar o modelo analítico. Este projeto justifica-se dentro desta filosofia: obter um conjunto de informações experimentais a partir de um protótipo de estaca torpedo e catenária, buscando elucidar aspectos de comportamento através de um modelo reduzido projetado conforme um princípio de escala e similaridade.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

O presente trabalho faz parte do projeto Petrobras de tecnologias *offshore*: Sistemas de jateamento, transferência de carga e melhoramento de solos, desenvolvido em parceria entre a Petrobras e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Nesta pesquisa foi abordado o sub-projeto intitulado como “Avaliação da atenuação de cargas dinâmicas aplicadas a estacas torpedo”.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento do trecho enterrado da linha de ancoragem submetida a esforços de tração e então, avaliar e quantificar a atenuação das cargas e determinar as forças que de fato chegam à âncora-torpedo e que devem ser resistidas. Os aspectos fundamentais que norteiam o trabalho estão centrados na determinação da geometria e dos esforços atuantes ao longo da linha e, principalmente, na determinação dos esforços transmitidos da unidade flutuante à fundação através da linha de ancoragem.

Com base no que foi exposto, a presente pesquisa tem como principais objetivos específicos:

- a) projeto e construção dos equipamentos que representem o funcionamento do sistema dentro dos princípios de escala e similaridade.
- b) realização de estudo do comportamento do trecho enterrado da linha de ancoragem.
- c) avaliação e quantificação da atenuação de cargas estáticas ao longo do trecho enterrado.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Com o objetivo de apresentar de forma clara e objetiva o estudo realizado, este trabalho foi estruturado em sete capítulos, conforme descritos a seguir.

O **Capítulo 1** apresenta uma breve introdução sobre o tema abordado, a justificativa e os objetivos da pesquisa. No **Capítulo 2** é apresentada uma revisão da bibliografia existente que compreende os principais assuntos discutidos no trabalho. São abordadas as plataformas flutuantes, compreendendo desde as linhas de ancoragem até os elementos de fundação e o método empregado na análise da linha de ancoragem. No **Capítulo 3** é descrito o estudo de caso real escolhido para análise e os resultados obtidos pelo programa DIGIN. No **Capítulo 4** é apresentado o estudo dimensional dos parâmetros relacionados à pesquisa. Com base neste estudo e nos resultados fornecidos pelo DIGIN foram projetados os equipamentos que foram utilizados na realização dos ensaios. O **Capítulo 5** é composto de materiais e métodos, onde são detalhados todos os ensaios realizados. São apresentados e caracterizados os materiais utilizados na pesquisa, o método utilizado na realização de cada ensaio e também a descrição dos equipamentos projetados. No **Capítulo 6** são apresentados e discutidos os resultados da configuração geométrica assumida pela linha de ancoragem. O **Capítulo 7** apresenta os resultados dos ensaios de carregamento estático. No **Capítulo 8** são discutidos os resultados apresentados no Capítulo 7. Finalmente, no **Capítulo 9** são apresentadas as conclusões desta pesquisa e considerações finais. São destacados alguns pontos que não foram avaliados e que servem de sugestões para a continuação da pesquisa em futuros trabalhos.

2 SISTEMAS FLUTUANTES DE EXPLORAÇÃO OFFSHORE

O presente capítulo apresenta os principais aspectos teóricos importantes para a compreensão desta pesquisa. Primeiramente é apresentada uma breve abordagem sobre plataformas para exploração de petróleo *offshore*. Em seguida, são abordados os sistemas de ancoragem de unidades flutuantes, compreendendo desde as linhas de ancoragem até os elementos de fundação. Por fim, são feitas considerações com relação à análise de linhas de ancoragem, discutindo-se geometria, capacidade de carga e atenuação.

A exploração de petróleo em sistemas *offshore* é realizada através de plataformas fixas ou flutuantes. A escolha do tipo de plataforma está intimamente relacionada a aspectos técnicos e econômicos. As plataformas fixas foram as primeiras unidades utilizadas. Geralmente são constituídas de estruturas modulares em aço, instaladas no local de operação com estacas cravadas no fundo do mar. São projetadas para receber os equipamentos de perfuração, estocagem de materiais, alojamento de pessoal, bem como todas as instalações necessárias para a produção de poços (THOMAS, 2001).

As plataformas fixas tais como Jaquetas, Torres Complacentes, Plataformas de Gravidade e Plataformas Auto-elevatórias foram desenvolvidas para lâminas d'água inferiores a 500m de profundidade. Em águas mais profundas a instabilidade aumenta, fazendo com que a base desse tipo de plataforma tenha que ser muito grande, inviabilizando sua utilização. Então, como alternativa na exploração de petróleo em águas profundas, surgiram as plataformas flutuantes, que são estruturas mantidas através de um sistema de posicionamento dinâmico ou de um sistema de ancoragem.

No sistema de posicionamento dinâmico não ocorre ligação física da plataforma com o leito marinho, exceto a dos equipamentos de perfuração. Sensores de posição determinam a deriva e propulsores no casco acionados por computador restauram a posição da plataforma (THOMAS, 2001).

O sistema de ancoragem é constituído de cabos e/ou correntes atuando como molas que produzem esforços capazes de restaurar a posição da plataforma, modificada pela ação das

ondas, ventos e correntezas marítimas. Por se tratar de um assunto de relevância neste trabalho, será tratado detalhadamente nas seções 2.2 e 2.3.

2.1 PLATAFORMAS FLUTUANTES

Com o avanço da exploração do petróleo em águas profundas e ultra profundas, foram desenvolvidas as plataformas flutuantes, que são estruturas ancoradas no fundo do mar por meio de amarras e/ou cabos (aço ou sintéticos), que se comporta como um sistema complacente quando submetido a carregamentos ambientais. Este conceito de estrutura complacente apresenta grandes deslocamentos como resposta às ações ambientais, caracterizando seu comportamento dinâmico não-linear (BRANDÃO, 2008).

É necessário que a plataforma seja posicionada na superfície do mar, dentro de um círculo com raio de tolerância em função dos equipamentos, operação a ser executada e lâmina d'água (THOMAS, 2001). Dentre os tipos mais comuns destacam-se as Plataformas Semi submersíveis, Plataformas de Pernas Tensionadas (*Tension Leg Platforms* - TLP), Plataformas SPAR e Navios Ancorados (FPSO).

2.2 SISTEMAS DE ANCORAGEM

Os sistemas de ancoragem tem a função de restringir os deslocamentos resultantes do carregamento ambiental, mantendo a unidade flutuante dentro de uma região na qual seja possível a realização de suas operações com segurança.

Assim, a eficiência do sistema de ancoragem pode ser mensurada em função da dimensão do passeio ou excursão, que a unidade faz sob a condição de tempo mais severa. Passeio é a distância horizontal que a unidade percorre desde a sua posição de equilíbrio neutro até a posição de equilíbrio sob o carregamento ambiental, normalmente medido como um percentual da lâmina d'água.

Quanto mais rígido for o sistema de ancoragem menor será o passeio. No entanto, o tipo de material utilizado nas linhas de ancoragem determinará o limite superior para a rigidez do sistema, uma vez que aumentar a rigidez implica em elevar as trações aplicadas às linhas, aumentando consequentemente as tensões internas na linha de ancoragem. Além disso a

composição do sistema deve ser tal, que garanta a integridade do mesmo durante o tempo de operação da unidade. Ou seja, o sistema não deve falhar por fadiga.

Os sistemas de ancoragem podem ser do tipo *Single Point Mooring* (SPM) ou do tipo *Spread Mooring* (SM).

2.3 CONFIGURAÇÕES DE LINHAS DE ANCORAGEM

A escolha do tipo de ancoragem utilizado em uma unidade flutuante depende da geometria das linhas de ancoragem e principalmente do tipo de embarcação e de operação, da quantidade de *risers*, do custo e da profundidade do mar (CARBONO, 2005).

Existem vários modelos de configuração de linhas para a utilização em ancoragem de estruturas *offshore*. De acordo com a configuração geométrica, as linhas podem ser classificadas como ancoragem em catenária (convencional), ancoragens de raio curto (*taut leg*) e ancoragens verticais (utilizando tendões). Para cada tipo de geometria, está relacionado um tipo apropriado de elemento de fundação. A seguir, são apresentadas as principais configurações de ancoragem empregadas em plataformas flutuantes.

2.3.1 Ancoragem em catenária livre

A ancoragem cujas linhas possuem a forma de catenária é denominada de ancoragem em catenária ou convencional. Por definição, catenária é a curva que representa o formato de um cabo suspenso pelas extremidades sob ação do seu peso próprio.

A ancoragem em catenária caracteriza-se por permitir maiores deslocamentos da plataforma. O atrito do grande trecho de linha apoiada no leito marinho absorve parte das solicitações, reduzindo os esforços na âncora.

A necessidade de se ter um raio de ancoragem razoavelmente alto, cerca de três vezes a altura da lamina d'água, eleva os custos da linha, além de gerar uma possível interferência entre as linhas de ancoragem e linhas de outras unidades próximas ou com equipamentos submarinos.

Este tipo de configuração pode ser utilizado para ancorar plataformas semi- submersíveis e navios FPSO.

2.3.2 Linha de ancoragem retasada (*taut leg*)

A linha de ancoragem retasada ou *taut leg* diferencia-se da configuração em catenária principalmente pela geometria. Neste sistema as linhas se encontram inclinadas e tracionadas que podem chegar com ângulo de topo de 45° com a vertical, configurando um menor comprimento da linha de ancoragem, além de proporcionar maior rigidez ao sistema e limitar o passeio da embarcação. Neste sistema, as âncoras a serem utilizadas devem possuir alta capacidade de resistência à carga de arrancamento na direção axial, tais como estacas de sucção, VLA (*Vertical Load Anchor*) e estacas torpedo.

Assim como na ancoragem convencional, as linhas em configuração *taut leg* são constituídas nas extremidades por cabos de aço ou amarras e no trecho intermediário por cabo de poliéster. Conforme observado na figura 2.1, a grande vantagem da configuração *taut leg* em relação à convencional é a redução do raio de ancoragem e, conseqüentemente, do comprimento total da linha.

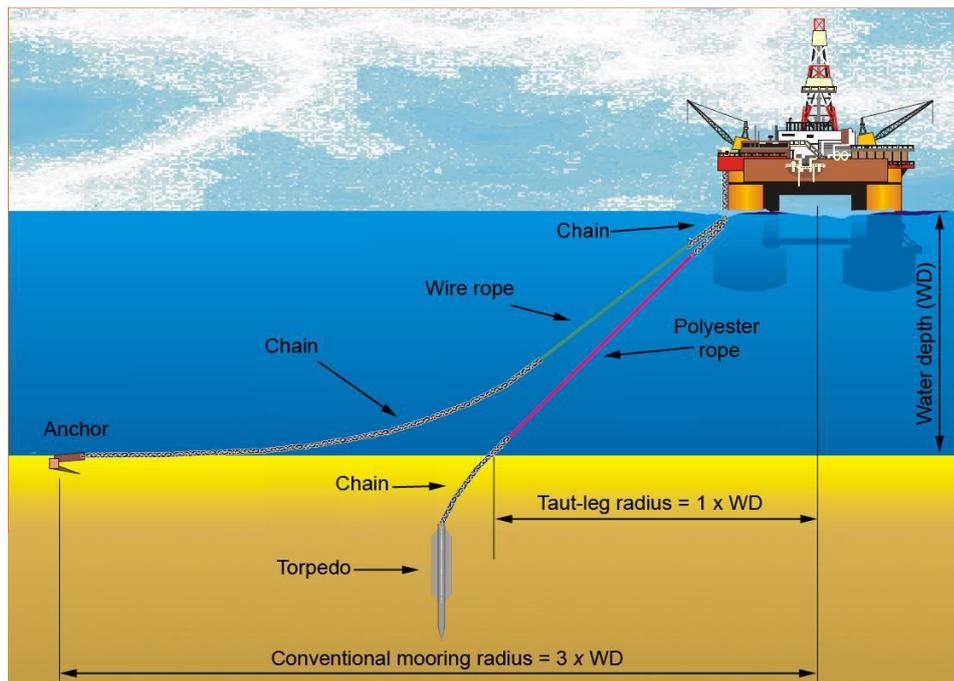


Figura 2.1: Comparação do raio de ancoragem em catenária livre e *taut leg* (SAGRILO et al, 2012).

2.3.3 Linha de ancoragem vertical

A ancoragem vertical é baseada na utilização de tendões verticais, que são constantemente tracionados em decorrência do empuxo proveniente da parte submersa da embarcação. Trata-se de ancoragem utilizada principalmente em plataformas de pernas atirantadas (*Tension Leg Platforms* - TLP).

Os tendões impõem ao sistema uma rigidez elevada no plano vertical, enquanto a rigidez no plano horizontal é reduzida, sendo fornecida pela componente horizontal da força de restauração quando da solicitação da linha no referido plano. Para tendões de pequenos diâmetros ($d \approx 0,25$ m), os efeitos de flexão podem ser desprezados enquanto que para grandes diâmetros ($d \approx 1,00$ m) os efeitos de flexão devem ser considerados (CORREA, 2003).

2.4 COMPONENTES DE LINHAS DE ANCORAGEM

As linhas de ancoragem são compostas de linhas formadas por amarras, cabos de aço, cabos sintéticos ou uma combinação dos três, sendo esta configuração determinada a partir das exigências a serem atendidas pelo sistema de ancoragem. Na terminação das linhas de ancoragem, são utilizadas âncoras ou estacas, e nos trechos intermediários podem ser encontrados alguns acessórios para a conexão de tramos de materiais diferentes (KUNITAKI, 2006). A seguir, são detalhadas as características de cada tipo de material usualmente utilizado na composição das linhas de ancoragem.

2.4.1 Amarras

Amarras são elos fabricados a partir de barras de aço formando uma corrente, com alta resistência à abrasão e elevada vida útil. Podem ser classificadas em categorias ou graus em função da resistência ao escoamento do aço utilizado na fabricação, sendo a de grau 4 ou R4 a mais resistente.

A utilização de linhas de ancoragem compostas somente por amarras é inviável devido ao elevado peso linear, que pode comprometer a flutuabilidade da plataforma bem como reduzir a capacidade de restauração da linha. Sendo assim opta-se pela utilização de linhas de ancoragem combinadas, com colocação de amarras nos trechos de linha em contato com o solo marinho e junto à embarcação, de forma a reduzir o desgaste e a abrasão e ainda

contribuir para evitar carga vertical na ancora. E na região intermediária utiliza-se cabos de aço ou poliéster.

Há elementos acessórios utilizados nas ligações e pontos de descontinuidade que apresentam a mesma tensão de ruptura das amarras, no entanto são mais susceptíveis à fadiga, por este motivo devem ser evitados.

Conforme observado na figura 2.2, as amarras podem ser do tipo com ou sem malhete.

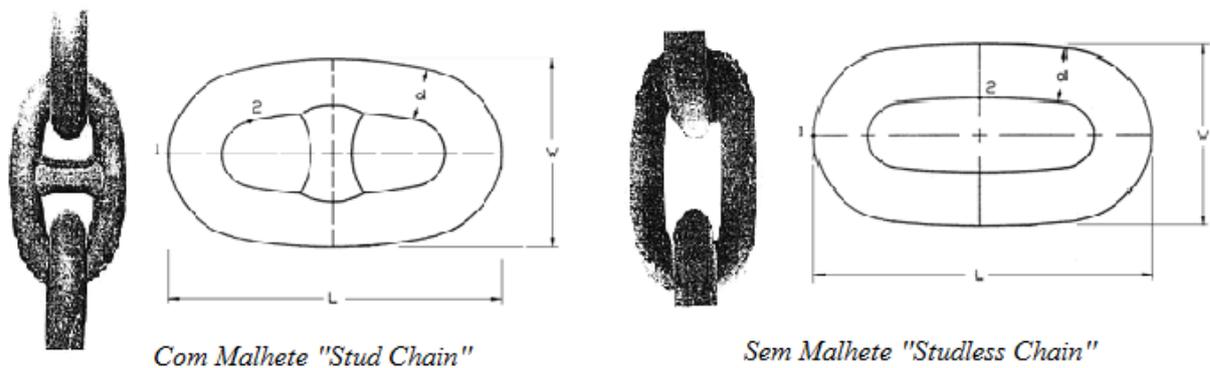


Figura 2.2: Representação dos tipos de amarras (LIMA, 2011).

2.4.2 Cabos de aço

Os cabos de aço são formados por fios de aço enrolados e agrupados, que garantem elevada rigidez axial e flexibilidade. Possuem um peso menor do que as amarras, mas uma elasticidade maior para a mesma carga de ruptura. Porém, a desvantagem dos cabos de aço é que estes são mais vulneráveis a corrosão do que as amarras, sendo assim a vida útil de um cabo de ancoragem é bem inferior a de uma amarra (PINA, 2010).

Os principais tipos de cabo de aço empregados na ancoragem de sistemas flutuantes são o *six strand* e o *spiral strand*, apresentados na figura 2.3. Os cabos *six strand* são mais comumente utilizados em unidades de perfuração devido ao seu fácil manuseio. Os cabos do tipo *spiral strand* apresentam maior durabilidade e são mais resistentes à fadiga, porém seu custo é maior.

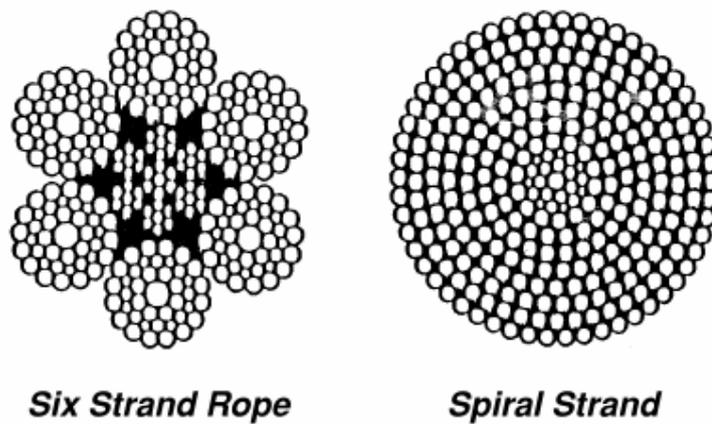


Figura 2.3: Representação dos tipos de cabos de aço (API, 2005).

2.4.3 Cabos de poliéster

Nas linhas de ancoragem, o cabo sintético mais utilizado é o de poliéster, que apresenta flexibilidade axial bem maior que do cabo de aço e das amarras com a mesma carga de ruptura nominal e um peso submerso por unidade de comprimento bem menor.

Segundo MONTEIRO (2008), os tendões de poliéster apresentam baixa ou nenhuma rigidez à compressão axial. Por este motivo, devem estar necessariamente submetidos a esforços axiais de tração.

O desenvolvimento do tipo de ancoragem *taut leg* (apresentado na seção 2.3.2) exigiu o emprego de um material que permitisse um maior alongamento que os cabos de aço, pois esta característica é a principal responsável pela absorção dos movimentos dinâmicos da plataforma pelas linhas pré-tensionadas, reduzindo consideravelmente o passeio destas (LIMA, 2006).

A combinação dos materiais citados anteriormente é utilizada para maximizar o desempenho das linhas de ancoragem. Exemplo típico é a utilização de amarras no trecho de linha junto à âncora e no trecho superior junto à embarcação, de forma a reduzir o desgaste e a abrasão e ainda contribuir para reduzir a carga vertical na âncora. No trecho central da linha emprega-se cabo de aço ou poliéster que reduz a carga vertical, possibilitando a redução da pré-tensão para uma mesma força de restauração.

2.5 FUNDAÇÕES PARA ANCORAGEM DE SISTEMAS FLUTUANTES

Os esforços do sistema são transmitidos para o fundo marinho através de pontos de ancoragem no fundo do mar e o elemento responsável pela fixação deste ponto é chamado de âncora ou estaca.

2.5.1 Âncora de Sucção

Âncora ou estaca de sucção, apresentada na figura 2.4, é um elemento de fixação cilíndrico de aço, aberto na ponta e fechado no topo. O processo de cravação ocorre inicialmente por peso próprio, em seguida pela retirada da água do interior do cilindro, por meio de um sistema de bombeamento, onde é gerado um gradiente de pressão. Desta forma, surge uma força de sucção atuando de cima para baixo e que somada ao peso próprio, gera a penetração da estaca no solo marinho (HOULSBY & BYRNE, 2005).



Figura 2.4: Estacas de Sucção (SHARMA, 2004).

2.5.2 Âncora convencional

O processo de instalação é feito por arrasto, com o auxílio de uma embarcação que é responsável por lançar e puxar a âncora. É composta por uma haste (*shank*) que fornece o ângulo de ataque para o seu enterramento no solo; por uma garra (*fluke*), que mobiliza a capacidade de carga do solo; por um cepo (*stock*), que fornece estabilidade e impede sua rotação no solo e por uma coroa (*crown*), que é responsável pela rigidez da âncora, interligando as outras peças (MELLO & BOGOSSIAN, 1998). A figura 2.5 apresenta os detalhes da âncora convencional.

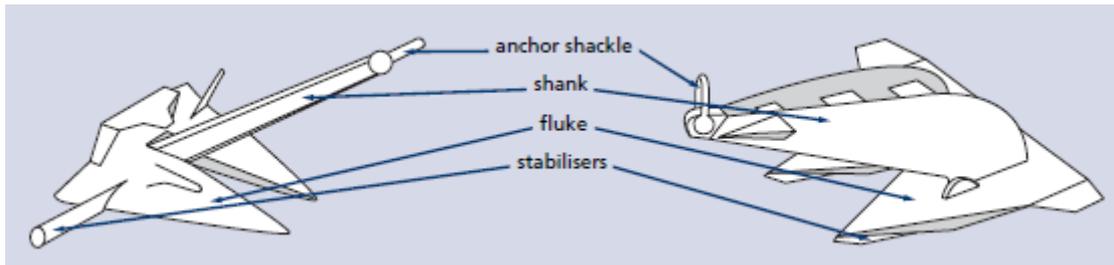


Figura 2.5: Detalhes de uma âncora convencional (VRIHOF, 2010).

Este tipo de âncora não resiste a carregamentos com componentes verticais sendo, portanto, empregada em sistemas que utilizam ancoragem em catenária convencional.

2.5.3 VLA

O uso cada vez maior de ancoragens *taut leg*, fez surgir a necessidade de se desenvolver um sistema de ancoragem que suportasse cargas com componentes verticais. Uma solução foi a utilização das âncoras VLA (*Vertical Load Anchor*) que são cravadas através do arraste no solo marinho. Os procedimentos de arraste podem impedir seu posicionamento correto, principalmente em áreas congestionadas por muitas plataformas, além de necessitarem de embarcações de alto custo para auxiliar o processo de instalação (ELTAHER et al.,2003). A figura 2.6 apresenta um modelo de âncora VLA.



Figura 2.6: Âncora VLA (LOUREIRO, 2007).

2.5.4 Estaca Torpedo

A Petrobras desenvolveu o conceito de estaca ou âncora torpedo como alternativa para diminuir custos de fabricação e instalação de fundações em águas profundas. O torpedo consiste em uma tubulação metálica, preenchido com lastro, que é liberado a partir de uma altura determinada e penetra o leito marinho por peso próprio (AYABE, 2001). Segundo MEDEIROS (2002), a estaca torpedo possui um olhal no topo, que se conecta com a linha de ancoragem e permite que as cargas possam ser aplicadas em qualquer direção, além de contar com aletas laterais que são responsáveis por permitir maior rigidez axial, e manter a verticalidade durante o lançamento. A figura 2.7 apresenta um modelo de estaca torpedo.

A estaca torpedo é menos sensível ao aumento da lamina d' água do que os conceitos convencionais, visto que, não necessita de equipamentos submarinos especiais, ou grandes embarcações de apoio. Não existe nenhuma restrição para a sua aplicação em águas ultra-profundas. MEDEIROS (2001). Para instalação necessita-se um único rebocador para realizar o transporte e o lançamento. Essa simplificação significa menor quantidade de meios navais utilizados e tempo de instalação, quando comparado a outros tipos de fundações. Além disso, este tipo de operação não requer operações de arraste, como é o caso das âncoras. Dessa forma, os torpedos podem ser instalados em áreas congestionadas sem que haja interferência das linhas de ancoragem já existentes na região.



Figura 2.7: Detalhe da geometria da estaca torpedo (SAGRILO et al., 2010)

O torpedo tem sido avaliado por diversos testes experimentais com o intuito de analisar o comportamento de cravação e capacidade de carga e, além disso, modelos numéricos têm sido desenvolvidos para melhorar a previsibilidade da carga-limite (AGUIAR et al., 2009). A

análise de estacas torpedo usualmente envolve os seguintes pontos: determinação da capacidade de carga destas estacas cravadas em solos argilosos e/ou arenosos totalmente saturados considerando cargas atuantes em qualquer direção. Deve-se também levar em conta o comportamento não-linear físico e geométrico do solo e da estaca e avaliar as tensões que se desenvolvem ao longo da estaca torpedo (COSTA et al, 2010).

Ensaio de cravação realizados por MEDEIROS (2001) em diferentes tipos de solos mostraram que, para uma mesma altura de queda de 30m, a penetração da ponta da estaca varia consideravelmente. Na argila normalmente adensada a estaca penetrou 29m, enquanto que numa argila pré-adensada a penetração foi de 13,5m. Isto indica a relevância de um conhecimento adequado do subsolo para se prever a profundidade de cravação de forma apropriada no projeto.

Segundo estudos realizados por MEDEIROS (2002) na Bacia de Campos, cujo solo é constituído de argila normalmente adensada, a velocidade de impacto, ou seja, a velocidade máxima com a qual a estaca toca o solo variou de 10 a 22m/s, para alturas de queda entre 30 e 150 m, resultando em penetrações de 8 a 22 m do topo da estaca no solo.

No ensaio de um torpedo de 30” de diâmetro com uma penetração de ponta de 20m, obteve uma capacidade de suporte imediatamente após a cravação variando entre 900 e 1100 kN. E no ensaio de uma estaca de 42” submetida a um carregamento aplicado a 45°, atingiu uma penetração de ponta de 29 m e rompeu para cargas entre 1900 e 2200 kN MEDEIROS (2002).

2.6 MÉTODO DE ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DE CRAVAÇÃO DA ESTACA TORPEDO

O modelo analítico tradicionalmente empregado para representar a penetração de uma estaca torpedo se fundamenta na solução no domínio do tempo do modelo desenvolvido por TRUE (1976) para cravação de projeteis em solos argilosos sob condição não drenada. A figura 2.8 apresenta as forças consideradas por TRUE (1976) para um modelo cilíndrico.

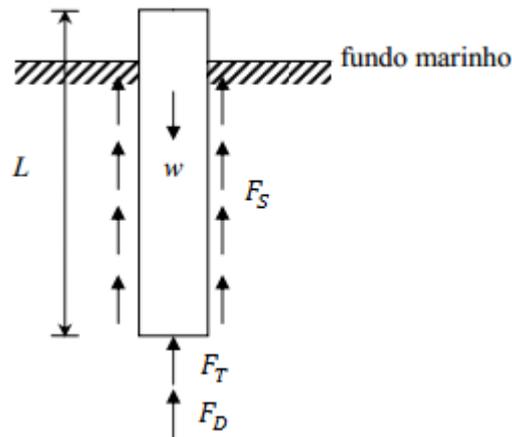


Figura 2.8: Forças de atuação no projétil.

A equação diferencial proposta é baseada na segunda lei de Newton:

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

Onde M' , v , z e t são, respectivamente, massa efetiva, velocidade, profundidade e tempo; W_s é o peso submerso do elemento de fundação; F_D , F_T e F_S são, respectivamente, força de arrasto, resistência de ponta e resistência lateral.

A força de arrasto é expressa como:

$$F_D = \frac{1}{2} v \cdot |v| \cdot A_f \cdot C_D \cdot \rho \quad (2.2)$$

Em que v é a velocidade, A_f é a área frontal da ancora e C_D é o coeficiente de arrasto, função da velocidade de impacto da estaca.

TRUE (1976) considerou a resistência dinâmica do solo por meio da inclusão do fator da taxa de deformação ($R_{\dot{\epsilon}}$) e do fator de redução da adesão lateral (δ) nas resistências estáticas. Portanto, a resistência de ponta e a resistência lateral são definidas, respectivamente, pelas expressões:

$$F_T = (S_u \cdot N_c \cdot A_f) \cdot R_{\dot{\epsilon}} \quad (2.3)$$

$$F_S = \left(\frac{S_u \cdot A_s \cdot \delta}{S_{ti}} \right) \cdot R_{\dot{\epsilon}} \quad (2.4)$$

Onde N_c e A_s são, respectivamente, fator de capacidade de carga e área. S_u é a resistência ao cisalhamento não drenada e S_{ti} representa a perda da resistência ao cisalhamento que as argilas sofrem quando são amolgadas.

$R_{\dot{e}}$ é definido como:

$$R_{\dot{e}} = \frac{R_e}{1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{C_{\dot{e}} \cdot v}{S_u \cdot d} + C_0}}} \quad (2.5)$$

Onde R_e é o fator empírico da máxima taxa de deformação do solo em velocidades altas; $C_{\dot{e}}$ é o coeficiente empírico da taxa de deformação; C_0 é a constante empírica da taxa de deformação e d é o diâmetro da estaca.

Para solução da equação 2.1 TRUE (1976) desenvolveu um algoritmo incremental baseado no método de diferenças finitas. Substituindo as expressões 2.2 a 2.5 em 2.1, tem-se:

$$v_{i+1} = v_{i-1} + \frac{2\Delta z}{v_i \cdot M'} \cdot \left[(W_s) - \left(\frac{1}{2} v_i^2 \cdot A_f \cdot C_D \cdot \rho_i \right) - S_{u_i} \cdot \left(A_f \cdot N_c + \frac{A_s \cdot \delta}{S_{ti}} \right) \cdot \left(\frac{R_e}{1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{C_{\dot{e}} \cdot v_i}{S_{u_i} \cdot d} + C_0}}} \right) \right] \quad (2.6)$$

No primeiro passo do processo iterativo, adota-se $v_1 = v_0$ e emprega-se a equação (2.6) para obtenção de v_2 . Recalcula-se, então, v_1 tomando a média entre v_0 e v_2 . Continua a iteração até $v_{i+1} < 0$. A profundidade de penetração é calculada, através da multiplicação do número de incrementos pelo valor do incremento de profundidade analisado.

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

2.7 MÉTODO DE ANÁLISE DE LINHAS DE ANCORAGEM

Neste item é feita uma descrição da equação que define a forma que a linha de ancoragem assume quando sujeita a ação do próprio peso e de como o esforço de tração varia ao longo de seu comprimento. A Figura 2.9 mostra uma configuração típica da linha, geralmente composta por trechos ou tramos de materiais diferentes, ou seja, com propriedades físicas e geométricas variáveis ao longo do comprimento.

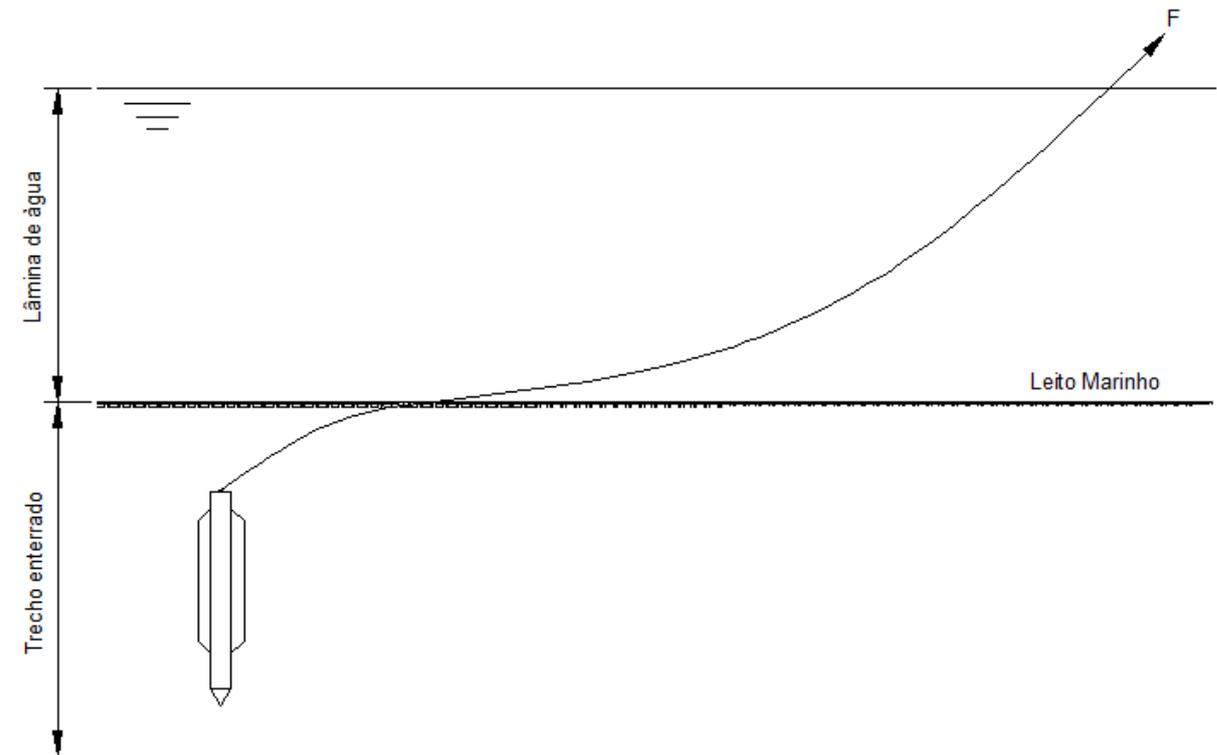


Figura 2.9: Configuração típica da linha de ancoragem no leito marinho.

O cálculo da posição de equilíbrio estático da unidade flutuante é realizado aplicando-se a equação da catenária para cada linha de ancoragem com o objetivo de obter as forças de restauração da unidade.

2.7.1. Equilíbrio da catenária suspensa

De posse dos comprimentos de cada tramo da linha é possível calcular as projeções horizontais e verticais de cada segmento, bem como os ângulos que formam com o eixo horizontal a partir das seguintes formulações descritas em BANG, 1996:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \cdot \left[\tan\theta_0 + \frac{S_c \cdot W_c}{TH} \right] \quad (2.8)$$

$$\Delta Y_c = \frac{TH}{W_c} \cdot [\sec\theta_1 - \sec\theta_0] \quad (2.9)$$

$$\Delta X_c = \frac{TH}{W_c} \cdot \ln \left[\frac{\tan \left(45^\circ + \frac{\theta_1}{2} \right)}{\tan \left(45^\circ + \frac{\theta_0}{2} \right)} \right] \quad (2.10)$$

Onde:

θ_0 : Ângulo inicial do elemento em relação à horizontal;

θ_1 : Ângulo final do elemento em relação à horizontal;

S_c : Comprimento do segmento;

W_c : Peso submerso por unidade de comprimento do elemento;

TH : Componente horizontal da tração;

ΔY_c : Projeção vertical do comprimento do segmento;

ΔX_c : Projeção horizontal do comprimento do segmento.

É necessário compatibilizar os segmentos de modo que o ângulo final de um tramo seja o inicial do tramo seguinte. No último trecho suspenso da catenária, a solução deve ser ajustada de modo que a soma das projeções verticais dos tramos seja igual à profundidade da lâmina d'água. Neste caso, ajusta-se o comprimento do trecho, o ângulo final da linha e a projeção horizontal em função da projeção vertical, cujo valor é obtido pela diferença entre a profundidade da lâmina d'água e a soma das projeções verticais. Obtem-se para o tramo final as seguintes formulações:

$$\theta_b = \sec^{-1} \cdot \left[\sec \theta_1 + \frac{\Delta Y_{wr} \cdot W_{wr}}{TH} \right] \quad (2.11)$$

$$S_{wr} = \frac{TH}{W_{wr}} \cdot [\tan \theta_b - \tan \theta_1] \quad (2.12)$$

$$\Delta X_{wr} = \frac{TH}{W_{wr}} \cdot \ln \left[\frac{\tan \left(45^\circ + \frac{\theta_b}{2} \right)}{\tan \left(45^\circ + \frac{\theta_1}{2} \right)} \right] \quad (2.13)$$

Onde:

θ_b : Ângulo final do elemento em relação à horizontal;

θ_1 : Ângulo inicial do elemento em relação à horizontal;

ΔY_{wr} : Projeção vertical do comprimento do último segmento;

ΔX_{wr} : Projeção horizontal do comprimento do último segmento;

W_{wr} : Peso submerso por unidade de comprimento do último segmento;

S_{wr} : Comprimento do último segmento;

TH : Componente horizontal da tração.

A figura 2.10 apresenta o equilíbrio do trecho suspenso da linha de ancoragem.

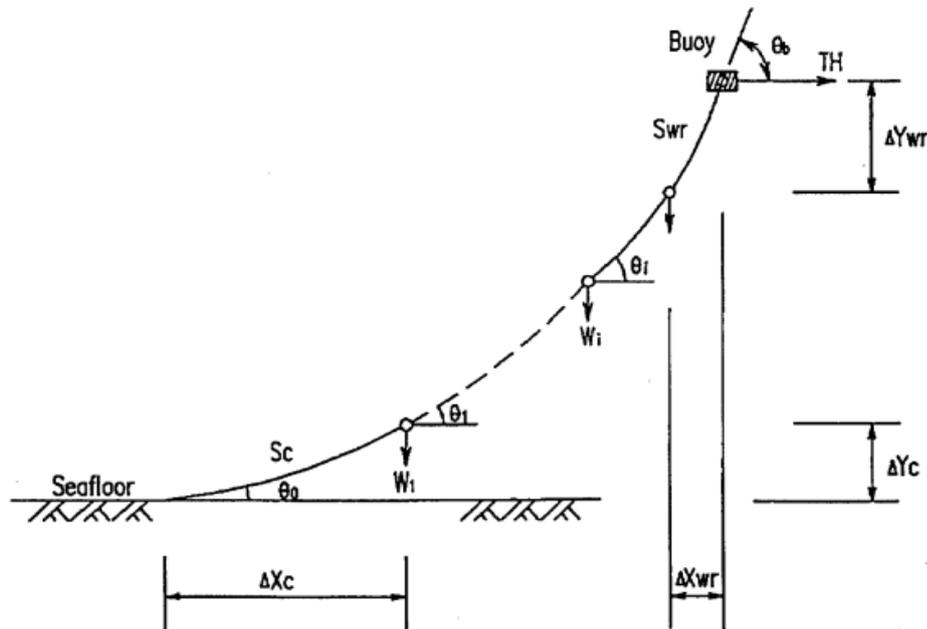


Figura 2.10: Geometria da catenária suspensa (BANG, 1996).

Maiores detalhes sobre os procedimentos envolvidos na análise da catenária suspensa podem ser encontrados nas pesquisas realizadas por VAN SLUIJS & BLOK (1977) e DUTTA (1986).

2.7.2 Equilíbrio do trecho apoiado no leito marinho

Segundo DNV (1996), o trecho apoiado no solo colabora para o equilíbrio total da linha de ancoragem através da mobilização da força de atrito solo-linha. A variação da tração ao longo do trecho apoiado é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta T = \mu \cdot W \cdot \Delta L \quad (2.14)$$

Onde:

μ : Coeficiente de atrito solo-linha;

W: Peso submerso por unidade de comprimento do segmento apoiado no solo;

ΔL : Comprimento do segmento apoiado no solo.

Este modelo é válido apenas para ancoragem em catenária. No caso da linha de ancoragem submetida à configuração taut leg não há trecho apoiado no leito marinho.

2.7.3 Equilíbrio do trecho de linha de ancoragem embutido no leito marinho

A capacidade de carga da estaca torpedo depende diretamente da sua profundidade de cravação no leito marinho. À medida que a profundidade do topo da estaca cresce o comprimento de linha de ancoragem conectada à âncora passa a sofrer maior influência do trecho embutido no leito marinho. Esta influência é função da configuração geométrica, que modifica o ângulo de aplicação da carga no topo, bem como do valor da tração aplicada na âncora, já que parte dos esforços da linha de ancoragem é absorvida pelo trecho de linha no solo. A linha de ancoragem embutida no leito marinho assume então a configuração denominada catenária invertida que foi objeto de estudo de diversos autores tais como REESE (1973); GAULT & COX (1974); VIVATRAT *et al* (1982); DEGENKAMP & DUTTA (1989); NEUBECKER & RANDOLPH (1995); BANG (1996; 2003).

REESE (1973) apresentou um método de previsão da configuração geométrica e do perfil de cargas ao longo do trecho enterrado da amarra. O procedimento de cálculo consiste em dividir o solo a partir do leito até a conexão com a fundação em zonas de forças uniformes e assume que a amarra forma um arco circular em cada zona. Embora este método representasse um aprimoramento das soluções pré-existentes até aquele momento, as equações de equilíbrio negligencia os efeitos da resistência tangencial do solo na amarra e o peso próprio da amarra. GAULT & COX (1974) aperfeiçoaram o processo, incluindo o peso próprio da amarra e a

resistência tangencial do solo. VIVATRAT *et al* (1982) propuseram uma solução analítica bidimensional para avaliar as variações de tensão da linha de ancoragem e de sua configuração no trecho embutido no solo. A figura 2.11 mostra o diagrama esquemático de um elemento infinitesimal de linha de amarração incorporado no fundo do mar, em termos de coordenadas normais e tangenciais.

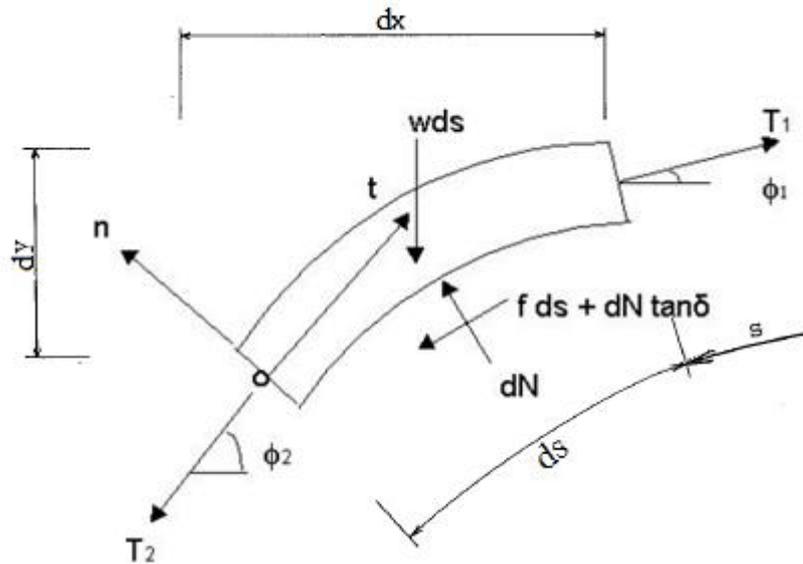


Figura 2.11: Elemento infinitesimal da linha de ancoragem (BANG, 1996; 2003).

Pelas condições de equilíbrio, tem-se:

$$\sum F_T = 0 \quad \sum F_N = 0 \quad \sum M = 0 \quad (2.15)$$

Logo:

$$dN = \frac{2 \cdot T_1 - f \cdot ds}{\tan \phi_1 + \tan \delta} \quad (2.16)$$

$$T_2 = T_1 - (f + w \cdot \sin \phi_1) \cdot ds - dN \cdot \tan \delta \quad (2.17)$$

$$\phi_2 = \phi_1 + \frac{dN - w \cdot ds \cdot \cos \phi_1}{T_2} \quad (2.18)$$

Onde:

T_1 = Tração inicial no elemento;

T_2 = Tração final no elemento;

dN = Força normal;

$f \cdot ds$ = Força tangencial no elemento;

$w \cdot ds$ = Peso por unidade de comprimento do elemento;

ϕ_1 = Ângulo inicial do elemento em relação à horizontal;

ϕ_2 = Ângulo final do elemento em relação à horizontal;

δ = Ângulo de atrito na interface entre a linha de ancoragem e o solo. Devido à dificuldade de obter, geralmente é utilizado 1 para todos os tipos de linhas de ancoragem.

A atenuação, descrita no item 2.8, é influenciada pelos parâmetros acima citados.

As componentes horizontal e vertical de cada elemento da amarra pode ser determinada a partir das seguintes formulações:

$$dx = ds \cdot \left(\frac{\cos\phi_1 + \cos\phi_2}{2} \right) \quad (2.19)$$

$$dy = ds \cdot \left(\frac{\sin\phi_1 + \sin\phi_2}{2} \right) \quad (2.20)$$

O comprimento total da amarra embutida no solo pode ser assumido como o somatório dos elementos discretizados. Para cada elemento, o valor de T_2 e ϕ_2 é determinado usando os valores já conhecidos de T_1 , ϕ_1 , w , f e dN . O procedimento de calculo é repetido para todos os elementos da amarra para determinar a configuração geométrica e a variação de tração ao longo da amarra.

A força tangencial no elemento pode ser estimada considerando que a resistência não drenada ao cisalhamento do solo é totalmente mobilizada. Portanto, pode ser estimada a partir da seguinte formulação:

$$f = EWS \cdot D \cdot \alpha \cdot \beta \cdot S_u \quad (2.21)$$

Onde:

EWS: Fator de conversão do diâmetro equivalente em área para os efeitos da força tangencial, para o caso de linhas compostas por amarras.

D: Diâmetro da linha ou de um elo da amarra;

α : Fator de adesão do solo;

β : Fator de conversão da área de contato linha-solo;

S_u = Resistência ao cisalhamento não drenado do solo.

Sendo β a razão entre a área de contato entre a linha e o solo e a área do cilindro circunscrito à linha. No caso de amarras, o cilindro é definido pelo círculo que abrange dois elos perpendiculares da mesma. No caso de cabos, o cilindro é definido pelo diâmetro do cabo.

A força normal é limitada pela capacidade de carga do solo (carga de ruptura). Sendo assim:

$$N < Q \cdot ds \quad (2.22)$$

$$Q = EWB \cdot D \cdot q \quad (2.23)$$

Onde:

Q = capacidade de carga do solo por elemento;

q = capacidade de carga do solo por unidade de comprimento;

EWB = Fator de conversão do diâmetro equivalente para os efeitos da força normal.

BANG (1996) estimou EWB como sendo 0,3 para amarras e 0,08 para cabos. A capacidade de carga da linha de ancoragem é estimada a partir da resistência lateral de um segmento de estaca localizado em regiões profundas. Para solos argilosos, tem-se:

$$q = N_c \cdot S_u \quad (2.24)$$

Onde, N_c é o fator de capacidade carga e S_u é resistência ao cisalhamento não drenado do solo.

BANG *et al* (2003), por meio de resultados obtidos em ensaios com solo arenoso em centrífuga, recomendou EWB de 2,23 e fator de atrito igual a 5 para amarras e EWB de 0,046 e fator de atrito de 0,4 para cabos.

DEGENKAMP *et al* (1989), afirmam que a ordem de magnitude dos parâmetros EWB e EWS podem ser determinados a partir das dimensões físicas da amarra e recomendam EWB em torno de 2,5 e EWB cerca de 8 para solos argilosos. Valores semelhantes foram encontrados por YEN & TOFANI (1984).

NEUBECKER & RANDOLPH (1995) fizeram algumas simplificações nas equações diferenciais que governam o comportamento da amarra dentro do solo, assumindo que a amarra é leve, eliminando assim a influencia do peso próprio e adotaram uma aproximação para pequenos valores de inclinação da força. O peso próprio da amarra foi considerado ajustando-se o perfil de capacidade de carga do solo, conforme mostrado na figura 2.12.

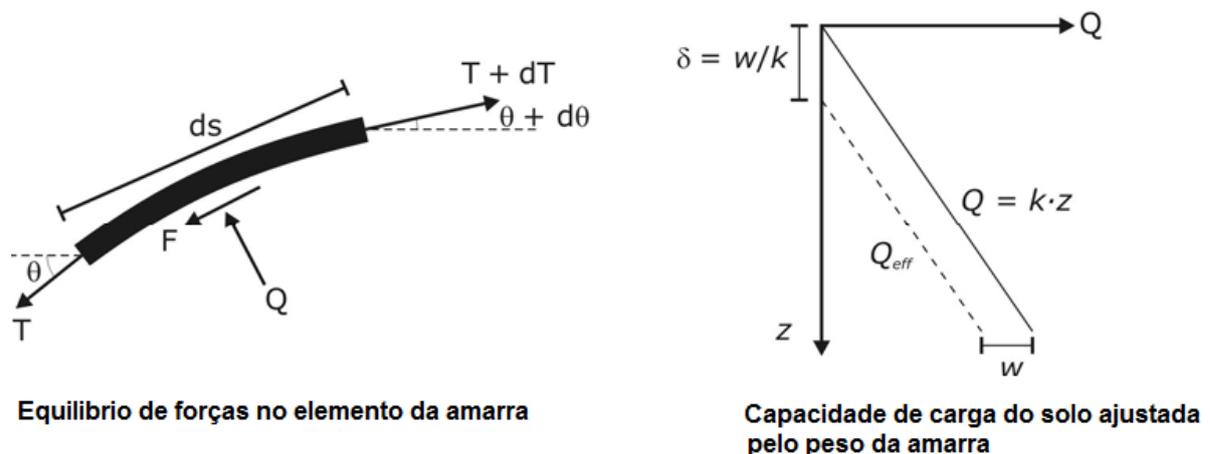


Figura 2.12: Solução simplificada da amarra (adaptado de NEUBECKER & RANDOLPH, 1995).

Os autores compararam os resultados obtidos pela simplificação proposta com os resultados provenientes da solução numérica das equações diferenciais, que demonstraram boa aproximação entre os dois métodos.

2.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE ATENUAÇÃO

A atenuação ou perda de transmissão pode ser definida como a diminuição da intensidade de energia de um sinal ao propagar-se através de um meio de transmissão. Na presente pesquisa, a atenuação será referida como a dissipação de parte da força de tração transmitida ao torpedo, portanto é a força de reação mobilizada no solo ao longo da amarra.

Na falta de um documento normativo que estabeleça um nível de confiabilidade aceitável para o dimensionamento de estacas torpedo, o projeto deve ser submetido e aprovado por Sociedades internacionais de qualificação. Uma das exigências (requisitos) adotadas pela certificadora American Bureau of Shipping (ABS), por exemplo, consiste que no dimensionamento das estacas torpedo, a carga de projeto seja a máxima carga dinâmica, acrescida de um fator de segurança global. Todavia, sabe-se, por meio de ensaios experimentais e simulações numéricas, que parte da carga aplicada na plataforma é atenuada ao longo da linha de ancoragem. Segundo WANG *et al* (2010) as estacas verticalmente carregadas e as estacas de sucção são cada vez mais utilizadas e são dimensionadas para atender a carga aplicada no olhal. Tem sido provado que o mecanismo de falha destas estacas depende não só da magnitude como da direção de aplicação da carga. No trecho entre o leito marinho e o ponto de conexão com a estaca a tensão na linha de ancoragem se reduz e muda de direção devido ao efeito da resistência do solo na região circundante à amarra.

2.8.1 Influência do trecho enterrado da linha de ancoragem

Nesta seção são expostas algumas pesquisas relacionadas ao comportamento do trecho enterrado da linha de ancoragem. A atenuação expressa em porcentagem indica o percentual da carga aplicada na superfície do leito que foi transmitida à estaca.

DEGENKAMP *et al* (1989), realizaram um estudo experimental à respeito do comportamento de amarras inseridas em solo argiloso com peso específico de $18,8 \text{ kN/m}^3$ e resistência ao cisalhamento não drenada de $4,58 \text{ kPa}$. A figura 2.13 mostra a representação esquemática do equipamento utilizado. Inicialmente, com o tanque vazio, a ponta inferior da amarra foi conectada a uma célula de carga localizada na lateral do tanque, de modo que as forças horizontal e vertical fossem medidas. Em seguida, a amarra foi colocada na posição vertical enquanto o reservatório era preenchido com argila saturada. A parte livre da amarra foi colocada sobre a superfície do solo e conectada a um cilindro hidráulico responsável pela

aplicação da carga de tração no sistema. Durante o ensaio a amarra foi tracionada a uma velocidade de 0,002 m/s, que garantiu o carregamento em condições não drenadas. Em intervalos regulares, o deslocamento (DISP), comprimento projetado da amarra (A), a força aplicada (PULLF), as forças horizontais e verticais (FHM e FVM) foram medidas.

A força resultante atuante (FLM) e o ângulo de incidência (PHI) no ponto de conexão com a fundação foram calculados a partir das forças medidas (FHM e FVM). Os ensaios foram realizados com amarras de diferentes diâmetros e diferentes profundidades.

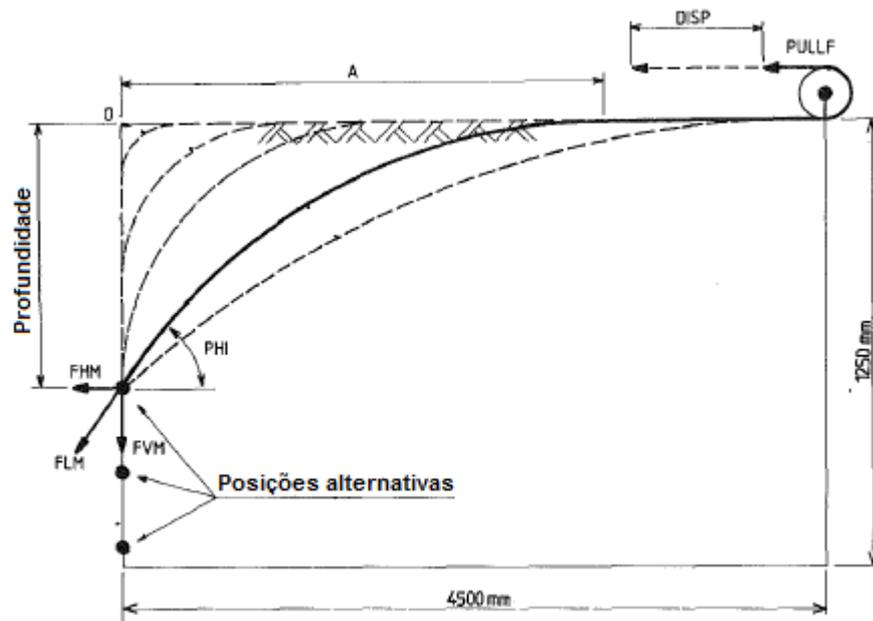


Figura 2.13: Representação esquemática do programa experimental (adaptado de DEGENKAMP *et al*, 1989).

Alguns dos resultados obtidos pelos autores estão apresentados na tabela 2.1. Nota-se que para um mesmo diâmetro de amarra e altura de solo, quanto menor a magnitude da força aplicada maior sua atenuação ao longo do trecho enterrado, devido à parte que independe da capacidade de carga do solo, e maior o ângulo de incidência na estaca, com relação à horizontal.

Tabela 2.1: Resultados dos ensaios com amarra inserida em solo argiloso (adaptado de DEGENKAMP *et al*, 1989).

Diâmetro nominal da amarra (m)	Profundidade (m)	Força aplicada (N)	Resultante da força na estaca (N)	PHI (°)	A (m)	DISP (m)	Atenuação (%)	EWB	EWS
0,0064	0,135	465	305	35	0,12	0,31	34,41	2,2	10,5
		1091	867	22,7	0,14	0,54	20,53	2,6	10
		2758	2422	14	0,16	0,92	12,18	2,7	10
	0,270	380	175	66,4	0,15	0,45	53,95	2,4	11
		541	305	50,3	0,18	0,53	43,62	2,3	10,5
		942	648	38,1	0,21	0,81	31,21	2,7	10,5
	1,008	1889	1447	51	0,7	2,25	23,4	2,7	5,5
		3694	3081	35,8	0,8	3,10	16,59	2,8	6
		7461	6632	25,2	0,9	4,20	11,11	3	6
0,0095	0,204	672	364	46,7	0,15	0,39	45,83	2,2	11
		1335	974	29,2	0,18	0,59	27,04	2,2	9
		3466	2897	17,4	0,21	1,10	16,42	2,2	9
	0,407	708	404	68,2	0,25	0,72	42,94	2,4	7,5
		1161	773	49,7	0,3	1,02	33,42	2,4	8
		2417	1911	33,1	0,35	1,43	20,94	2,7	7,5
	0,612	1268	658	65,8	0,42	1,00	48,11	2,5	10
		1841	1140	52,1	0,48	1,30	38,08	2,7	9,5
		2932	2171	38,5	0,54	1,75	25,95	2,7	8,5
0,0160	0,336	1490	878	47,8	0,25	0,77	41,07	2	8
		10042	8890	15,7	0,35	2,20	11,47	2	6
	0,672	1797	866	74,6	0,4	1,10	51,81	2,4	8,5
		2628	1553	56,8	0,48	1,40	40,91	2,4	8,5
		10961	9053	25,5	0,64	2,90	17,41	2,7	8
	1,008	2989	1835	65,9	0,7	1,85	38,61	2,4	7
		4567	3233	50,6	0,8	2,30	29,21	2,5	6,5
		8564	6890	37	0,9	3,00	19,55	2,8	6,5

Retomando o estudo já mencionado no item 2.7.3, BANG *et al* (2003) conduziram ensaios experimentais em centrífuga de modelo reduzido de linhas de ancoragem embutidas em solo arenoso, para validar a solução analítica apresentada na seção 2.7. Os resultados obtidos pelos autores estão dispostos na tabela 2.2, os ângulos de incidência são com relação à horizontal. Observa-se uma considerável atenuação da carga de tração entre a superfície do leito e o topo da estaca.

Tabela 2.2: Resultados dos ensaios de linha de ancoragem em solo arenoso (adaptado de BANG *et al*, 2003).

Tipo de linha de ancoragem	Profundidade topo da estaca (cm)	Superfície do leito		Estaca		Atenuação (%)
		Ângulo de incidência (°)	Tração (kgf)	Ângulo de incidência (°)	Tração (kgf)	
Amarra	15	3,97	33,90	87,40	18,60	45,13
		6,47	63,13	73,30	32,10	49,15
		29,00	203,73	46,17	118,30	41,93
	25	3,67	18,71	90,00	10,80	42,28
		7,18	61,45	90,00	38,90	36,70
Cabo	15	4,93	6,54	68,09	1,30	80,12
		7,59	11,01	55,83	4,40	60,04
		8,18	26,08	32,62	18,30	29,83
	25	4,62	4,73	90,00	3,40	28,12
		6,21	16,20	70,02	14,30	11,73
		7,93	31,71	61,09	29,80	6,02

Na figura 2.14 é apresentada a configuração geométrica assumida pela linha de ancoragem nos ensaios de centrífuga e a configuração obtida pela solução analítica. Consta-se uma boa concordância entre os resultados.

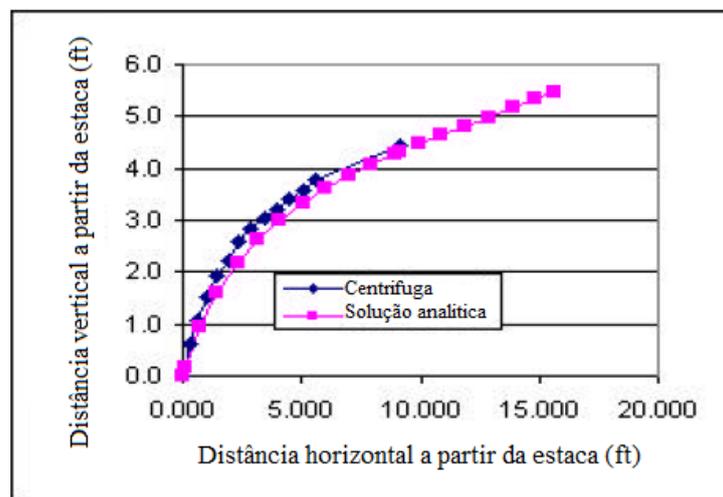


Figura 2.14: Comparação da geometria do trecho embutido da linha de ancoragem (adaptado de BANG *et al*, 2003).

AMARAL & COSTA (2004), desenvolveram um estudo para verificar os fatores de segurança das estacas torpedo do navio AVARÉ localizada no campo de Coral no Paraná. A avaliação da magnitude da carga que chega à estaca e seu ângulo de incidência com relação à

horizontal foi realizada por meio do programa DIGIN. Observa-se na figura 2.15 que as cargas no topo da estaca são linearmente dependentes do carregamento na superfície do leito marinho, sendo praticamente independente da penetração alcançada.

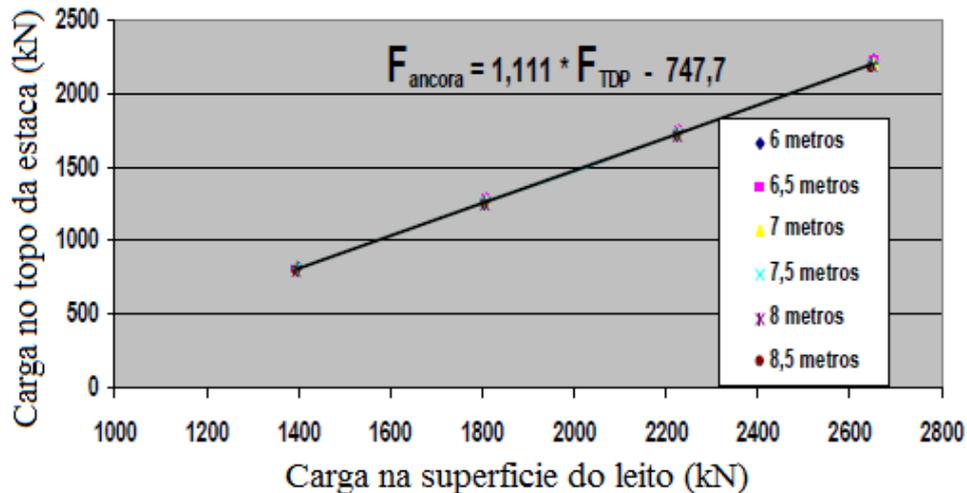


Figura 2.15: Curva Carga na estaca *versus* carga na superfície do leito marinho para diferentes penetrações da estaca (adaptado de AMARAL & COSTA, 2004).

Em contrapartida, de acordo com a figura 2.16, observa-se que o ângulo que a linha de ancoragem faz com a horizontal junto ao topo da estaca apresenta uma grande dependência com a penetração. Para cada nível de penetração, um polinômio de grau 3 representa bem a tendência de variação do ângulo com a carga no ponto, denominado TDP (*touch down point*), em que a linha de ancoragem toca o solo. Conclui-se que para uma mesma carga aplicada na superfície do leito marinho, quanto maior a profundidade de penetração da estaca maior é o ângulo de incidência da carga no topo da estaca.

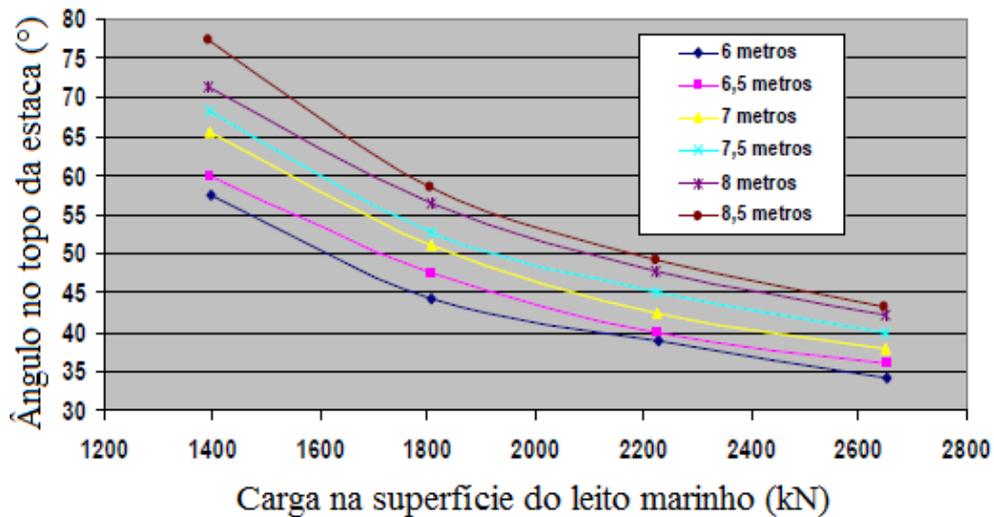


Figura 2.16: Curva ângulo de incidência da carga no topo da estaca *versus* carga na superfície do leito marinho para diferentes penetrações da estaca (adaptado de AMARAL & COSTA, 2004).

WANG *et al* (2010), realizaram um estudo à respeito da interação entre a linha de ancoragem e o solo e propuseram um modelo quasi-estático, que considera as características tridimensionais da geometria da amarra e a resistência do solo com o objetivo de proporcionar uma previsão precisa do comportamento da amarra incorporada ao solo. Os autores observaram que com o aumento do nível de tração aplicada à amarra para um mesmo ângulo de incidência na superfície do leito, houve uma elevação nos deslocamentos horizontais e diminuição do ângulo de incidência na estaca. Quando os autores mantiveram a carga constante e reduziram o ângulo de incidência no leito, o deslocamento horizontal da amarra em relação à estaca aumentou, reduzindo gradualmente o ângulo de incidência na estaca. Na tabela 2.3 são apresentadas as cargas de tração aplicada e seu ângulo de incidência na superfície do solo (com relação à horizontal), os resultados obtidos na estaca e o deslocamento da amarra no solo. Nota-se que no caso 1 a taxa de dissipação de carga entre a superfície marinha e o topo da estaca decresceu com o aumento de carga, em contrapartida, no caso 2 houve um ligeiro aumento da atenuação em função do decréscimo do ângulo de incidência da carga na superfície do solo e conseqüentemente maior deslocamento da amarra no solo.

Tabela 2.3: Resultados de ensaios em centrífuga (adaptado de WANG *et al*, 2010).

Casos	Leito marinho		Estaca		Deslocamento horizontal (m)	Atenuação (%)
	Tração (kN)	Ângulo de incidência (°)	Tração (kN)	Ângulo de incidência (°)		
Caso 1	2000	45	1583	71,9	14,5	20,85
	2400	45	1976	67,4	15,3	17,67
	2800	45	2369	64,2	15,8	15,39
	3200	45	2764	61,8	16,3	13,63
	3600	45	3160	60	16,7	12,22
	4000	45	3557	58,5	17	11,08
Caso 2	2000	45	1583	71,9	14,5	20,85
	2000	42,8	1575	70,3	15,6	21,25
	2000	40,5	1565	68,7	16,8	21,75
	2000	38,3	1555	67,2	18	22,25
	2000	36	1544	65,8	19,4	22,80
	2000	33,8	1532	64,5	20,8	23,40

Na figura 2.17, estão apresentados os resultados expressos graficamente, por meio dos quais se conclui que qualquer aumento do nível de carga e/ou de sua inclinação resultará na elevação do comprimento enterrado da amarra. Nas figuras (a) e (c), o eixo das abscissas (horizontal) representa o deslocamento horizontal da amarra e o eixo das ordenadas (vertical) representa a altura de solo. As figuras (a) e (b) apresentam o caso 1 de carregamento, é possível verificar que a catenária inversa formada pela amarra se torna gradualmente plana e o comprimento embutido aumenta levemente de 24,9 m a 26,3 m. As figuras (c) e (d) mostram que a redução da inclinação do ângulo de incidência da carga na superfície do leito marinho promove maior corte e deslizamento da corrente através do solo e o comprimento aumenta de 24,9m a 29,2 m.

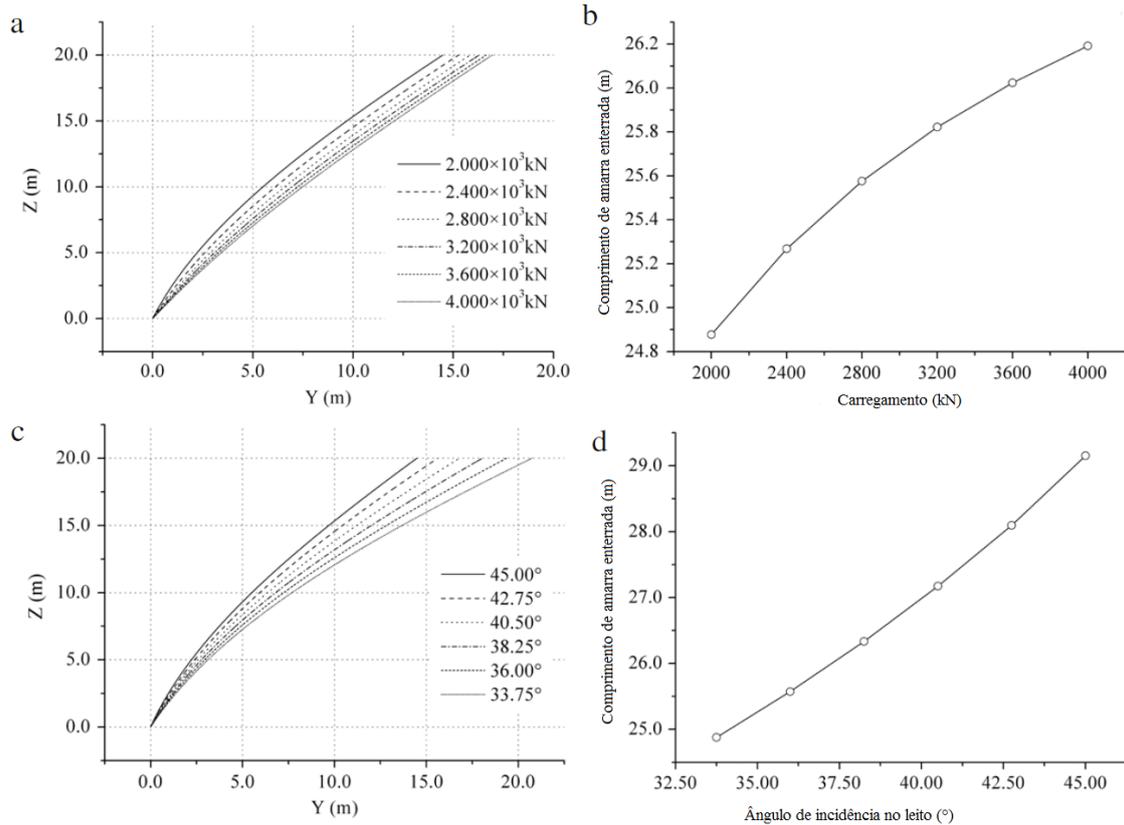


Figura 2.17: Resultados de ensaios em centrífuga (adaptado de WANG *et al.*, 2010).

KAWASAKI (2010) desenvolveu um programa em MATHCAD para analisar o comportamento das linhas de ancoragem baseado na solução analítica descrita no item 2.7 e comparou os resultados obtidos com os programas ÂNCORA e DIGIN, desenvolvidos respectivamente, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) e Det Norske Veritas (DNV). Para comparação entre os programas, o autor analisou um caso real de linha de ancoragem instalada 15m abaixo da superfície de um solo argiloso, cujo peso específico é de 15 kN/m^3 e a variação da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) ao longo da profundidade é de $(1,5 \times z)$, sendo z a profundidade. Na tabela 2.4 são apresentados os resultados obtidos, observa-se que a atenuação da carga de tração reduziu ligeiramente à medida que se elevou a carga de tração aplicada na amarra.

Tabela 2.4: Comparação entre resultados obtidos nos programas MATHCAD, ÂNCORA e DIGIN (adaptado de KAWASAKI, 2010).

Caso	MATHCAD				
	Tração (kN)	Ângulo de incidência no solo (°)	Tração (kN)	Ângulo de incidência na estaca (°)	Atenuação (%)
1	6000	33,69	5714,96	40,83	4,75
2	7000	34,38	6719,49	40,37	4,01
3	8000	34,84	7719,27	40,07	3,51
Caso	ÂNCORA				
	Tração (kN)	Ângulo de incidência no solo (°)	Tração (kN)	Ângulo de incidência na estaca (°)	Atenuação (%)
1	6000	33,75	5846,95	42,02	2,55
2	7000	34,41	6847,22	41,57	2,18
3	8000	34,88	7847,37	41,19	1,91
Caso	DIGIN				
	Tração (kN)	Ângulo de incidência no solo (°)	Tração (kN)	Ângulo de incidência na estaca (°)	Atenuação (%)
1	6001,25	32,93	5971,54	41,35	0,50
2	7001,41	33,49	6971,54	40,78	0,43
3	8000,54	33,89	7971,54	40,3	0,36

LIU *et al* (2012) desenvolveram um modelo cinemático para âncoras de arrasto em solos marinhos. Em 2013, LIU *et al* introduziram a equação da catenária inversa no modelo e conduziram um estudo numérico sobre a geometria assumida pelo trecho enterrado de linha de ancoragem conectada à uma âncora de arrasto. A figura 2.18 apresenta os resultados fornecidos para os ângulos de incidência na âncora de 5°, 25°, 45° e 65° com relação à horizontal, são apresentados também os resultados obtidos por NEUBECKER & RANDOLPH (1995) em ensaios de centrífuga realizados em uma argila normalmente adensada e os resultados das simulações numérica com fator de atrito de 0,4 e 0,6, que apresentaram boa concordância entre si. O eixo das abscissas (horizontal) é representado pelo o deslocamento horizontal da amarra adimensionalizado pela profundidade do ponto de conexão com a âncora e o eixo das ordenadas é representado pela profundidade da camada de solo adimensionalizada pela a profundidade até o ponto de conexão com a âncora. Nota-se que para uma mesma carga, alterando apenas o ângulo de incidência da carga no ponto de

conexão entre amarra e âncora, quanto menor a inclinação com relação à horizontal, maiores são os deslocamentos horizontais da amarra com relação à âncora.

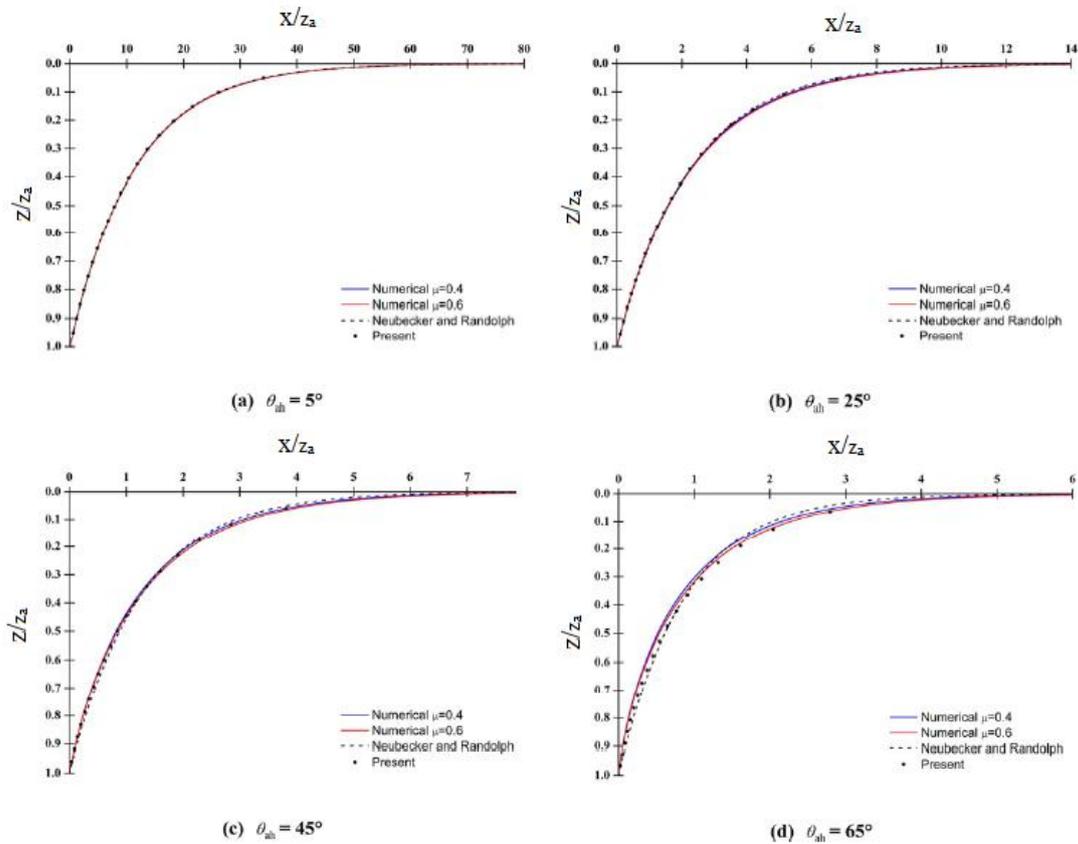


Figura 2.18: Comparação da geometria do trecho embutido da linha de ancoragem para 4 ângulos de incidência na fundação (adaptado de LIU *et al*, 2013).

3 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo busca-se apresentar de forma sucinta o estudo de caso, denominado caso típico, que se enquadra em situação real de projeto de sistemas flutuantes ancorados, a fim de se obter a correta consideração de critérios de similaridade. A ferramenta computacional DIGIN desenvolvida pela Det Norske Veritas (DNV) e cedida pela Petrobrás foi utilizada para prever o comportamento da linha de ancoragem quando submetida a diferentes níveis de tração, mantendo-se o comprimento total da mesma.

A partir dos resultados obtidos pelo programa foi realizada a análise de similaridade para projetar os equipamentos utilizados nos de ensaios experimentais com medida das cargas de tração axial correspondentes aos carregamentos impostos na linha de ancoragem, de modo a reproduzir as condições de funcionamento do sistema.

3.1 CASO TÍPICO

As avaliações realizadas foram baseadas no projeto da plataforma FPSO Cidade de Angra dos Reis, de propriedade da Petrobras. A seguir, são apresentados somente os dados necessários para entrada no programa DIGIN, sendo que as demais informações não serão discutidas neste trabalho, por se tratar de informações confidenciais e de posse da Petrobras.

3.1.1 Descrição da Plataforma

A unidade em estudo é do tipo navio ancorado (FPSO) que opera em uma lâmina d'água de 2135m e está instalada na área de Tupi, localizada na Bacia de Santos, Estado de São Paulo. O sistema de ancoragem apresenta 24 linhas em configuração *taut leg*.

3.1.2 Caracterização do solo

De acordo com os ensaios campo (piezocone) e laboratório (mini palheta, triaxiais e cisalhamento direto simples) realizados pela PETROBRAS, o solo da região de ancoragem da plataforma na Bacia de Santos se caracteriza pela presença de argila normalmente adensada ao longo da profundidade, com boa homogeneidade espacial. Portanto, pode-se definir o perfil de resistência não drenada da argila através de uma reta com crescimento linear ao longo da profundidade (HENRIQUES et al, 2010). Conforme mostrado na figura

3.1, a variação da resistência ao cisalhamento não drenada com a profundidade, para o solo da região é fornecida pela seguinte equação:

$$s_u(kPa) = 1,4 \cdot z \quad (3.1)$$

onde:

z (m) = profundidade do leito marinho

Observa-se que os resultados de resistência ao cisalhamento não drenada obtidos nos ensaios de piezocone estão em termos de tensões totais, representados por Su_{TT} . Os ensaios triaxiais realizados foram do tipo: não consolidado e não drenado (UU); consolidado e não drenado (CIU) e consolidado e não drenado com extensão lateral (CIU - EL). São apresentados também, os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto simples (DSS), os resultados de mini palheta (Miniature Vane) e mini palheta de bolso (Torvane).

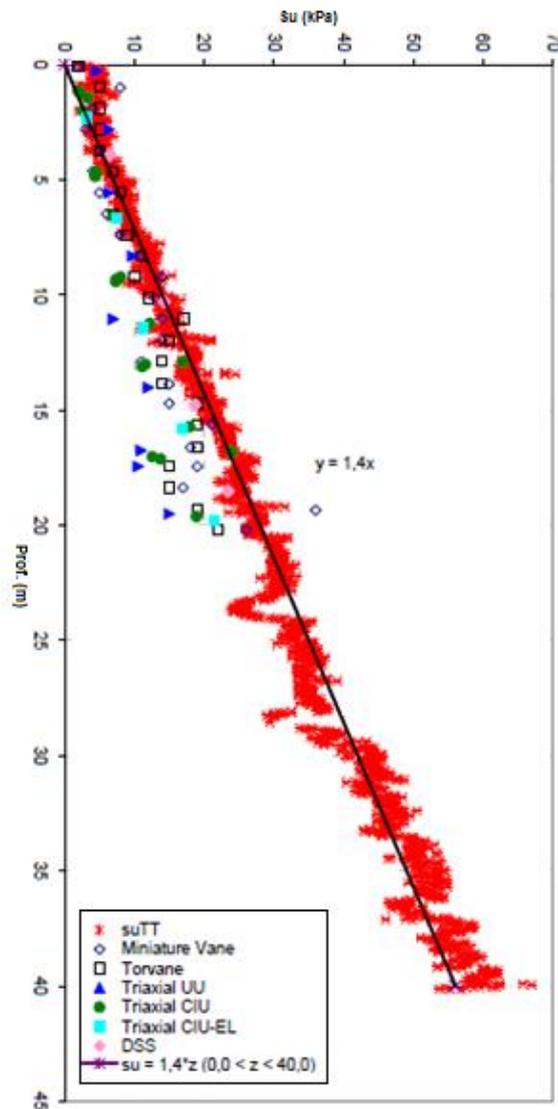


Figura 3.1: Resultados de ensaios de campo e laboratório realizados na Bacia de Santos (adaptado de TECHNICAL REPORT, 2010).

3.1.3 Propriedades físicas e geométricas das linhas de Ancoragem

De modo a simplificar as análises, adotou-se a hipótese de que as 24 linhas de ancoragem possuem comprimentos iguais e características físicas idênticas e, portanto foi considerada uma única linha no estudo de caso. Trata-se de uma linha de ancoragem composta por três trechos distintos, sendo estes contados a partir do ponto de conexão com a âncora: amarra de 550 m de comprimento e 0,120 m de diâmetro; cabo de poliéster de 2636 m de comprimento e 0,206 m de diâmetro; amarra de 140 m de comprimento e 0,120 m de diâmetro, totalizando 3326 m de comprimento da linha de ancoragem, conforme detalhado na Tabela 3.1 e ilustrado na Figura 3.2.

Tabela 3.1: Propriedades Físicas e Geométricas das linhas de Ancoragem.

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

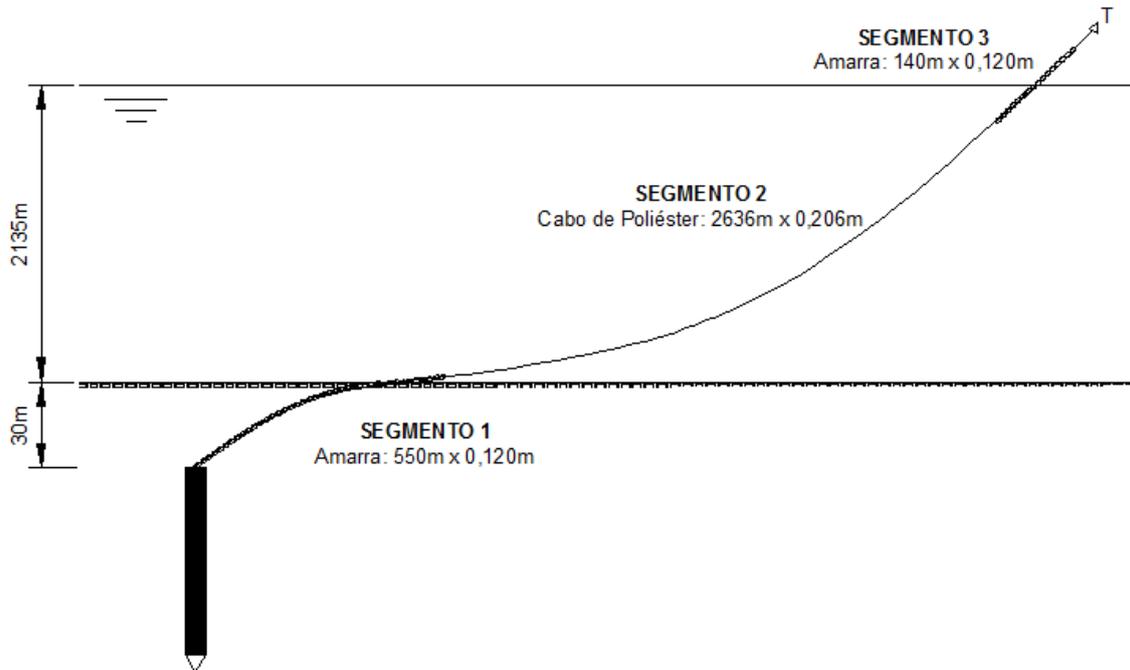


Figura 3.2: Esquema ilustrativo da linha de ancoragem analisada.

3.1.4 Estaca Torpedo

A alternativa utilizada como ponto de fixação da ancoragem foi a estaca torpedo denominada T-120. Atualmente é a estaca torpedo de maior capacidade de carga entre as estacas correntemente utilizadas na ancoragem de unidades flutuantes pela PETROBRAS, possui 120 toneladas de peso ao ar e 22,1 m de comprimento. O comprimento de cravação da estaca foi calculado por meio do programa PROJÉTIL, baseado no modelo analítico proposto por TRUE (1976), sendo adotada a distância do topo da estaca ao leito marinho de 28,8 m.

3.2 ESFORÇOS ATUANTES E GEOMETRIA

O programa DIGIN fornece por meio do método de análise da linha de ancoragem demonstrado anteriormente no item 2.6, as coordenadas dos pontos discretizados, os ângulos referentes às inclinações da linha de ancoragem com relação à horizontal e a variação da tração ao longo da linha de ancoragem, bem como as projeções horizontais e verticais da mesma. Sendo assim, o programa foi utilizado para simular o comportamento da linha de ancoragem quando submetida a níveis de tração usualmente empregados em projeto, variando de 3000 kN a 7000 kN no leito marinho, conforme observado na figura 3.3. Em todos os casos o comprimento total da linha de ancoragem foi mantido fixo.

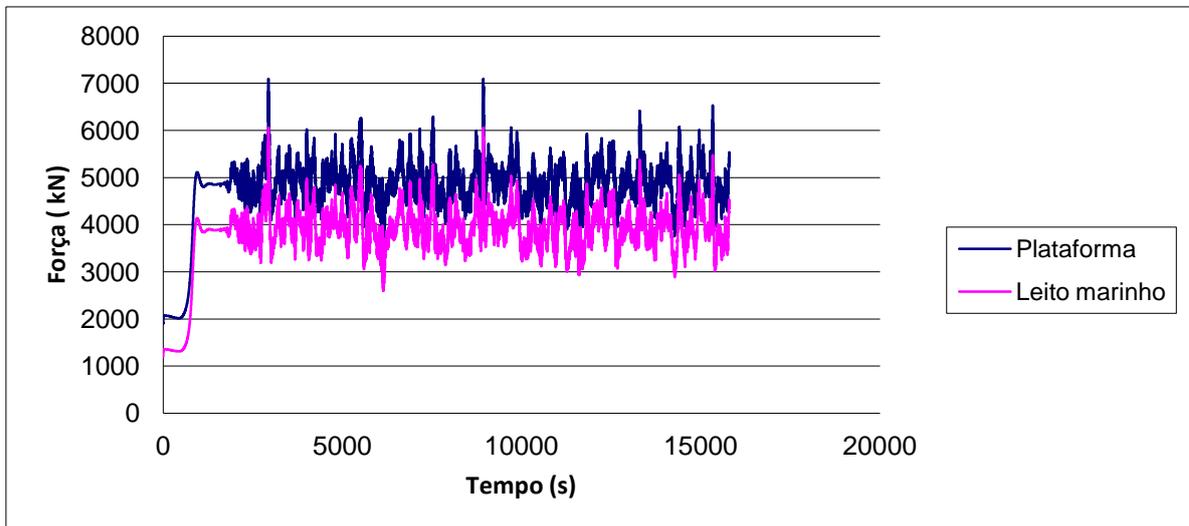


Figura 3.3: Espectro de cargas.

De posse dos resultados obtidos a partir dos cálculos efetuados com os dados de entrada do caso típico, foram plotados os gráficos correspondentes à geometria da linha de ancoragem e à variação da tração ao longo da profundidade. As figuras 3.4 a 3.6 apresentam a relação entre a profundidade e a posição da linha de ancoragem, enquanto a figura 3.7 relaciona a variação de tração ao longo da profundidade. Na tabela 3.2 estão dispostos os resultados fornecidos pelo programa. Observa-se que 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. O valor da atenuação depende da magnitude da carga de tração aplicada à linha de ancoragem, quanto maior a carga de tração aplicada menor a atenuação, tanto no trecho submerso quanto no trecho embutido no solo.

Tabela 3.2: Resumo dos resultados fornecidos pelo programa DIGIN

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

De acordo com os gráficos 3.4 e 3.5 e com a tabela 3.2, observa-se que a inclinação da linha de ancoragem no ponto de conexão com a unidade flutuante (*fairlead*) reduz ligeiramente com a elevação dos valores de tração. Com relação ao trecho enterrado, conforme observado no gráfico 3.6, o acréscimo de tração promove aumento da inclinação da linha de ancoragem em relação à horizontal. Todavia, no ponto de conexão com a estaca torpedo ocorre uma redução da inclinação à medida que se eleva o nível de tração.

Conforme as figuras 3.4 e 3.6, a linha de ancoragem analisada não possui trecho apoiado no solo, correspondendo à configuração *taut leg*, conforme especificado no item 2.3.2. Na figura 3.6 é possível observar um ponto de inflexão próximo ao leito marinho refletindo numa mudança na curvatura da linha entre o trecho submerso e enterrado. Os resultados mostram que na condição de equilíbrio, o trecho da linha de ancoragem submerso assume a configuração retasada (*taut leg*) e o trecho enterrado assume a configuração de catenária invertida.

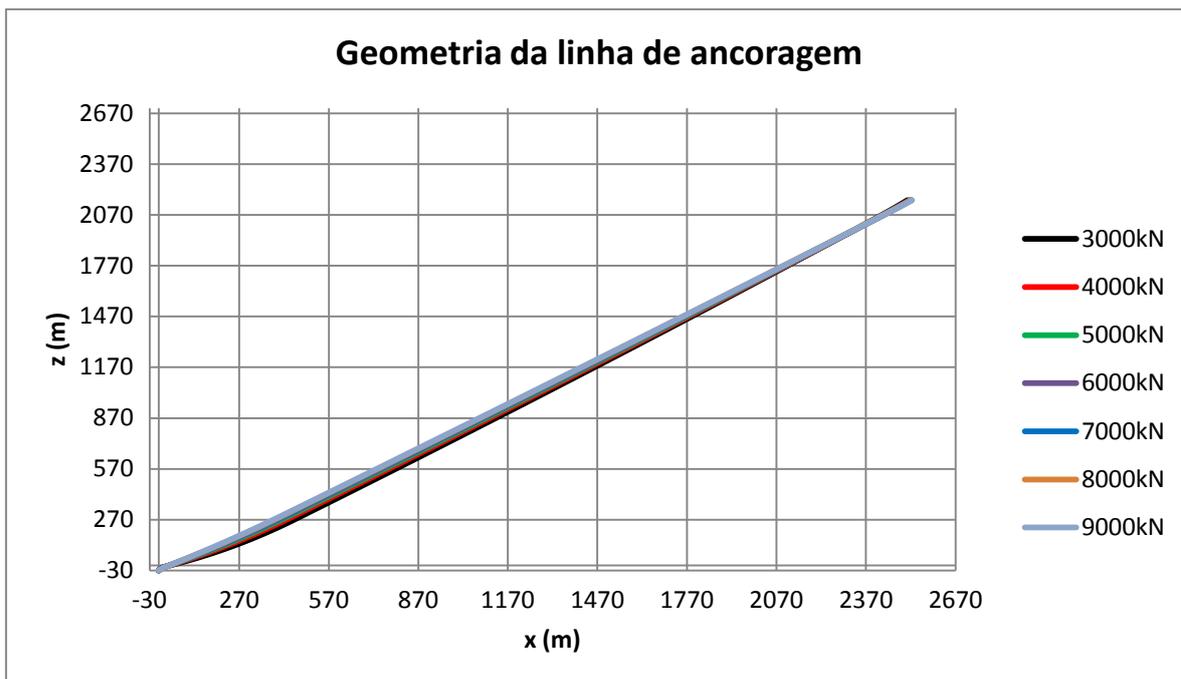


Figura 3.4: Gráfico da geometria da linha de ancoragem.

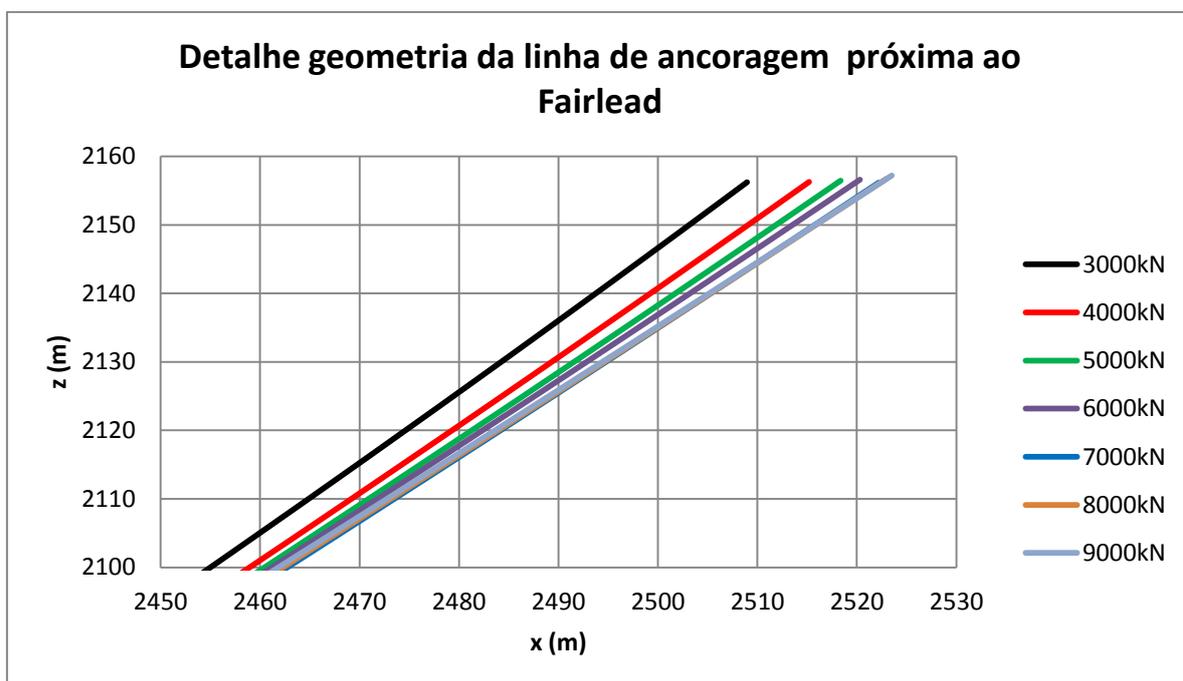


Figura 3.5: Gráfico da geometria da linha de ancoragem próxima ao *fairlead*.

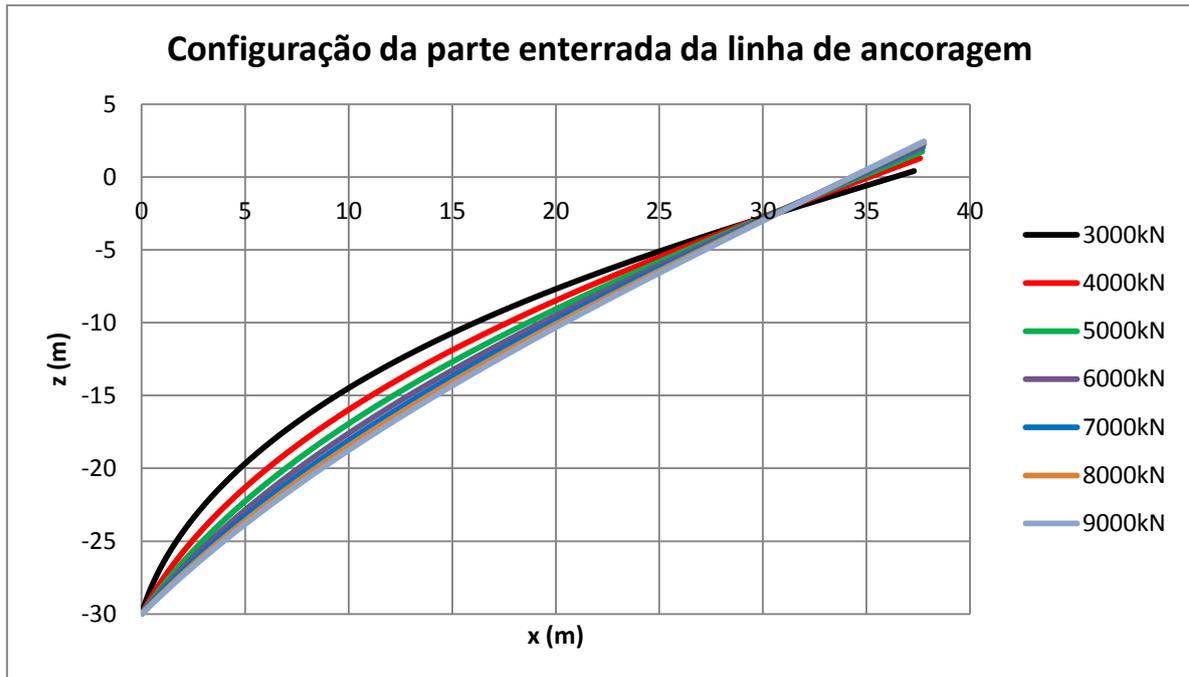


Figura 3.6: Gráfico da geometria da linha de ancoragem do trecho enterrado.

Na figura 3.7 observa-se que a diferença de comportamento da amarra de topo e do trecho composto por cabo de poliéster na porção suspensa devido à diferença de peso entre os materiais. Os trechos correspondentes às amarras apresentam variação significativa do nível de tração ao longo da profundidade, em consequência do elevado peso próprio. Em contrapartida, o trecho correspondente ao cabo de poliéster apresenta ligeira variação da tração ao longo da profundidade em virtude do seu peso reduzido.

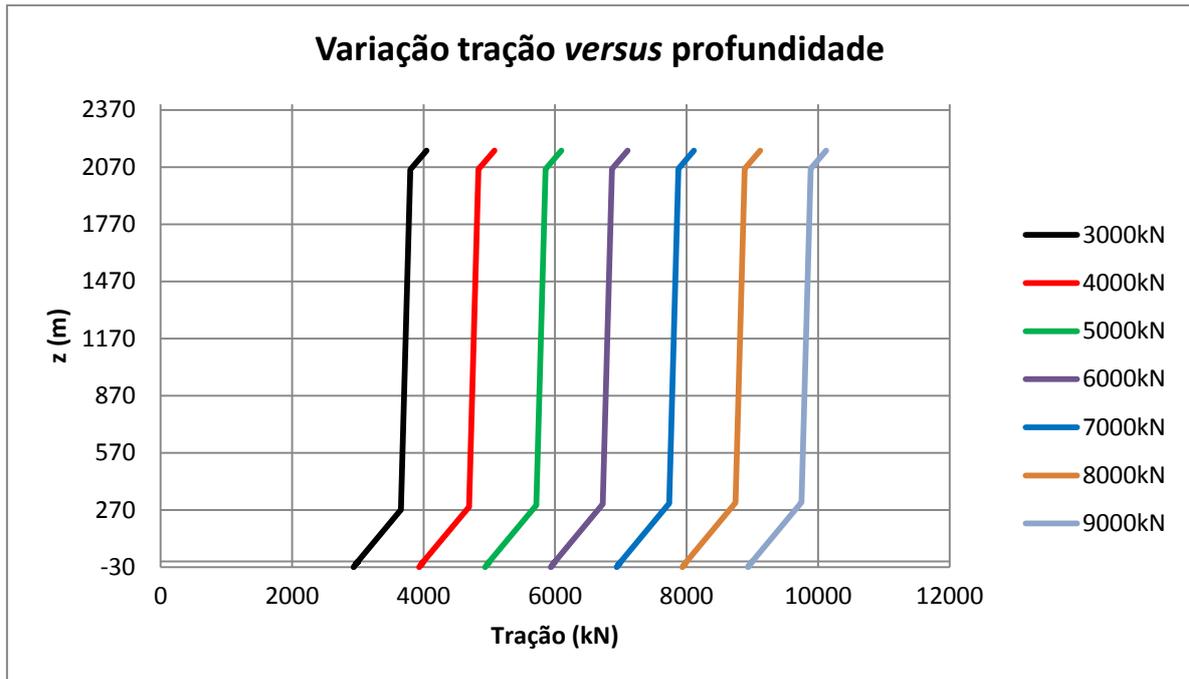


Figura 3.7: Gráfico da variação de tração ao longo da profundidade.

O caso típico analisado foi utilizado para a realização da análise de similaridade, descrita no capítulo 3, de maneira a reproduzir em laboratório as condições de campo. As simulações geradas pelo DIGIN foram utilizadas para comparar os resultados obtidos pelo modelo reduzido com os do protótipo.

4 ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA

Este capítulo tem por finalidade apresentar um estudo dimensional dos parâmetros relacionados à presente pesquisa, a fim de estabelecer quais grandezas físicas podem ou não ser controladas, e quais grandezas são ou não relevantes ao fenômeno estudado, de modo a estabelecer a lei de semelhança apropriada ao estudo de caso.

4.1 ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional é uma ferramenta matemática que permite a simplificação de um problema através da redução do número de variáveis para o equacionamento de um fenômeno físico. A análise dimensional é fundamentada no teorema de Π ou Vaschy-Bucknghan, que estabelece que 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 é o número de unidades fundamentais usadas. 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 (LOBO CARNEIRO, 1996).

Segundo LOBO CARNEIRO (1996), uma variável física pode ser definida como um conceito que expressa numericamente grandezas que podem ser divididas em primárias e derivadas. As grandezas primárias são aquelas medidas de grandezas fundamentais sendo independentes das unidades escolhidas, tais como tempo, comprimento e massa. As grandezas derivadas são aquelas formadas por combinações de grandezas primárias, tais como velocidade, força e volume. A seguir, na tabela 4.1 estão dispostas algumas grandezas fundamentais.

Tabela 4.1: Grandezas fundamentais (LOBO 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)

4.1.1 Expoentes dimensionais

Para o estudo dimensional de um problema, é apropriado ordenar os parâmetros em uma matriz, denominada matriz dimensional. As colunas da matriz correspondem aos parâmetros, e as linhas às grandezas fundamentais. Os elementos da matriz são as dimensões do parâmetro correspondente em relação a cada uma das grandezas fundamentais. Dentre as diversas grandezas físicas de um mesmo tipo, apenas a grandeza escolhida como representativa deve estar contida nas colunas da matriz dimensional; as demais são substituídas por fatores de forma ou funções de forma.

De posse de todos os parâmetros que fazem parte do processo físico estudado, é possível formar a matriz dimensional, onde os elementos da matriz são os expoentes ou dimensões dos parâmetros derivados em relação às grandezas fundamentais (LOBO CARNEIRO, 1996). Na tabela 4.2 são apresentados os expoentes dimensionais das principais grandezas da dinâmica estrutural.

Tabela 4.2: Expoentes dimensionais com grandezas usuais em análise dinâmica (ROCHA, 2013).

Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	L	m	t
Comprimento	l	m	1	0	0
Massa	m	kg	0	1	0
Tempo	t	s	0	0	1
Aceleração	a	m/s ²	1	0	-2
Aceleração angular	α	rad/s ²	0	0	-2
Velocidade	v	m/s	1	0	-1
Velocidade angular	w	rad/s	0	0	-1
Força	F	N	1	1	-2
Momento	M	Nm	2	1	-2
Frequência	f	Hz	0	0	-1
Frequência angular	w	rad/s	0	0	-1
Amortecimento viscoso	c	kg/s	0	1	-1
Razão de amortecimento	ζ	-	1	0	0
Módulo de elasticidade	E	Pa	-1	1	-2
Módulo de corte	G	Pa	-1	1	-2
Coefficiente de Poisson	v	-	0	0	0
Deformação	ϵ	-	0	0	0
Tensão (pressão, módulos, coesão, etc.)	s	Pa	-1	1	-2
Massa específica	γ	kg/m ³	-3	1	0
Massa por comprimento	m	kg/m	-1	1	0
Inércia de massa	I	kgm ²	2	1	0
Inércia por comprimento	i	kgm ²	1	1	0
Rigidez	k	N/m	0	1	-2
Rigidez axial	EA/L	N/m	0	1	-2
Rigidez à flexão	EI/L ³	N/m	0	1	-2
Rigidez à torção	GK/L	Nm/rad	2	1	-2
Área	A	m ²	2	0	0
Volume	V	m ³	3	0	0
Módulo resistente	W	m ³	3	0	0
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0
Constante de torção	k	m ⁴	4	0	0
Viscosidade dinâmica	μ	kg/m/s	-1		1
Viscosidade cinemática	v	m ² /s	2	0	-1

4.1.2 Mudança de base

A mudança de base é a substituição das grandezas fundamentais sem importância para o caso estudado por grandezas derivadas que figuram diretamente no problema. Segundo LOBO CARNEIRO (1996), a definição da nova base é realizada por meio de inspeção e tentativas. A nova base deve ter o mesmo número de grandezas que a base fundamental, as dimensões entre os novos parâmetros devem ser independentes e o determinante da matriz diferente de zero. Ver tabela 4.2 com os expoentes dimensionais.

$$[A] = L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T} \quad (4.1)$$

$$[B] = L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T} \quad (4.2)$$

$$[C] = L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T} \quad (4.3)$$

Assim, a matriz dimensional da nova base é da forma apresentada na tabela 4.3:

Tabela 4.3: Matriz dimensional (LOBO CARNEIRO, 1996).

	L	M	T
A	a_L	a_M	a_T
B	b_L	b_M	b_T
C	c_L	c_M	c_T

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

$$\log[A] = \log(L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T}) = a_L \log L + a_M \log M + a_T \log T \quad (4.4)$$

$$\log[B] = \log(L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T}) = b_L \log L + b_M \log M + b_T \log T \quad (4.5)$$

$$\log[C] = \log(L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T}) = c_L \log L + c_M \log M + c_T \log T \quad (4.6)$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} a_A & b_A & c_A \\ b_A & b_B & c_B \\ c_A & c_B & c_C \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Reescrevendo na forma polinomial, tem-se:

$$\log[L] = \log A^{a_A} + \log B^{a_B} + \log C^{a_C} = \log (A^{a_A} + B^{a_B} + C^{a_C}) \quad (4.10)$$

$$\log[M] = \log A^{b_A} + \log B^{b_B} + \log C^{b_C} = \log (A^{b_A} + B^{b_B} + C^{b_C}) \quad (4.11)$$

$$\log[T] = \log A^{c_A} + \log B^{c_B} + \log C^{c_C} = \log (A^{c_A} + B^{c_B} + C^{c_C}) \quad (4.12)$$

Assim, retorna-se às grandezas fundamentais calculadas a partir das novas grandezas de base:

$$[L] = A^{a_A} B^{a_B} T^{a_C} \quad (4.13)$$

$$[M] = A^{b_A} B^{b_B} T^{b_C} \quad (4.14)$$

$$[T] = A^{c_A} B^{c_B} T^{c_C} \quad (4.15)$$

Com esse resultado, pode-se agora calcular qualquer escala de grandeza derivada em relação às escalas das novas grandezas de base. De forma genérica, dada uma grandeza X cuja unidade tenha expoentes dimensionais α , β e γ em relação às grandezas fundamentais:

$$[X] = L^\alpha M^\beta T^\gamma \quad (4.16)$$

Onde α , β e γ são expoentes de uma grandeza derivada qualquer na base LMT.

Substituindo-se as equações (4.13), (4.14) e (4.15) na equação 4.16 tem-se:

$$[X] = (A^{a_A} B^{a_B} T^{a_C})^\alpha (A^{b_A} B^{b_B} T^{b_C})^\beta (A^{c_A} B^{c_B} T^{c_C})^\beta \quad (4.17)$$

Fatorando-se as bases chega-se finalmente a:

$$[X] = A^{(\alpha a_A + \beta b_A + \gamma c_A)} B^{(\alpha a_B + \beta b_B + \gamma c_B)} C^{(\alpha a_C + \beta b_C + \gamma c_C)} \quad (4.18)$$

A equação 4.18 representa uma fórmula geral para o cálculo da escala de qualquer grandeza derivada, a qual faz uso da inversa da matriz dimensional do novo conjunto de grandezas de base escolhidas (ROCHA, 2013).

4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEMELHANÇA FÍSICA E EFEITO DE ESCALA

A teoria da semelhança trata de um conjunto de princípios a serem obedecidos a fim de projetar, construir, operar e interpretar os modelos, que são representações simplificadas da realidade, a partir dos quais se deseja prever o comportamento do protótipo. A escolha de grandezas de base para uma lei de semelhança é de importância estratégica para a correta representação de um dado fenômeno através de modelos reduzidos.

A condição básica para que um modelo reproduza as condições físicas de seu protótipo é a similaridade física. Logo, é indispensável respeitar três condições de semelhanças: geométrica, cinemática e dinâmica.

A semelhança geométrica requer que o modelo e protótipo possuam o mesmo formato, e que todas as dimensões do modelo sejam relacionadas com as dimensões do protótipo por um fator de escala constante.

A semelhança cinemática requer semelhança do movimento, portanto o modelo e protótipo devem ter as mesmas escalas de comprimento e intervalos de tempo. A semelhança dinâmica é a semelhança das forças e significa que as forças que agem em pontos homólogos deverão manter relações constantes cujas resultantes tem direção e sentido iguais.

A seguir, apresenta-se uma aplicação da análise dimensional com o objetivo de projetar os equipamentos necessários à simulação de tração axial na linha de ancoragem.

4.3 ANÁLISE DIMENSIONAL APLICADA AO CASO TÍPICO

As grandezas fundamentais do sistema de unidades relevantes nos fenômenos mecânicos da geotecnia são: o comprimento, a massa e o tempo. Por consequência, conforme a Teoria de Análise Dimensional (LOBO CARNEIRO, 1993), isso implica que apenas três grandezas derivadas poderão ter suas escalas pré-estabelecidas, a partir das quais as escalas de todas as outras grandezas serão decorrentes.

Desta forma, é essencial que se estabeleça uma escala apropriada para desenvolver o modelo experimental. O sistema de escala utilizado nesta pesquisa é o de semelhança de número de

Froude, baseado na preservação da relação entre forças gravitacionais e inerciais. A fim de minimizar erros e dispersão de resultados em consequência de escalas muito reduzidas e devido à limitação do espaço físico disponível, determinou-se um fator de escala de comprimento do modelo de 1:40. A Tabela 4.4 mostra as relações entre as várias grandezas de interesse do projeto.

Tabela 4.4: Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio de tração axial da linha de ancoragem.

Grandezas de base	Símbolo	Unidade	L	M	T	Inversão			Escala	Escala Inv.
Comprimento	L	m	1	0	0	1	0	0	2,500E-02	40
Massa específica	r	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

4.3.1 Linha de ancoragem

O modelo da linha de ancoragem é baseado no protótipo de amarra formada por elos soldados com diâmetro de 120 mm. Para determinar as dimensões do modelo multiplicou-se o fator de escala às dimensões correspondentes do protótipo, portanto o modelo da linha de ancoragem é composto por amarra com elos soldados de 3 mm de diâmetro.

4.3.2 Tanque de acrílico

As dimensões do tanque de acrílico foram baseadas também na escala de comprimento, logo foi concebido um tanque com dimensões externas de 155 cm de comprimento, largura de 27cm e altura de 82cm. O projeto do tanque está detalhado no item 5.2.1.

4.3.3 Definição do solo

No sistema de escalas proposto a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) resulta ter a mesma escala que o comprimento, portanto no modelo reduzido deve-se utilizar um solo que tenha sua resistência ao cisalhamento não drenada reduzida na mesma proporção que o comprimento. Ou seja, faz-se necessário o uso, não do solo original, mas sim de um solo equivalente em escala com S_u reduzido (ROCHA, 2013).

Neste sentido, o material original foi substituído por uma mistura de caulinita e bentonita, que confere boa trabalhabilidade ao solo, com teores de umidade superiores a 100%, reproduzindo às condições de campo e cuja resistência ao cisalhamento não drenada atenda aos critérios de escala do experimento.

4.3.4 Sistema de carregamento estático

O sistema foi projetado em função da força de tração média de 9000 kN (900 tf) imposta pela plataforma. Conforme a lei de similaridade adotada, esta força corresponde a aproximadamente 14kgf na escala reduzida. Maiores informações estão disponíveis na seção 5.2.3.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos estudos descritos nos Capítulos 3 e 4, foram projetados os equipamentos apresentados neste capítulo, que foram utilizados na realização dos ensaios de carregamento estático de tração axial na linha de ancoragem, de modo que os dados medidos no modelo possam ser relacionados quantitativamente com as condições de carregamento do protótipo.

O programa de ensaios foi elaborado com o objetivo de estudar o comportamento do trecho da linha de ancoragem inserida no solo e a atenuação de cargas a serem transmitidas para a estaca torpedo, cuja quantificação permite uma análise do desempenho do sistema de ancoragem. Os materiais e procedimentos utilizados para a execução dos ensaios são também apresentados. Com a finalidade de avaliar a resistência ao cisalhamento não drenada do solo, foram incluídos ensaios de mini palheta e cravação de estacas torpedo em modelo reduzido.

5.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados são descritos nos itens subsequentes.

5.1.1 Argila

As argilas empregadas nos ensaios foram produzidas em laboratório com o objetivo de apresentarem propriedades físicas similares à da argila típica do leito marinho, a partir da mistura caulim, bentonita e água, sendo definida a composição em massa seca de 85% de caulim, 15% de bentonita e teores de 100% de umidade para a mistura denominada como argila A, e 120% de umidade para a mistura referida como argila B. A caracterização geotécnica do caulim e da bentonita, bem como da mistura, foi realizada através de ensaios de granulometria, limites de Attenberg e de massa específica real dos grãos.

A preparação das amostras de material e as medições de teor de umidade para os ensaios de caracterização foram realizadas seguindo os procedimentos descritos na NBR 6457/86. As análises granulométricas foram realizadas pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS, por meio de um equipamento de ensaios de granulometria a laser. Os ensaios de limite de liquidez (LL) foram realizados segundo as recomendações da NBR 6459/84 e os ensaios de limite de plasticidade (LP), de acordo com a NBR 7180/84. A determinação da

massa específica real dos grãos de solo seguiu o método descrito pela NBR 6508/84, utilizando-se o material que passa na peneira com malha de 2 mm.

A água utilizada nos ensaios de caracterização é a água destilada, obtida através do processo de destilação da água proveniente da rede pública de abastecimento do município de Porto Alegre-RS.

5.1.1.1 Caulim

Segundo a NBR 6502/95, caulim é um material (minério) argiloso constituído por elevada percentagem de caulinita. É composto por 23,02% de argila (<0,002mm) e 76,98% de silte (0,002 a 0,06mm). A distribuição granulométrica, bem como as propriedades físicas são apresentadas na tabela 5.1 e na figura 5.1, conforme segue:

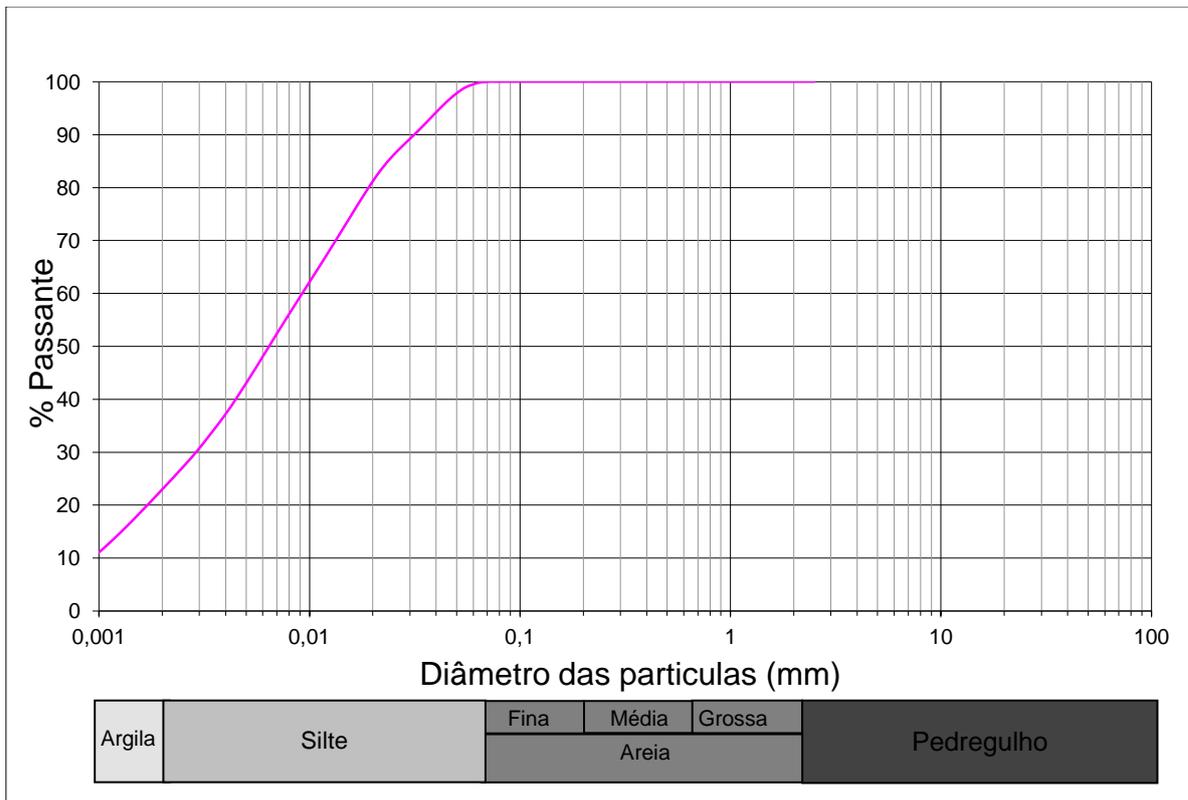


Figura 5.1: Curva granulométrica do caulim.

Tabela 5.1: Propriedades físicas do caulim.

Peso específico real dos grãos	27 kN/m ³
Diâmetro médio (D ₅₀)	0,0065 mm
Limite de liquidez (LL)	40%
Limite de plasticidade (LP)	28%
Índice de plasticidade (I _p)	12%

5.1.1.2 Bentonita

Bentonita é uma argila com alto teor de mineral montmorilonita, caracterizada por sua alta expansibilidade quando umedecida (NBR 6502/95). A bentonita utilizada nesta pesquisa é a bentonita sódica malha 200 comercial ativada com carbonato de sódio. É composta por 8,71% de argila (<0,002mm) e 91,29% de silte (0,002 a 0,06mm). A distribuição granulométrica e as propriedades físicas são apresentadas na tabela 5.2 e na figura 5.2, conforme segue:

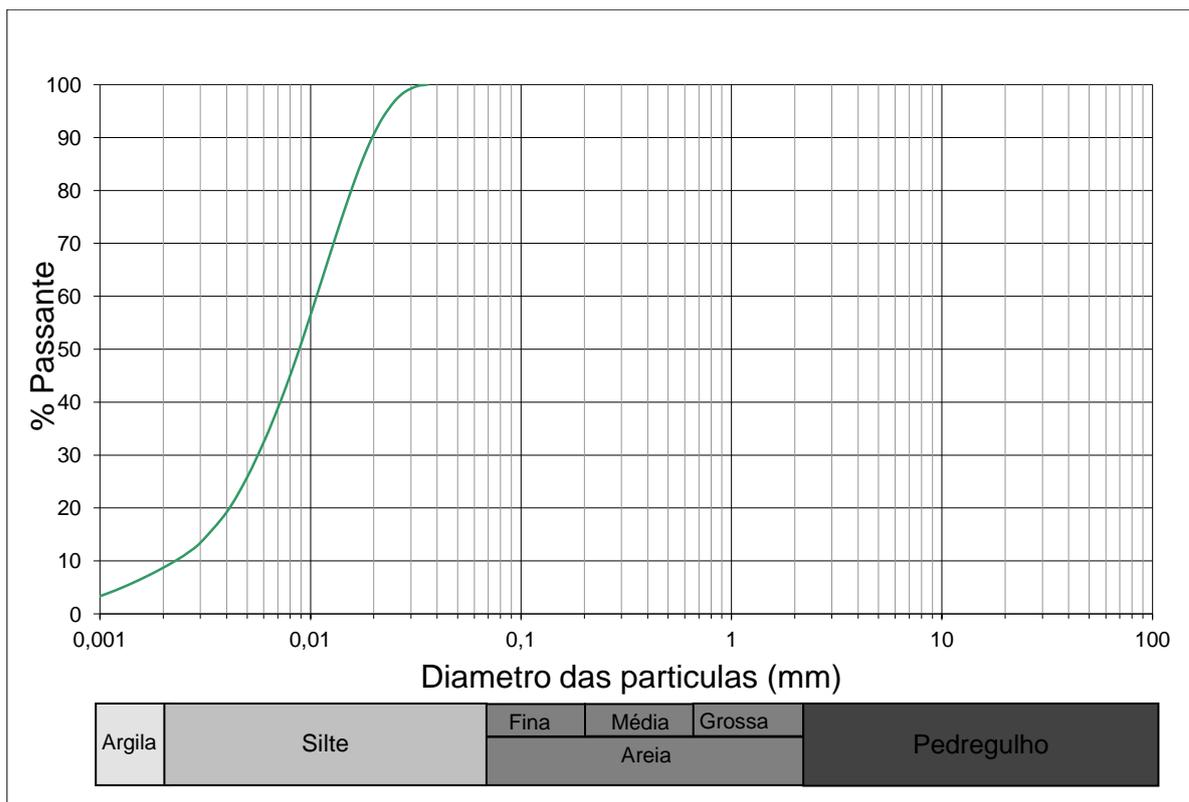


Figura 5.2: Curva granulométrica da bentonita.

Tabela 5.2: Propriedades físicas da bentonita.

Peso específico real dos grãos	28,7 kN/m ³
Diâmetro médio (D ₅₀)	0,0090 mm
Limite de liquidez (LL)	533%
Limite de plasticidade (LP)	92%
Índice de plasticidade (I _p)	440%

5.1.1.3 Mistura caulim e bentonita

A mistura de caulim e bentonita utilizada nos ensaios tem composição em massa de materiais secos de 85% de caulim e 15% de bentonita. O objetivo de misturar bentonita ao caulim consiste em aumentar a trabalhabilidade da mistura, para atingir os teores de umidade (parâmetros, tais como LL, LP e IP compatíveis com os observados in situ. A mistura é composta por 13,60% de argila (<0,002mm) e 86,40% de silte (0,002 a 0,06mm). Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 1993), o material é considerado uma argila de alta plasticidade, sendo a distribuição granulométrica, bem como as propriedades físicas apresentadas na tabela 5.3 e na figura 5.3, conforme segue:

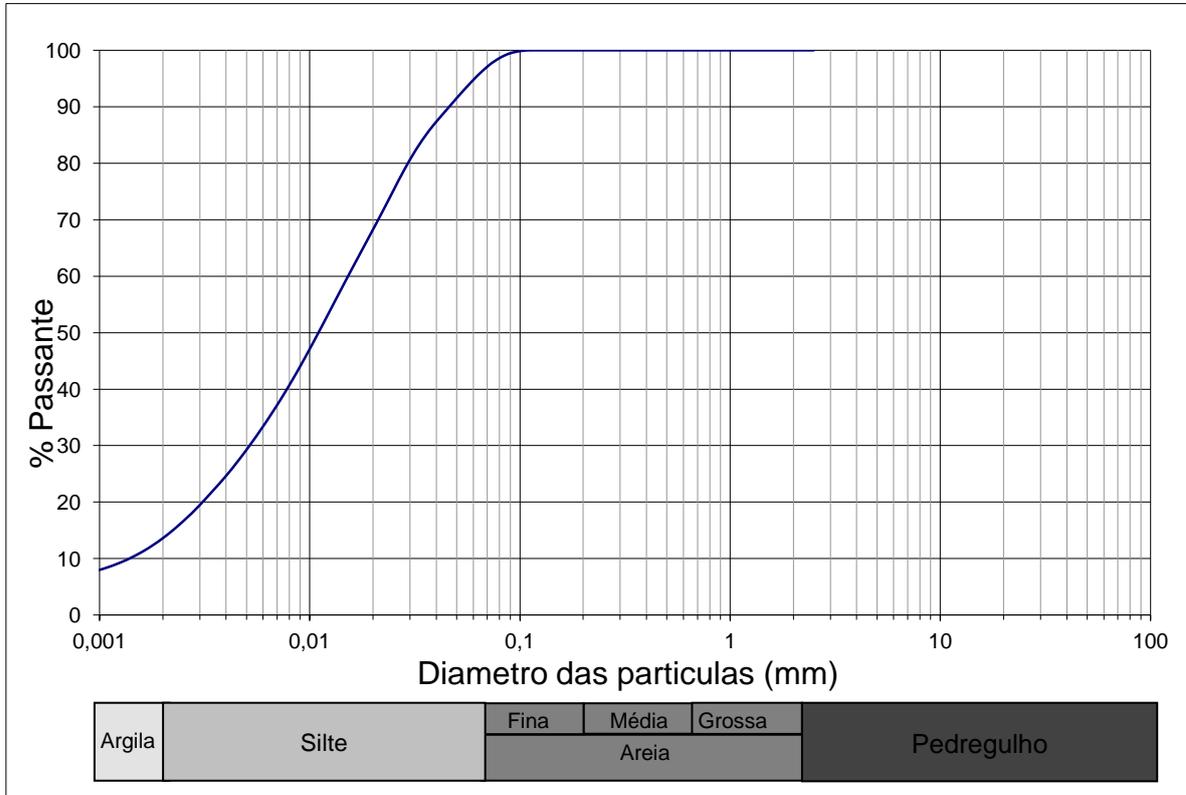


Figura 5.3: Curva granulométrica da mistura caulim e bentonita.

Tabela 5.3: Propriedades físicas da mistura caulim e bentonita.

Peso específico real dos grãos	26,50 kN/m ³
Diâmetro médio (D ₅₀)	0,011 mm
Limite de liquidez (LL)	114%
Limite de plasticidade (LP)	49%
Índice de plasticidade (I _p)	65%

Como já citado anteriormente no item 5.1.1, na presente pesquisa foram utilizados dois tipos de argila a partir da mesma composição de materiais secos, modificando apenas o teor de umidade e conseqüentemente o índice de vazios e a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u). Na tabela 5.4 são descritas as propriedades de ambas as misturas. A resistência não drenada de cada mistura foi obtida a partir de ensaios de mini palheta e penetração dinâmica, cujos resultados são apresentados e discutidos ao longo deste capítulo.

Tabela 5.4: Propriedades das misturas estudadas.

Propriedades	Mistura A	Mistura B
Teor de umidade	100%	120%
Índice de vazios	2,95	3,55
Peso específico natural (kN/m ³)	13,48	13,03

A caracterização das misturas de argila é discutida na sequência, com ênfase às propriedades da argila, determinada através de ensaio de mini palheta e de ensaios de penetração dinâmica.

5.1.2. Ensaio de mini palheta

O ensaio de mini palheta é utilizado na determinação em laboratório da resistência ao cisalhamento de argilas moles saturadas, submetidas à condição de carregamento não drenado. O equipamento é composto por uma palheta de seção cruciforme, que é cravada no interior de uma amostra indeformada ou remoldada, a uma velocidade constante para determinar o torque requerido para cisalhar o solo por rotação.

A resistência não drenada é obtida a partir do ensaio de palheta admitindo que não ocorra drenagem durante o cisalhamento, que as tensões sejam uniformemente distribuídas ao longo da superfície de ruptura e que o solo que circunda a palheta seja homogêneo e isotrópico. (SCHNAID, 2009).

A partir destas hipóteses, a NBR 10905/89 define a resistência não drenada (S_u) medida no ensaio de palheta (em kPa), através da Equação 5.1:

$$S_u = \frac{0,86 \cdot \tau}{\pi \cdot D^3} \quad (5.1)$$

onde τ é o torque máximo medido durante o ensaio (em kN.m) e D é o diâmetro da palheta (em m).

Nesta pesquisa foi empregado um equipamento de mini palheta adaptado por GAUER (2010) ilustrado na figura 5.4. Conforme recomendação da ASTM D4648M-10, a palheta utilizada possui um índice de aspecto (H/D) igual a 2, cujo diâmetro é de 2,55 cm e altura de 5,1 cm. A velocidade de rotação utilizada nos ensaios foi de $5,4^\circ/\text{min}$, que permitiu o cisalhamento do solo em condição não drenada.

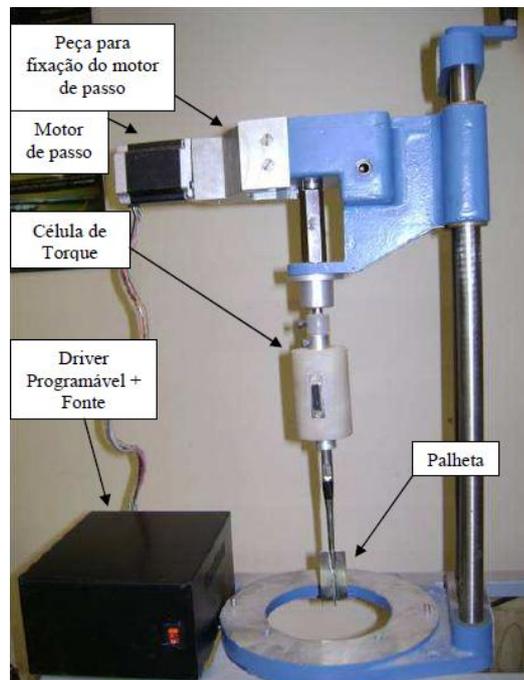


Figura 5.4: Equipamento de palheta de laboratório automatizado (GAUER, 2010).

Conforme descrito por GAUER (2010), as medições de torque, necessárias à determinação da resistência ao cisalhamento do solo, são realizadas por meio de um sensor de torque ligado a um computador, que possibilita o registro das curvas torque x deslocamento e torque x tempo.

A célula de torque foi projetada para um valor máximo de 5 N.m, e sua curva de calibração é apresentada na Figura 5.5.

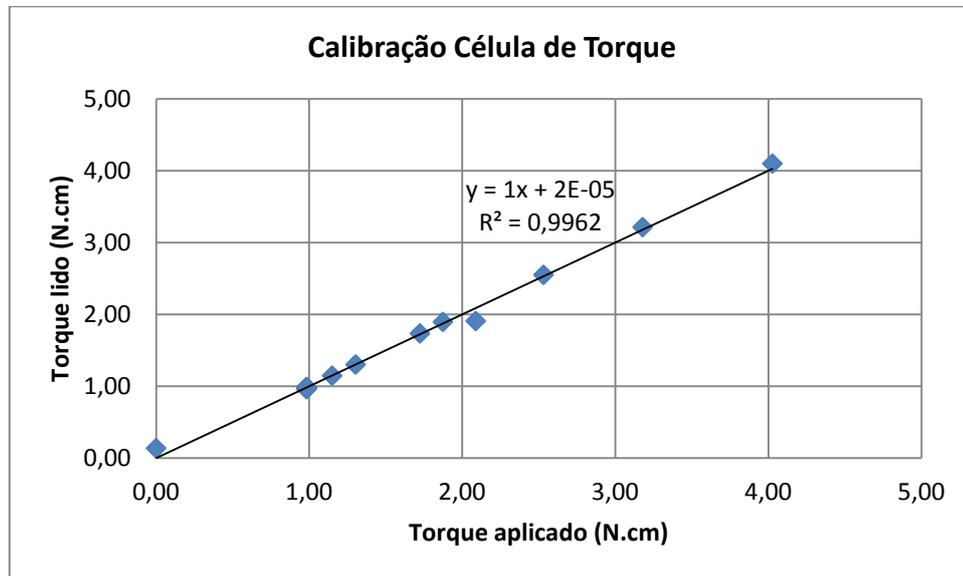


Figura 5.5: calibração da célula de torque do equipamento de mini palheta (GAUER, 2010).

SKEMPTON & NORTHEY (1952) realizaram experimentos nos quais 3 argilominerais foram ensaiados para medir o aumento da resistência tixotrópico na condição de umidade igual ao limite de liquidez. Os argilominerais estudados foram a caulinita, ilita e bentonita. A caulinita não apresentou tixotropia, a ilita apresentou um aumento de resistência moderado e a bentonita apresentou um rápido e pronunciado aumento de resistência tixotrópico. Na presente pesquisa, com o objetivo de analisar o efeito do ganho da resistência não drenada da argila ao longo do tempo devido à presença de bentonita, foram realizados ensaios por período de repouso entre 24 horas e 10 dias após a confecção da amostra. Os ensaios de mini-palheta foram executados em um molde cujas dimensões são: 20 cm de diâmetro interno e 17 cm de altura, conforme mostrado na figura 5.6. A mistura utilizada neste ensaio é composta por 85% de caulim, 15% de bentonita e teor de umidade de 120%, próximo ao limite de plasticidade da mistura denominada anteriormente como argila B. O molde foi preenchido com 15,3 cm de altura de solo, que corresponde a 3 vezes a altura da palheta. Segundo GAUER (2010), optou-se por utilizar corpos de prova 3 vezes a altura da palheta para evitar que o fundo do molde influenciasse nos resultados dos ensaios.

Na figura 5.7 apresenta-se os gráficos relativos à relação entre o torque medido e o tempo transcorrido durante o ensaio. Como se pode observar no gráfico da figura 5.8, o valor de

máximo S_u corresponde a 269,28 Pa foi medido no ensaio cujo tempo de repouso foi de 10 dias e o mínimo de 221,37 Pa no ensaio de 24 horas (1 dia) após a moldagem. Concluiu-se, portanto, que há variações significativas da ordem de 18% na resistência ao cisalhamento não drenada neste intervalo de tempo, com efeitos moderados de tixotropia no período estudado. Tais resultados podem ser atribuídos ao baixo teor de bentonita presente na mistura. Portanto, optou-se executar todos os ensaios desta pesquisa após 24 horas da moldagem.

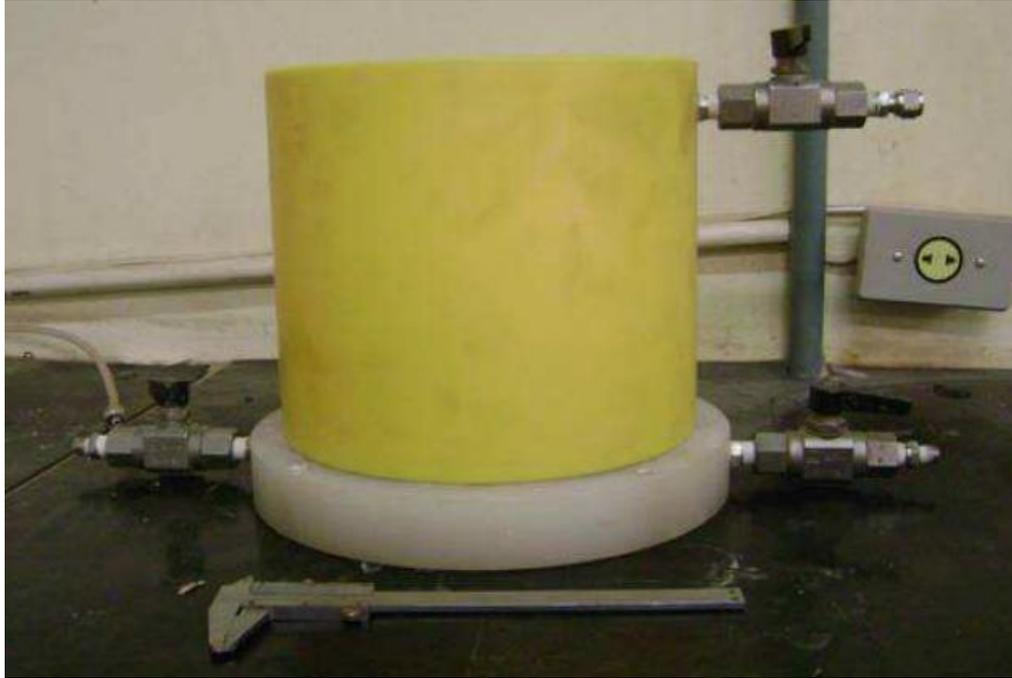


Figura 5.6: Molde para corpo de prova do ensaio de mini palheta (GAUER, 2010).

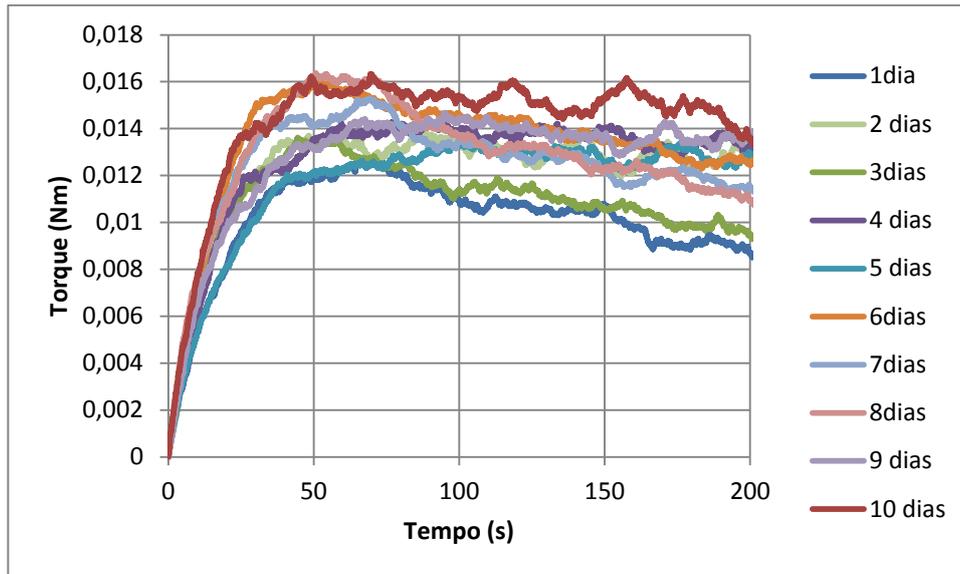


Figura 5.7: Gráfico do torque *versus* tempo.

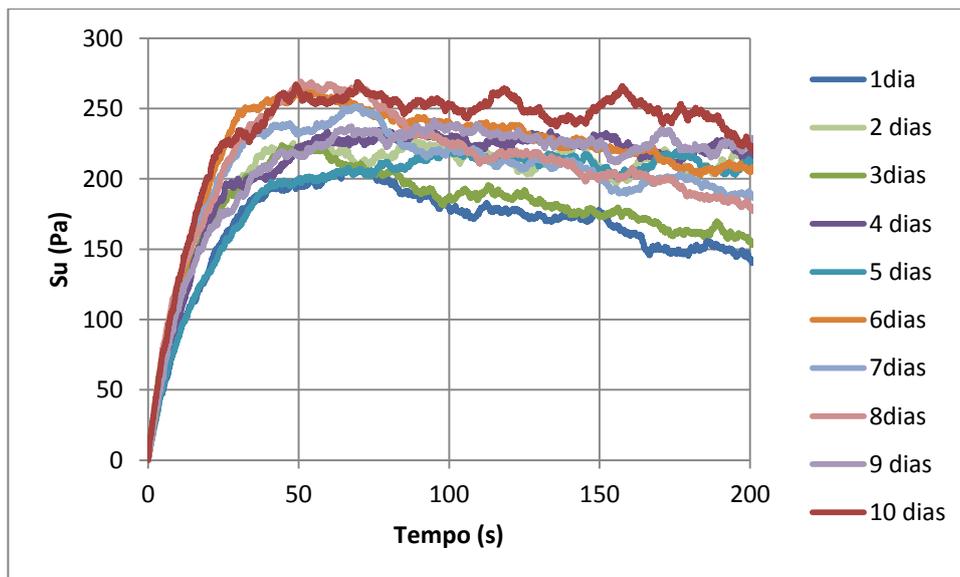


Figura 5.8: Gráfico da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) *versus* tempo.

Uma segunda bateria de ensaios de mini palheta foi realizada para analisar a variação da resistência não drenada do solo ao longo da profundidade. Para tanto, foi utilizado um tanque de acrílico desenvolvido por STRACKE (2012), mostrado na figura 5.9 cujas dimensões externas são de 45 cm x 45 cm, altura de 70 cm e 1,2 cm de espessura.



Figura 5.9: Tanque de acrílico utilizado nos ensaios de palheta.

Nesta bateria foram utilizadas hastes prolongadoras, mostradas na figura 5.10, de modo a alcançar a profundidade de 52,5 cm. O ensaio foi realizado através da medição de torque a cada 10 cm de profundidade, totalizando 5 pontos por furo. Como já mencionado no item 5.1.1, os materiais em estudo consistem de 2 misturas caulim-bentonita com 100 e 120% de umidade. Foram realizados 8 ensaios de mini-palheta para cada mistura, cujos resultados são resumidos nas tabelas 5.7 e 5.8.

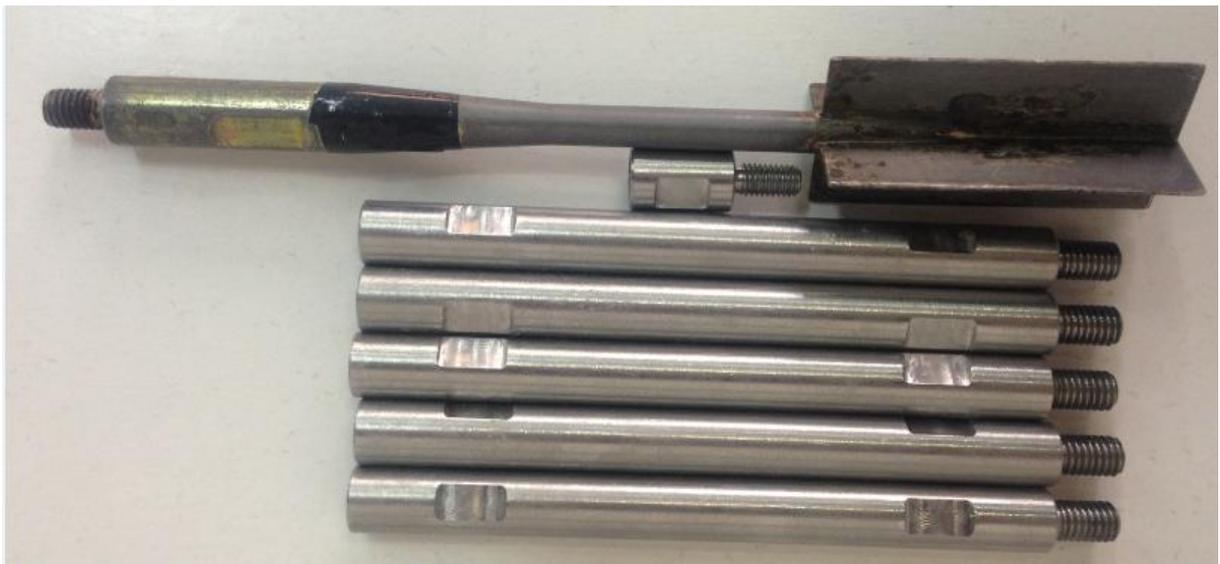


Figura 5.10: Palheta e hastes prolongadoras.

O equipamento de mini palheta foi posicionado na parte superior do tanque apoiado em um suporte metálico. Em seguida, a palheta foi cravada cuidadosamente na amostra até a profundidade desejada. Segundo a NBR 10905/89 o tempo decorrido entre o fim da cravação da palheta e o início da rotação aplicada não deve ser superior a 5 minutos, então entre a cravação da palheta e a aplicação do torque foi aguardado em média 3 minutos. Após o termino do ensaio em determinada profundidade, foi repetido todo o processo até atingir o último ponto do ensaio na profundidade de 52,5 cm. Em cada tanque de ensaio foram realizadas somente 2 cravações, de modo a minimizar a influência das paredes do tanque. Em um dos furos o ensaio foi realizado apenas com a cravação das hastes, de modo a registrar a parcela de atrito lateral na resistência ao cisalhamento não drenada do solo e descontar do valor das medidas obtidas com a palheta. A figura 5.11 apresenta a montagem do equipamento.



Figura 5.11: Execução do ensaio de mini palheta em profundidade.

5.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO ESTÁTICO

A execução dos ensaios de carregamento estático do trecho enterrado da amarra correspondente ao caso típico descrito na seção 3 foi realizada com os equipamentos ilustrados nas figuras 5.19 e 5.20. O conjunto é composto por um tanque de acrílico, amarra, cabo de aço, cabo kevlar, moitões, suporte para pesos e estrutura metálica.

Os equipamentos foram inteiramente projetados na presente pesquisa e são apresentados detalhadamente a seguir.

5.2.1 Tanque de acrílico

O tanque em acrílico com paredes de 1,5cm de espessura possui dimensões externas de 155 cm de comprimento, largura de 27 cm e altura de 82 cm, tal como detalhado na figura 5.12. Com estas dimensões, foi possível realizar ensaios de tração da linha de ancoragem submetida a ângulos de incidência no leito marinho de 0° a 55° com relação à vertical.

O tanque foi preenchido com 420 kg de argila saturada e uma lâmina de água de 4 cm na parte superior, de modo a evitar perda de umidade do material.

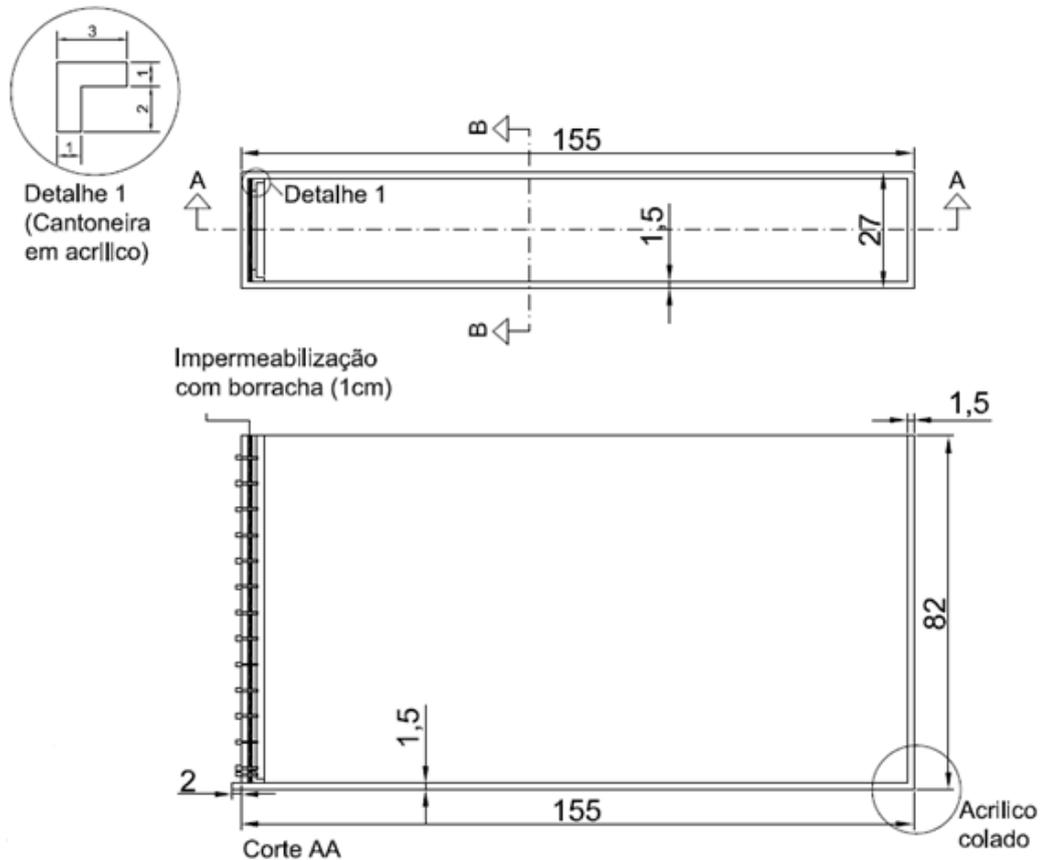


Figura 5.12: Projeto do tanque de acrílico (medidas em cm).

O tanque foi confeccionado de modo a permitir que uma das paredes laterais seja móvel, conforme detalhe ilustrado nas figuras 5.13 e 5.14, para facilitar a instrumentação a cada ensaio realizado. O sistema de vedação desta parede consiste na utilização de cantoneiras em acrílico furadas e coladas nas faces adjacentes. Entre a parede lateral e as cantoneiras é colocada uma borracha para vedação de 1 cm de espessura e por fim o conjunto é fixado através de parafusos com porcas borboleta e arruelas de borracha.

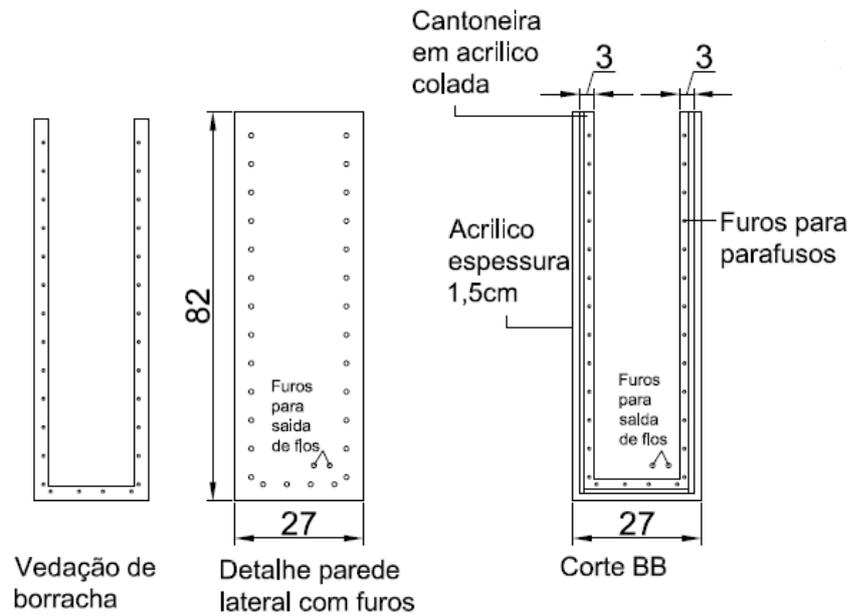


Figura 5.13: Detalhe da parede móvel (medidas em cm).



Figura 5.14: Lateral móvel do tanque em acrílico.

5.2.2 Linha de ancoragem

O modelo da linha de ancoragem é composto por amarra com elos soldados de 3 mm de diâmetro e comprimento total de 170 cm. Na figura 5.15, para melhor visualização, são mostrados a amarra e o detalhe esquemático de seus elos soldados. A linha de ancoragem composta pela amarra é fixada sobre uma célula de carga no fundo do tanque a fim de

registrar o carregamento que é efetivamente aplicado no topo da estaca. A extremidade oposta da linha de ancoragem fica acoplada à um cabo de aço que por sua vez desliza em um sistema de moitões conforme o esquema mostrado na figura 5.16.

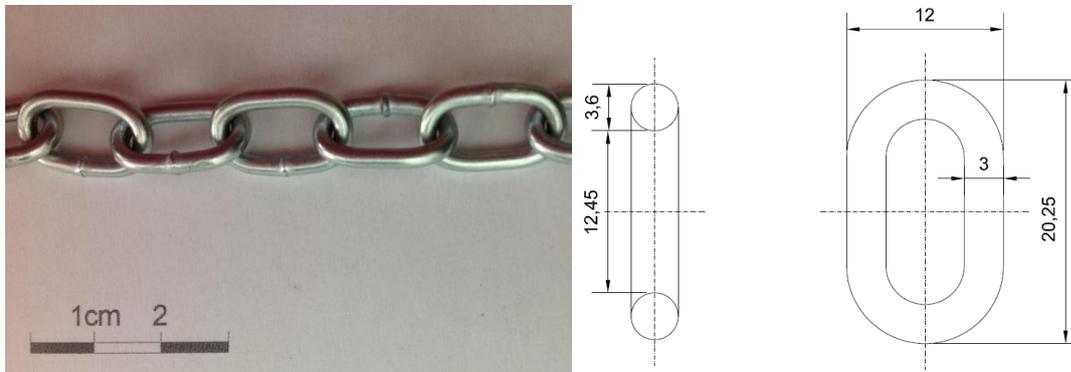


Figura 5.15: Detalhe da amarra.

5.2.3 Suporte metálico

Confeccionou-se uma estrutura metálica que deu suporte ao tanque de acrílico e ao sistema de carregamento estático. O sistema ilustrado nas Figuras 5.16 e 5.17 foi projetado para que a força de tração média seja imposta através de pesos calibrados. Conforme a lei de similaridade adotada, uma força de 900 tf corresponde a aproximadamente 14 kgf na escala reduzida. Embora esta pesquisa seja restrita a carregamentos estáticos foi previsto um local no suporte metálico para colocação de um vibrador mecânico de modo que futuramente possam ser realizados ensaios com carregamento dinâmico.

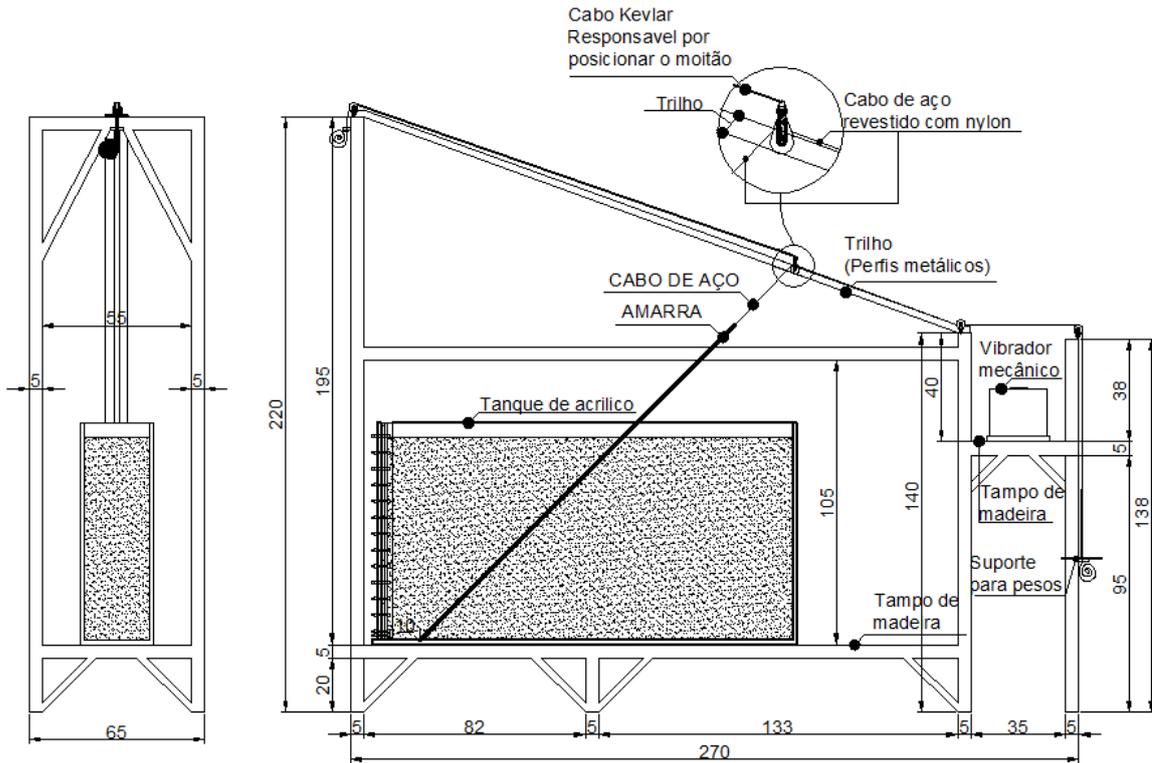


Figura 5.16: Projeto da estrutura metálica (medidas em cm).

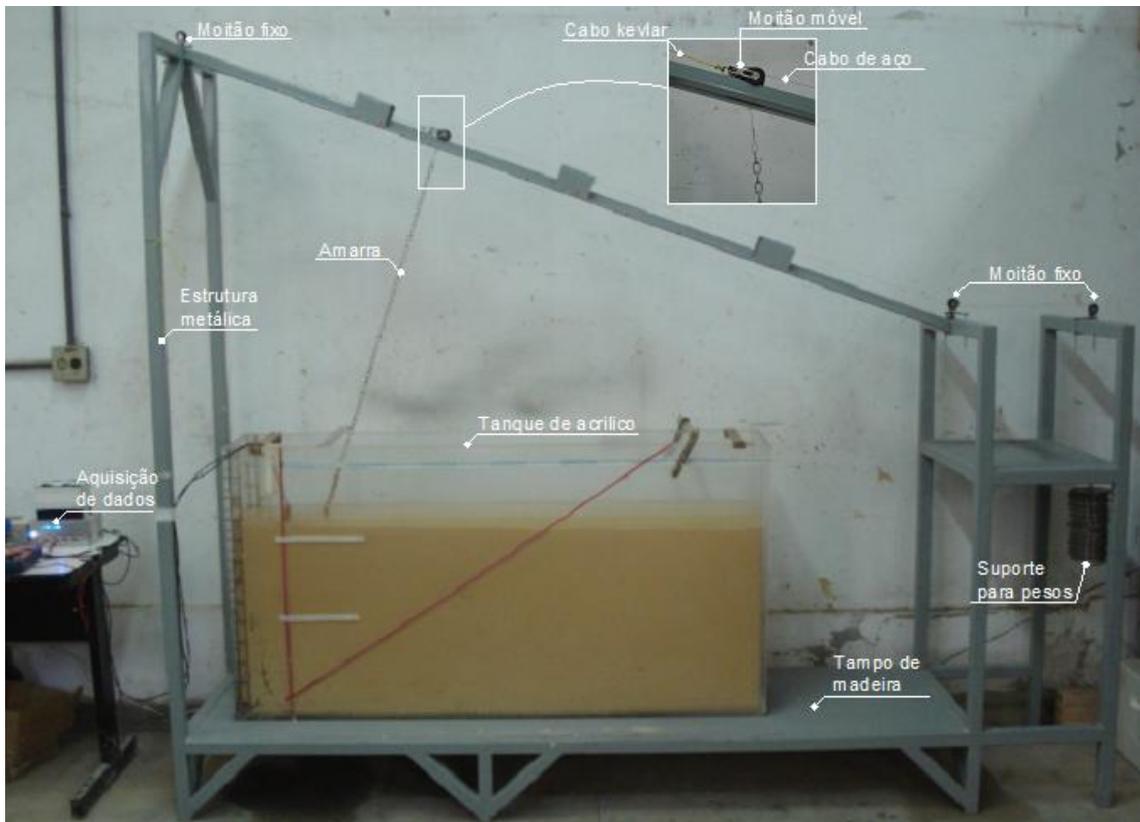


Figura 5.17: Representação esquemática do conjunto de equipamentos.

O sistema de carregamento estático 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 tem por objetivo permitir que um único moitão triplo deslize tornando possível a realização do ensaio em diferentes pontos com inclinações variando entre 0° e 55° em relação à vertical, esta medida de ângulo nominal se refere a uma linha reta que une o ponto de fixação na célula de carga a um ponto no trilho. Na figura 5.18 podem ser observados os moitões.

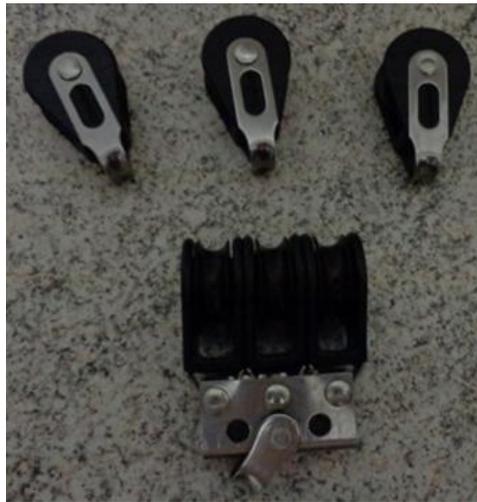


Figura 5.18: Moitões fixos e móvel, respectivamente.

O moitão situado na parte mais elevada do conjunto fica responsável pelo controle da posição do moitão triplo que se movimenta no trilho através de um cabo kevlar independente do sistema de tração da amarra, que é composto por um cabo de aço inox revestido de Nylon.

Já no lado oposto, existem dois moitões que tem a função, junto com o conjunto amarra - moitão triplo, de simular os carregamentos no leito marinho imposto pela plataforma e decorrentes das ações ambientais. Para que fosse possível tracionar a amarra, foi previsto um suporte em aço acoplado ao conjunto onde foram colocadas as anilhas de aço com peso de 500 g e 1000 g a fim de representar os incrementos de carga, conforme observado na figura 5.19.



Figura 5.19: Detalhes das anilhas e suporte.

5.2.4 Detector de materiais

A configuração da catenária formada pela amarra ao longo do trecho enterrado, quando submetida a carregamentos de tração, foi observada através de um detector por ultrassom, que foi utilizado para escanear a parede do tanque, com o propósito de identificar a localização do metal (amarra). Conforme observado na figura 5.20, o detector de materiais utilizado é o D tect 150 BOSCH profissional, cuja máxima profundidade de medição é de 15 cm.



Figura 5.20: Detector por ultrassom.

5.3 INSTRUMENTAÇÃO

A medição da tração ao longo da amarra foi obtida através de uma célula de carga com extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*). A célula de carga foi instalada no fundo da caixa de acrílico, correspondendo ao ponto em que a amarra é fixada à estaca torpedo. Com essa instrumentação foi possível medir a diferença entre a carga aplicada à amarra e a carga transmitida à estaca. A célula foi projetada de forma a permitir a obtenção do ângulo de incidência da carga, por meio da leitura das componentes horizontal e vertical. O cabo de poliéster foi representado por um fio de aço revestido com nylon para minimizar possíveis efeitos de deformação.

As medições de carga e deslocamento foram registradas pela célula de carga e extensômetros, respectivamente. Entre cada estágio de carga, esperou-se o período de tempo necessário para a estabilização das deformações medidas pelos extensômetros. Finalizava-se o ensaio ao atingir a carga de 14 kgf, que corresponde a um carregamento sob o protótipo de 9000 kN.

A célula de carga foi projetada com extensômetros elétricos. O extensômetro elétrico de resistência é um elemento sensível que relaciona pequenas variações de dimensão com variações equivalentes em sua resistência elétrica, seu princípio de funcionamento baseia-se no aumento ou redução da resistência de um condutor quando submetido a forças de compressão ou de tração. A escolha dos extensômetros para a instrumentação foi devido a diversos fatores, tais como alta precisão, baixo custo, boa linearidade e facilidade de instalação. Os extensômetros elétricos adotados para a instrumentação foram do tipo PA-13-250AG-350-L, correspondendo à base de poliamida com filme metálico com autocompensação de temperatura para alumínio, comprimento do elemento resistivo de 6,35 mm ou 0,250", resistência elétrica de 350 ohms, com fios de cobre soldados nos terminais, fabricado pela Excel Sensosres Ltda. Os extensômetros escolhidos para a pesquisa pertencem à família dos extensômetros coláveis de resistência elétrica, modelos unidimensionais simples de formas tradicionais, conforme apresentado na figura 5.21.

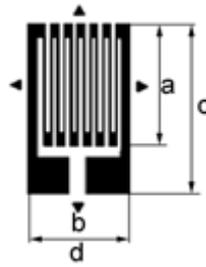


Figura 5.21: Extensômetro colável, modelo unidimensional simples de forma tradicional (EXCEL SENSORES, 2013).

A tabela 5.5 apresenta um quadro resumo das características dos extensômetros elétricos utilizados.

Tabela 5.5: Características dos extensômetros.

Dimensões			
Grelha		Total	
a	b	c	d
(Comprimento)	(Largura)	(Comprimento)	(Largura)
6,35 mm	6,35 mm	10,8 mm	6,35 mm
0,250"	0,250"	0,425"	0,250"
Modelo			
Material da base e do filme metálico	Compensação de temperatura	Tamanho e forma da grelha	Resistência (Ohms)
PA base de poliamida com filme metálico de constantan	13 Para alumínio	250 número expresso em 1/1000 de polegada e forma AG	350
Opção:	L	Com fios de cobre soldados nos terminais	

O valor do Fator de Sensibilidade (FS) do extensômetro elétrico é de 2,17.

Montados à célula de carga, a instalação dos extensômetros foi efetuada em diferentes etapas, tais como preparação da superfície, colagem, cabeamento e soldagem. Os extensômetros foram colados numa chapa de aço inox de seção quadrada, de 13 x13 cm com espessura de 2 mm, suficientemente fina para que ocorra deformação. O filamento do extensômetro deforma igualmente a superfície da chapa e a resistência elétrica do material do filamento tem seu

valor alterado com a deformação. Nas bordas da chapa metálica foram coladas tiras de acrílico de espessura de 5 mm.

A figura 5.22 apresenta o resultado do cabeamento dos fios dos extensômetros aos terminais e dos cabos de ligação ao amplificador. Foram coladas em toda lateral da chapa metálica em inox, tiras de acrílico com espessura de 10 mm e 15 mm de altura. Após a completa ligação dos fios verificou-se o funcionamento dos extensômetros e a qualidade da transmissão do sinal de resistência ao longo do cabo.

O ponto de conexão da amarra à célula de carga foi promovido por um parafuso sextavado de rosca inteira de 1/2" em aço inox fixado no centro da chapa metálica por meio da porca sextavada na parte superior da chapa e 2 arruelas e cola epóxi na parte inferior.

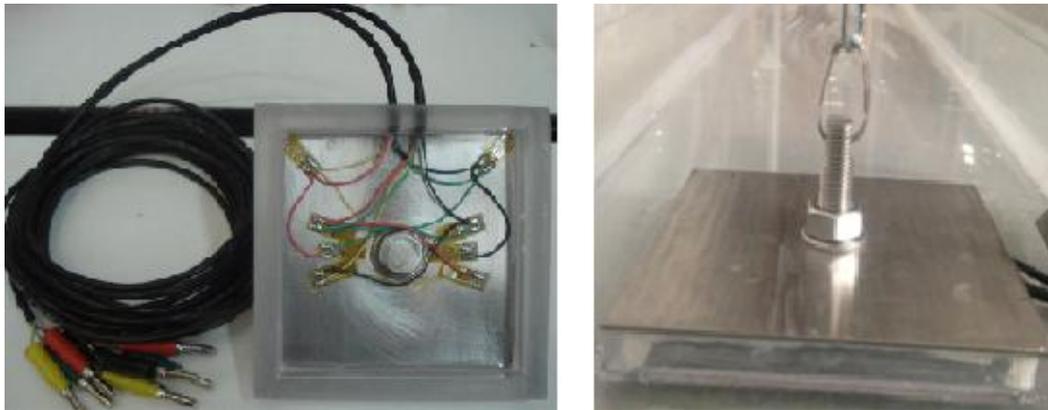


Figura 5.22: Vista inferior e vista superior, respectivamente.

5.3.1 Fixação da célula de carga

Conforme observado na figura 5.23, a célula de carga foi fixada no fundo do tanque de acrílico e, para sua vedação foi utilizada uma espessa camada de silicone em torno do contato da célula com o tanque.



Figura 5.23: Fixação e vedação da célula de carga.

5.3.2 Leitura dos extensômetros

O sistema de medição de força é composto por oito extensômetros que foram colados de modo a formar duas pontes completas de *Wheatstone* (uma para a força tangencial e outra para a força normal), conforme observado na figura 5.24. Ponte de *Wheatstone* é um arranjo de resistores que permite uma acurada medida da resistência de resistores. O circuito é composto por uma fonte de tensão, um galvanômetro e uma rede de quatro resistores. Para determinar a resistência do resistor desconhecido, os outros três são ajustados e balanceados até que a corrente elétrica no galvanômetro caia a zero.

Segundo PERRY & LISSNER (1962), a ponte de *Wheatstone* é o circuito usado para determinar a mudança de resistência de um *strain gage* quando a superfície na qual ele está colado é deformada. Para isto, aplica-se uma voltagem constante de entrada e mede-se a voltagem de saída da ponte. Dentre as vantagens associadas ao uso deste circuito, destacam-se:

- a. a variação da voltagem pode ser diretamente relacionada à deformação;
- b. os sensores podem ser ligados de modo a apresentar compensação elétrica para efeitos indesejáveis como deformações aparentes induzidas por variações térmicas;
- c. podem ser realizadas medidas estáticas ou dinâmicas;
- d. o sistema é simples e de baixo custo.

A deformação (ϵ) do extensômetro elétrico para ponte completa é:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_{ponte}}{V_0 \cdot FS} \quad (5.2)$$

onde:

ε : deformação do extensômetro;

ΔR : variação da resistência do extensômetro (ohms);

V : voltagem de excitação da Ponte de *Wheatstone*;

R : resistência nominal do extensômetro elétrico;

ΔL_{ponte} : variação de voltagem dos terminais da Ponte de *Wheatstone* (volts);

FS : fator de Sensibilidade ou GG (gage factor).

A figura 5.24 apresenta um esquema de colagem dos *strain gages*.

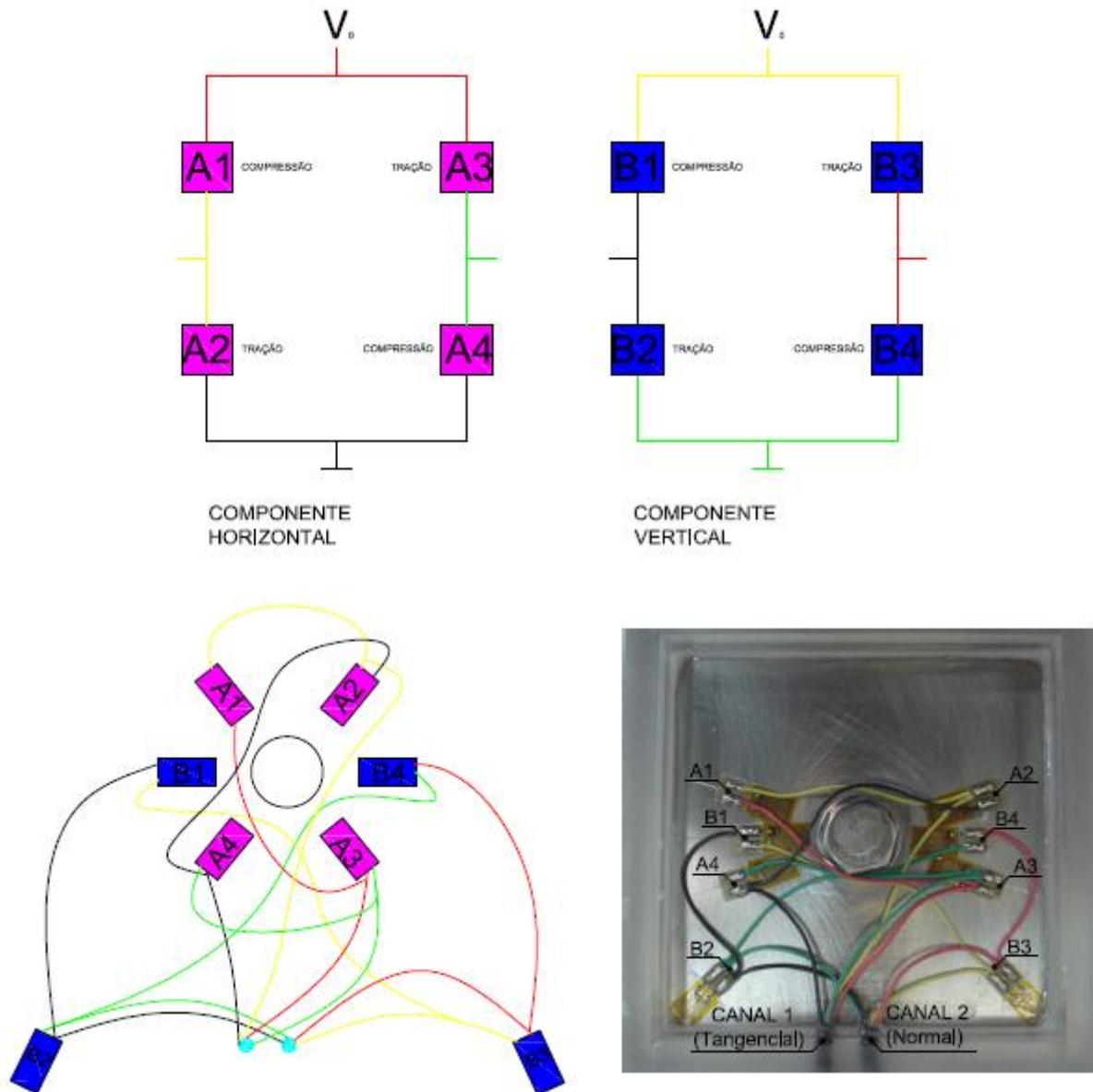


Figura 5.24: Representação esquemática da ligação dos extensômetros.

5.3.3 Aquisição de dados

Utilizou-se um condicionador de sinais. Os extensômetros foram conectados a um amplificador, já existente nesta universidade, baseado em circuito integrado INA118. O amplificador foi conectado a uma fonte de tensão simétrica de 2 baterias de 12 V cada.

A aquisição dos dados foi realizada através da leitura de um multímetro de precisão. Para cada incremento de carga, registrava-se um par de leitura de voltagem, caracterizando os esforços normal e tangencial. Na figura 5.25 é possível observar os equipamentos utilizados.



Figura 5.25: Equipamentos de aquisição dos dados: (a) Bateria, (b) Amplificador e (c) Multímetro.

5.4 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

A calibração do sistema foi conduzida a fim de determinar a relação entre as forças aplicadas e as tensões de saída nas pontes montadas para a medida da variação de resistência dos extensômetros. Inicialmente, o tanque foi preenchido com água, conforme observado na figura 5.26. Em seguida, a calibração foi realizada através da leitura de carga/descarga em cada posição, ressaltando que são 12 posições e as leituras foram registradas a cada incremento de 1 kg até atingir 14 kg, totalizando 336 pontos na curva de calibração. As posições são as mesmas detalhadas na figura 5.30.

A seguir é apresentado o descritivo da calibração.



Figura 5.26: Calibração da célula de carga em água.

Para cada ângulo de mergulho da amarra (φ), as projeções da força de tração, T , são dadas por:

$$F_H = T \cdot \text{sen}\varphi \quad (5.3)$$

$$F_V = T \cdot \text{cos}\varphi - w \quad (5.4)$$

Os resultados da calibração mostraram que mesmo quando se aplicou uma força puramente vertical, ambos os transdutores de força sofreram deformação, por isto, considerou-se um certo grau de acoplamento entre as leituras dos dois canais da célula de carga, a conversão de voltagem para força se faz através da relação:

$$\begin{bmatrix} F_H \\ F_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{HH} & c_{HV} \\ c_{VH} & c_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_H & V_{H0} \\ V_V & V_{V0} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

onde, V_{H0} e V_{V0} são as leituras iniciais (zeros) de cada canal, geralmente a média entre o valor final e o inicial, e a matriz de constantes se denominará "matriz de calibração".

Após a calibração realizada, com φ variando de 0° a 55° , e T variando de 0 a 140N, procedeu-se a um ajuste por mínimos quadrados das constantes da matriz de calibração. O resultado deste ajuste foi:

$$\begin{bmatrix} c_{HH} & c_{HV} \\ c_{VH} & c_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1415 & -0.0212 \\ -0.0538 & 0.7960 \end{bmatrix} \left(\frac{N}{mV} \right) \quad (5.6)$$

para as voltagens em mV. Observa-se o pequeno valor das constantes de desacoplamento, necessárias porém para aumentar a precisão da conversão.

A qualidade do ajuste de F_H e F_V está ilustrada na figura 5.27, para os 336 pontos de calibração. Para a determinação da força em Newtons (N) utilizou-se a constante gravitacional igual a $9,80665 \text{ m/s}^2$.

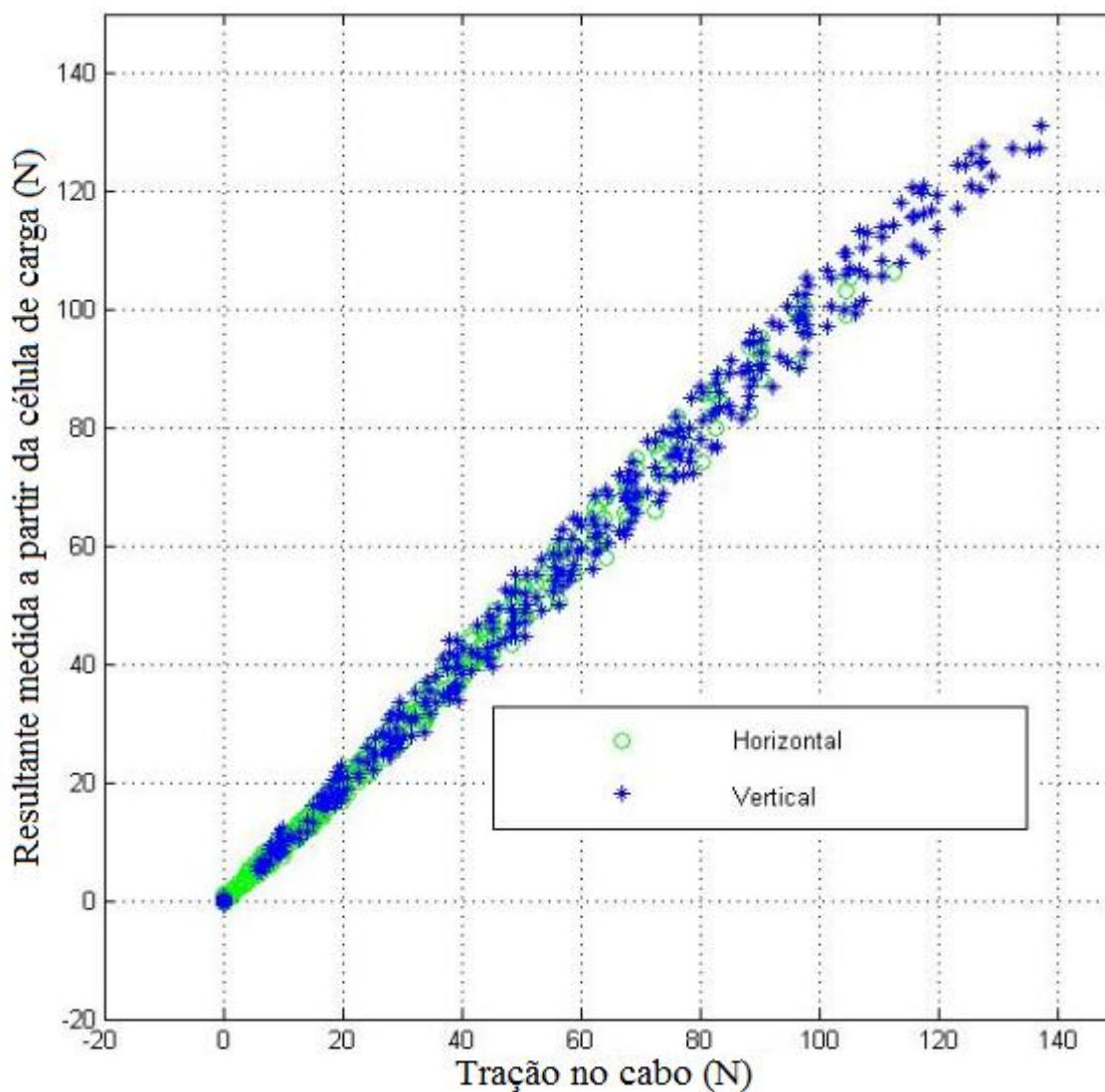


Figura 5.27: Calibração da célula de carga.

5.5 PROGRAMA DE ENSAIOS

O programa experimental abrangeu a execução dos ensaios de tração, com registro das curvas carga x deslocamento da amarra no solo, com diferentes ângulos de inclinação da linha de ancoragem. Deste modo que foi possível avaliar e quantificar a atenuação das cargas ao longo do trecho enterrado e determinar as forças que de fato chegam à âncora-torpedo e que devem ser por esta resistidas. Durante os ensaios foi utilizado o detector de materiais para se obter a configuração da catenária formada pela amarra no interior do solo, nos mais diversos carregamentos e posições. Foram realizados também ensaios de caracterização do solo através de equipamento de mini palheta.

A seguir serão descritos os tipos de ensaios realizados. Discute-se o programa de ensaios e seus objetivos. Por fim, é apresentada a metodologia dos ensaios e resultados.

5.5.1 Ensaio de tração

Foram realizados 5 ensaios para cada mistura (A e B), conforme descrito à seguir:

Em cada tanque de ensaio foram executados os procedimentos em 12 posições, de modo a otimizar a sua utilização, sendo que em cada posição a amarra tem uma inclinação diferente. Os ângulos de incidência nominais foram de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50° e 55° com relação ao eixo vertical. O carregamento foi feito por incrementos de pesos de 1kg até atingir 14kg (aproximadamente 140 N) por posição. E em seguida, realizava-se o descarregamento com registro, também a cada 1kg.

5.5.1.1 Preparação da argila

As amostras argilosas empregadas nos ensaios foram produzidas a partir da mistura em betoneira de caulim, bentonita e água, sendo suas quantidades definidas por dosagem de acordo com a seção 5.1.1. Primeiramente, foram colocados os materiais secos na betoneira e após a homogeneização foi adicionada água para obter 100 % de umidade para a argila A e 120 % de umidade para a argila B. Na figura 5.28 podem ser observadas a aparência e aspecto das misturas prontas. Devido à restrição da capacidade da betoneira e à formação de grumos, para o total preenchimento do tanque foram necessárias oito misturas. Após a realização de cada mistura, espalhava-se o material pelo tanque formando uma camada homogênea. O controle foi realizado por meio da retirada de três amostras de cada camada para a

determinação do teor de umidade. O critério adotado para a variação aceitável do teor de umidade dentro do tanque foi de 5%.



Figura 5.28: Moldagem: (a) mistura A (100% de umidade) e (b) mistura B (120% de umidade), respectivamente.

5.5.1.2 Preparação do tanque e do sistema de carregamento estático

Inicialmente uma das paredes laterais foi removida para realização da instrumentação na base do tanque, onde foi fixada uma das extremidades da amarra. Após a recolocação da parede móvel, colocava-se a mistura de caulim, bentonita e água no tanque até alturas previamente definidas, e então adicionava-se água em cima da superfície até atingir uma lâmina de 4 cm, que se manteve constante durante todo o ensaio. O tanque utilizado está descrito no item 5.2.1. Antes da colocação da mistura, a outra extremidade livre da amarra foi acoplada ao cabo de aço revestido com nylon, na posição desejada, pelo moitão móvel triplo controlado por um moitão fixo situado na parte mais elevada do conjunto. A primeira posição de ensaio foi definida com a corrente à 0° com a vertical. Durante a colocação da mistura no tanque, a fim de se garantir a verticalidade, a corrente ficava sob carga de tração, por meio da colocação de pesos. Após o preenchimento do tanque retirava-se o pré carregamento imposto na corrente e aguardava-se 24 horas para a execução dos ensaios.

5.5.1.3 Procedimentos relativos aos ensaios de tração

Transcorridas as 24 horas após a preparação do tanque e do sistema de carregamento, iniciava-se os procedimentos relativos ao ensaio. A aplicação de carga foi realizada manualmente, através de pesos confeccionados, mostrados na figura 5.19. Em cada incremento de carga foram realizadas as leituras de voltagem da célula de carga referentes ao

esforço tangencial e normal, ressaltando que após colocada a amarra na posição de ensaio realizava-se uma leitura de voltagem inicial da célula de carga descarregada. Durante o carregamento foi utilizado o detector de materiais para identificar a localização do trecho enterrado da corrente, para tanto foram definidas 3 posições de leitura, nas alturas de 24, 48 e 72 cm com relação ao topo da célula de carga. Para a marcação dos pontos utilizava-se fita crepe, conforme ilustrado na figura 5.29.

Inicialmente a medição com o detector de materiais foi realizada a cada incremento de carga relativa a cada posição de ensaio, deste modo gerava muita sobreposição de pontos, o que dificultava a identificação das catenárias formadas. Como alternativa, optou-se por utilizar o detector na amarra sem carga, submetida à carga de 10 kg e ao carregamento máximo(14 kg).

Por fim fazia-se o descarregamento com leitura da célula de carga e, em seguida, após finalizada a última leitura referente à posição, com a célula descarregada, movia-se a corrente para a próxima posição de ensaio e repetia-se os procedimentos até completar todas as posições.

Para cada incremento de carga, registrava-se um par de leituras de voltagem no multímetro. Estas leituras foram subtraídas da média das leituras da célula de carga antes do carregamento inicial e após o descarregamento total e multiplicada por um fator de conversão da célula de carga, para se obter a componente normal e tangencial da carga de tração aplicada na célula de carga.

O carregamento foi executado em estágios iguais e sucessivos, em cada estágio a 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 do ensaio foi mantida durante 10 minutos e em seguida, dava-se início ao descarregamento em estágios iguais aos realizados durante o carregamento. Cada estágio foi mantido até a estabilização, com registro das leituras. Após o descarregamento total, colocava-se a linha de ancoragem na próxima posição de ensaio. Ressalta-se que a carga e descarga foram realizadas com incrementos iguais e sucessivos de 10 N.

É importante destacar que o atrito entre o cabo de aço revestido com nylon e os moitoes foram desprezados, considerou-se portanto, que a carga atuante na superfície do solo é a mesma imposta no suporte de pesos.



Figura 5.29: Marcação da posição da corrente ao longo da profundidade.

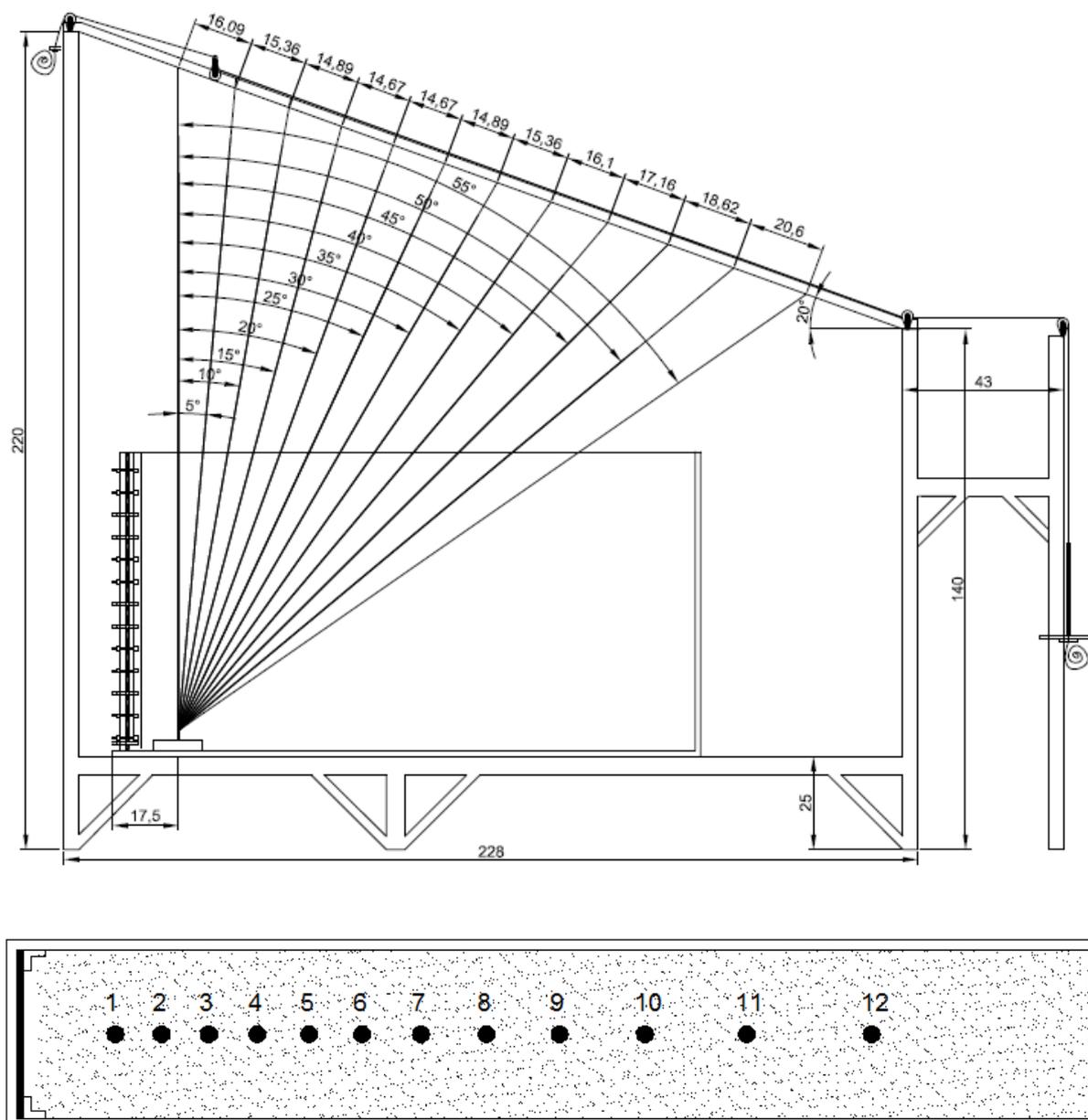


Figura 5.30: Vista superior do tanque – indicação do posicionamento para realização dos ensaios.

As posições definidas para realização de cada ensaio são apresentadas na figura 5.30. A escolha do posicionamento da linha de ancoragem foi determinada em função do ângulo de incidência nominal, que corresponde à inclinação da amarra, com relação ao eixo vertical, quando o tanque está vazio.

Os ensaios foram realizados na argila A com altura de solo, a partir do topo da célula de carga, de 72 cm e na argila B com alturas de solo de 72 cm, 48 cm e 24 cm que representam as profundidades de cravação do topo da estaca torpedo na escala do protótipo de 28,80 m, 19,20 m e 9,60 m, respectivamente. As figuras 5.31 a 5.33 apresentam a vista geral do tanque com as diferentes alturas de solo estudadas.

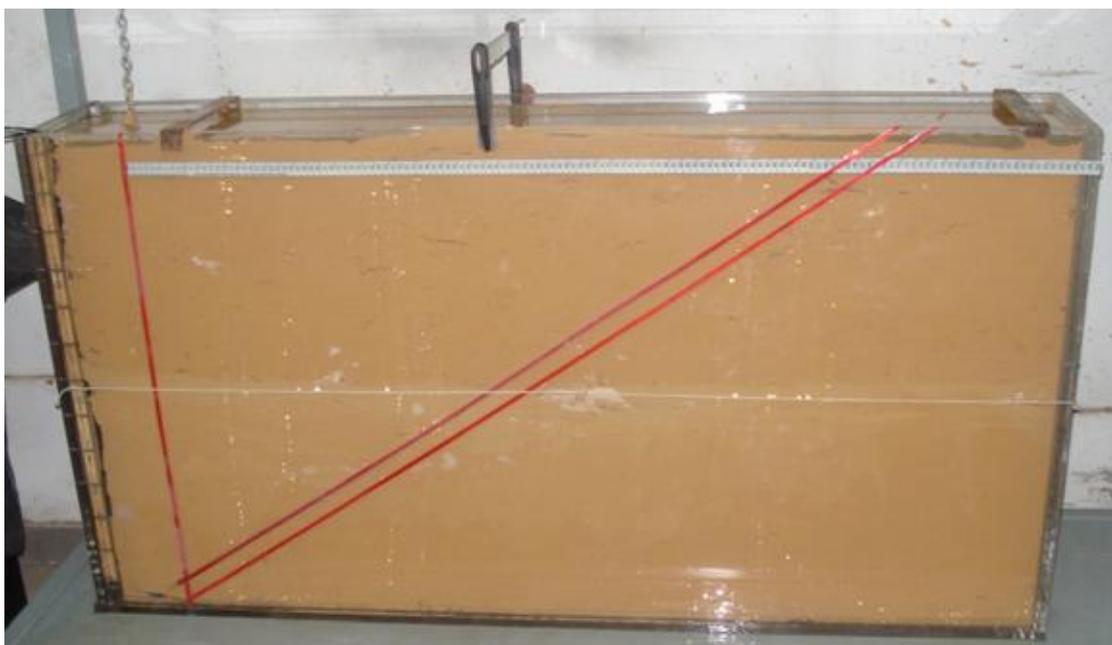


Figura 5.31: Vista geral do tanque preenchido com 72 cm de altura de solo.

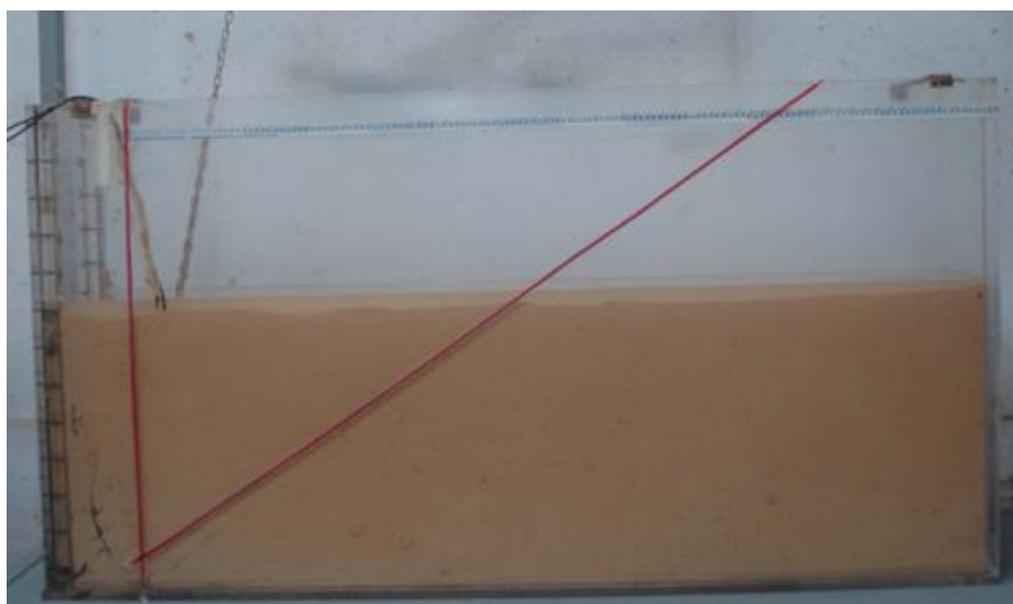


Figura 5.32: Vista geral do tanque preenchido com 48 cm de altura de solo.

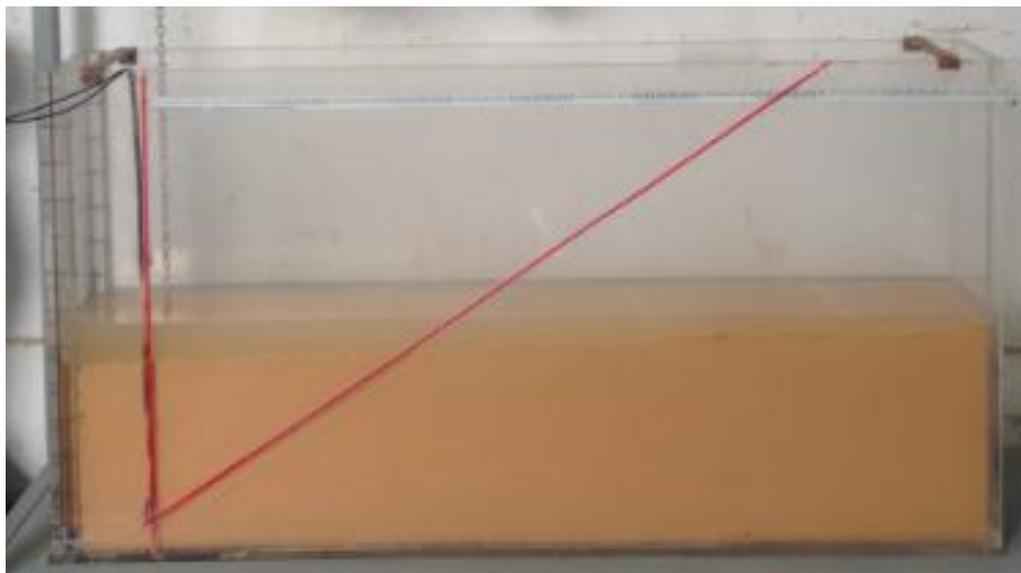


Figura 5.33: Vista geral do tanque preenchido com 24 cm de altura de solo.

A Figura 5.34 mostra o corte produzido na superfície do solo pela amarra.



Figura 5.34: Ruptura do solo devido à aplicação de carga com componente horizontal na amarra.

5.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MINI PALHETA

Foram realizados ensaios de mini palheta em duas misturas compostas por 85% caulim e 15% bentonita, com 100 e 120% de umidade, chamadas de argila A e argila B, respectivamente. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.6.1 Argila A

Na campanha de ensaios de mini palheta na argila A foram realizados 9 ensaios com velocidade de rotação de 5,4°/min. A tabela 5.6 apresenta a resistência ao cisalhamento não drenada em cada um dos ensaios. A figura 5.35 exibe a variação de S_u ao longo da profundidade para a argila A.

Embora os resultados apresentem certa dispersão, é possível definir uma linha de tendência, representativa da variação da resistência com a profundidade. Os valores de S_u medidos são constantes até a profundidade de 20 cm, então passa a crescer linearmente com a profundidade.

Tabela 5.6: Resultados de S_u nos ensaios de mini palheta na argila A.

Prof. (cm)	S_u (Pa)								
	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
7,5	1775,45	1822,76	1462,56	1337,28	1566,34	1295,29	1443,66	1323,52	1547,67
22,5	1764,70	1379,55	1352,17	1315,25	1336,63	1459,99	1395,99	1585,75	1448,33
32,5	2066,64	1561,03	2148,95	1559,06	1152,84	2010,95	1390,39	1718,58	1525,51
42,5	2223,07	1850,27	2428,74	1826,83	1509,95	2333,44	1624,65	1896,89	1802,28
52,5	2241,91	2280,27	2644,25	2045,93	1795,71	2599,00	1974,96	2109,40	1996,26

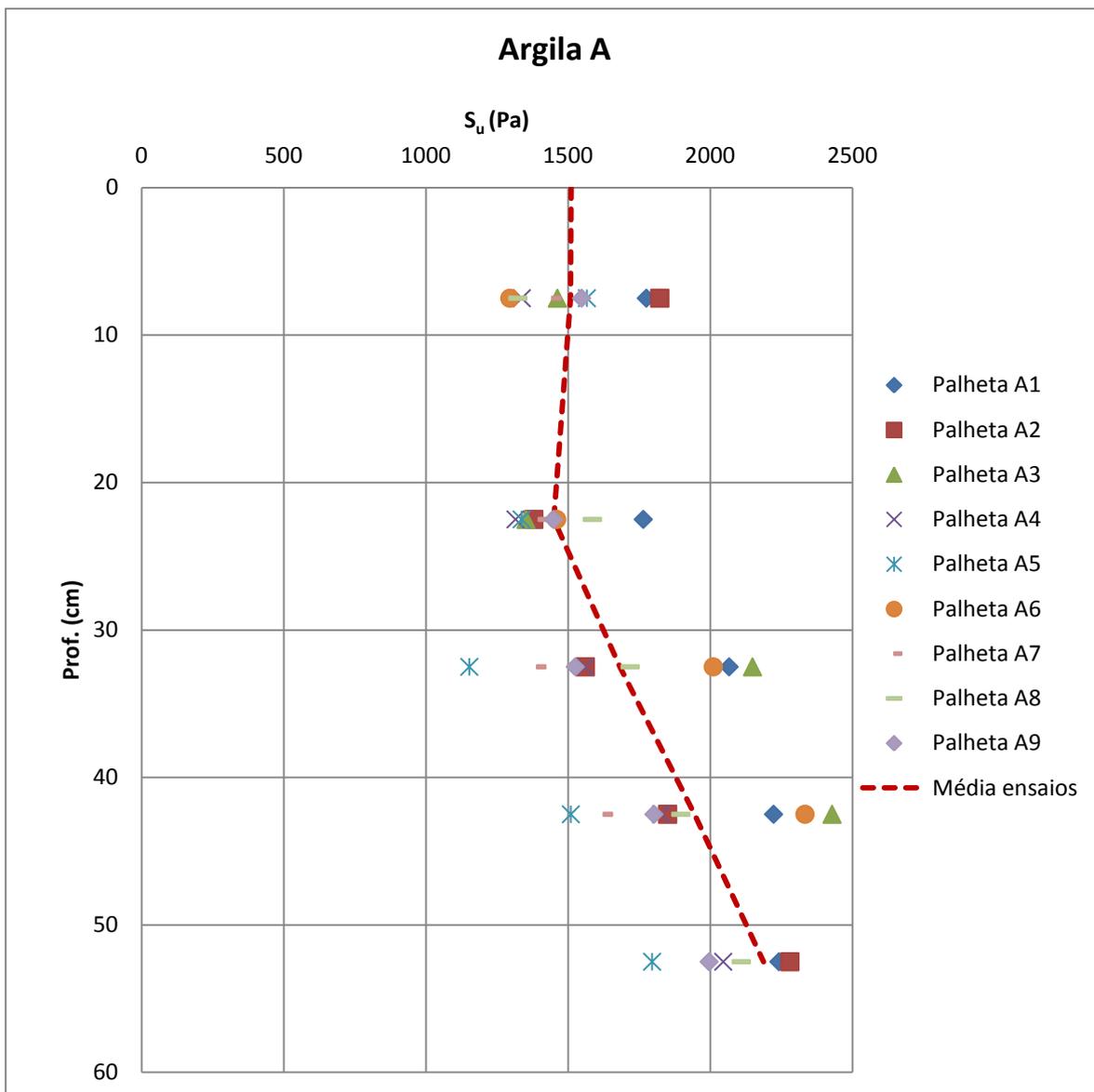


Figura 5.35: Variação de S_u ao longo da profundidade para a argila A.

5.6.2 Argila B

Na campanha de ensaios de mini palheta na argila B foram realizados 8 ensaios com velocidade de rotação de $5.4^\circ/\text{min}$. A tabela 5.7 apresenta a resistência ao cisalhamento não drenada em cada um dos ensaios realizados na argila B.

Tabela 5.7: Resultados de S_u nos ensaios de mini palheta na argila B.

Prof. (cm)	S_u (Pa)							
	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
7,5	332,08	505,46	350,26	430,86	499,24	429,9	486,13	477,8
22,5	343,48	547,5	405,26	432,57	631,58	427,7	438,1	451,41
32,5	436,98	538,86	523,08	459,19	743,16	568,9	592,15	575,08
42,5	529,68	623,45	506,58	489,3	519,21	428,85	512,14	627,3
52,5	554,98	650,34	547,16	516,1	568,21	498,7	541,79	628,26

A figura 5.36 exibe a variação de S_u ao longo da profundidade para a argila B. Os resultados dos ensaios de mini palheta na argila B apresentam o mesmo comportamento observado na argila A. Os valores de S_u são relativamente constantes nos primeiros 20 cm e, posteriormente, crescem linearmente com a profundidade.

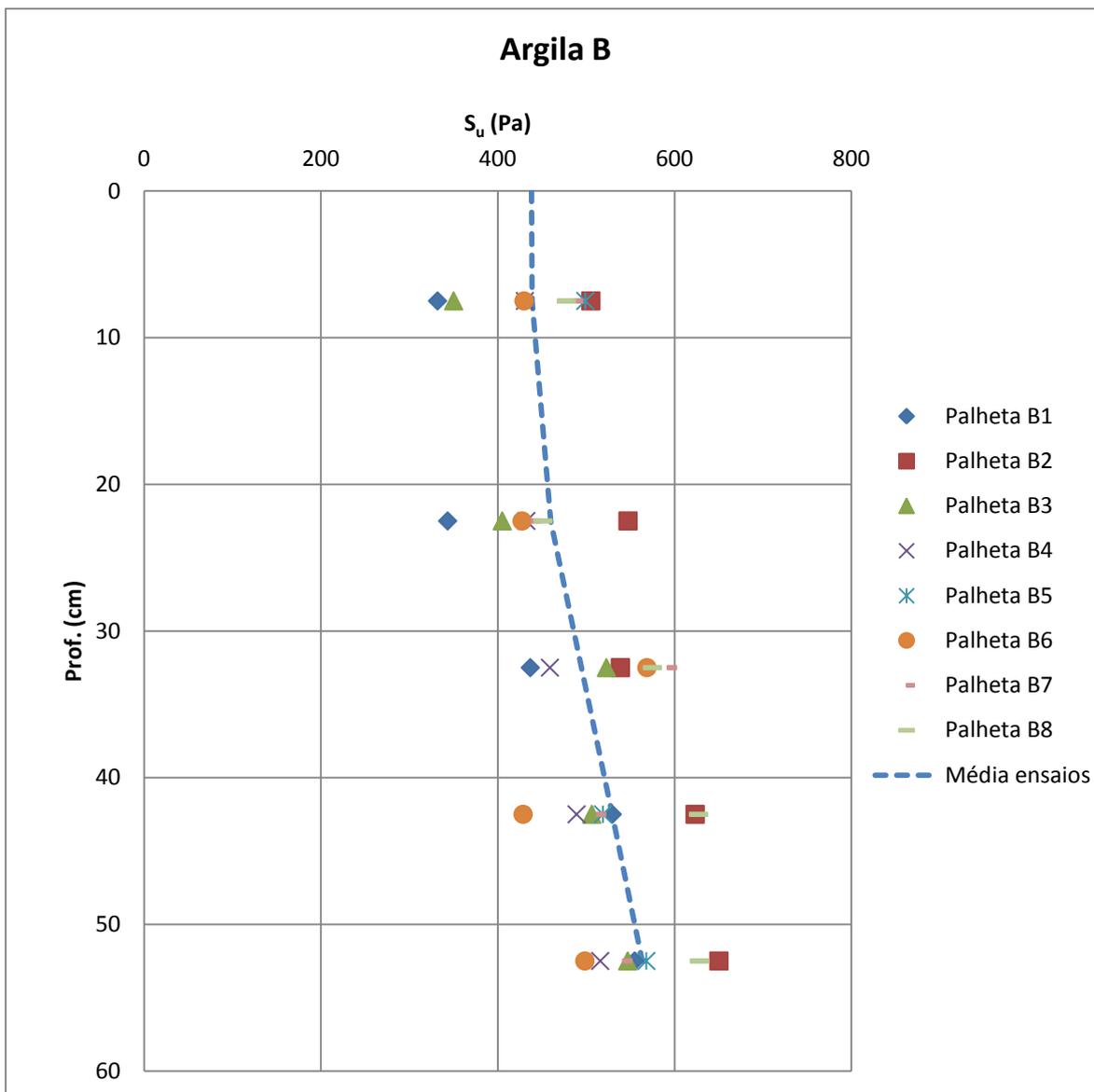


Figura 5.36: Variação de S_u ao longo da profundidade para a argila B.

5.6.3 Comparação entre as argilas A e B

A figura 5.37 apresenta a média dos resultados dos ensaios de mini palheta ao longo da profundidade para as duas misturas estudadas e as respectivas tendências de S_u ao longo da profundidade. Verifica-se que o S_u da argila A é muito superior ao da argila B, a variação da resistência ao cisalhamento não drenada com a profundidade, para a argila A:

$$S_u(w = 100\%) = 2,47 \cdot z + 0,88 \quad (5.7)$$

e para a argila B:

$$S_u(w = 120\%) = 0,30 \cdot z + 0,41 \quad (5.8)$$

onde a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) é fornecido em kPa e z é a profundidade em metros.

Em ambos os casos, os ajustes foram satisfatórios (coeficiente de determinação foi de 0,99 para a argila A e 0,97 para a argila B). Ambas as misturas possuem a mesma composição de material seco, a única diferença é no teor de umidade. Portanto, concluiu-se que o S_u é função da umidade e como já esperado, a argila A apresenta uma resistência muito superior à obtida para a argila B, comprovando-se que uma pequena variação no teor de umidade do material provoca uma diferença significativa no valor de S_u .

Na figura 5.37 também são comparados os resultados de laboratório com a resistência média de projeto adotada pela Petrobras na Bacia de Santos, conforme descrito na seção 3.1.2.

Pode se observar que a mistura B apresenta o comportamento de resistência semelhante ao de campo. Em contrapartida, a mistura A apresenta o aumento de S_u ao longo da profundidade cerca de quatro vezes maior que o de campo.

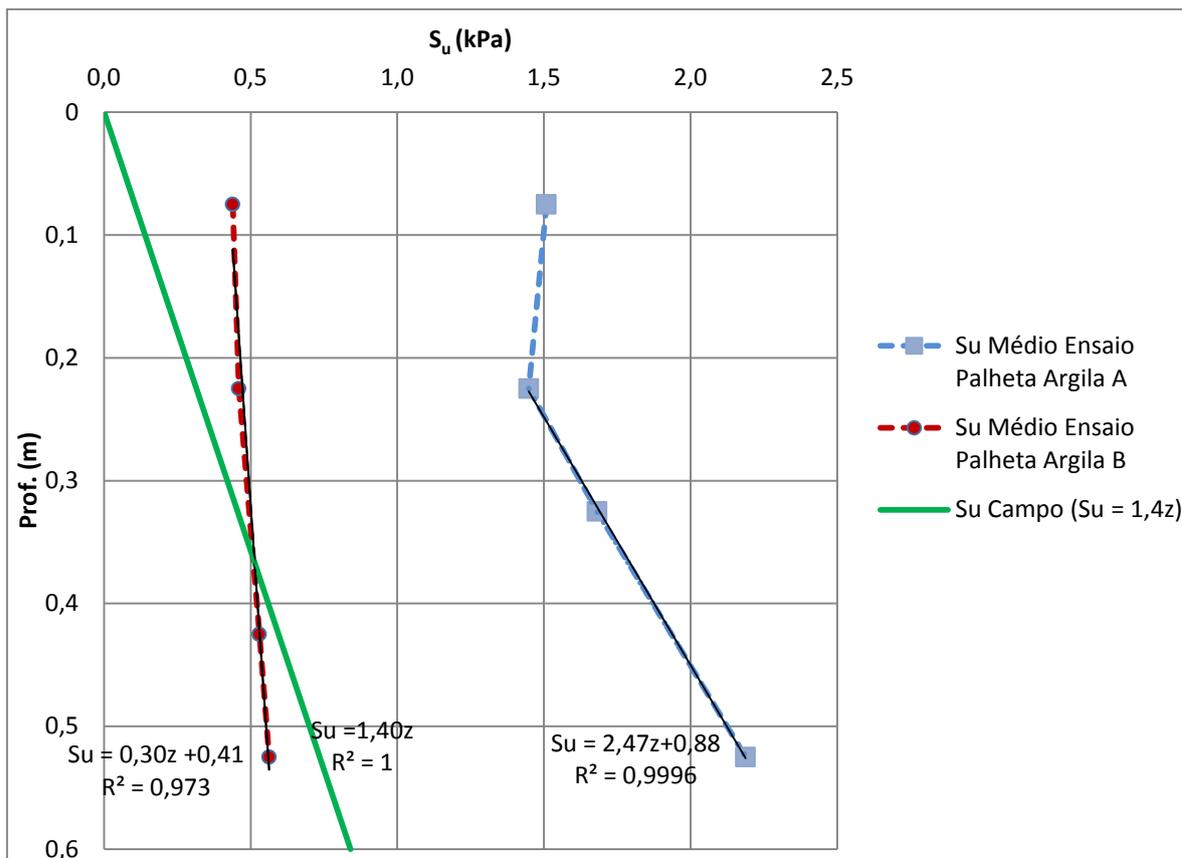


Figura 5.37: Variação de S_u ao longo da profundidade.

Como o S_u depende do estado de tensões iniciais, é usual normalizar seu valor pela tensão vertical efetiva, de forma a obter a razão de resistência não drenada, conforme estabelecido pelos conceitos do Modelo Cam-Clay S_u/σ'_{vo} na faixa de 0,25 a 0,3. Normalizando os valores de S_u , conforme resumido na tabela 5.8, verifica-se que somente na argila B os valores aproximam da faixa prevista ($S_u/\sigma'_{vo} \sim 0,30$). A razão dos valores elevados de resistência não são identificados. Duas razões podem ser consideradas:

- o material não está totalmente saturado, pois embora o teor de umidade seja elevados (100% e 120%) a bentonita absorve quantidades expressivas de água;
- a normalização expressa pela razão S_u/σ'_{vo} não é aplicável às condições de ensaio, uma vez que a tensão vertical é muito baixa próximo à superfície do tanque.

Tabela 5.8: Resultados da normalização do S_u médio ao longo da profundidade.

Prof. (cm)	σ'_{vo} (Pa)		S_u médio (Pa)		S_u/σ'_{vo}	
	Argila A	Argila B	Argila A	Argila B	Argila A	Argila B
7,5	261	227,25	1508,28	438,97	5,78	1,93
22,5	783	681,75	1448,71	459,7	1,85	0,67
32,5	1131	984,75	1681,55	554,68	1,49	0,56
42,5	1479	1287,75	1644,01	529,56	1,11	0,41
52,5	1827	1590,75	2187,52	563,19	1,20	0,35

A figura 5.38 apresenta valores da razão S_u/σ'_{vo} : na argila A a razão S_u/σ'_{vo} se aproxima de 1, enquanto que a argila B é da ordem de 0,35.

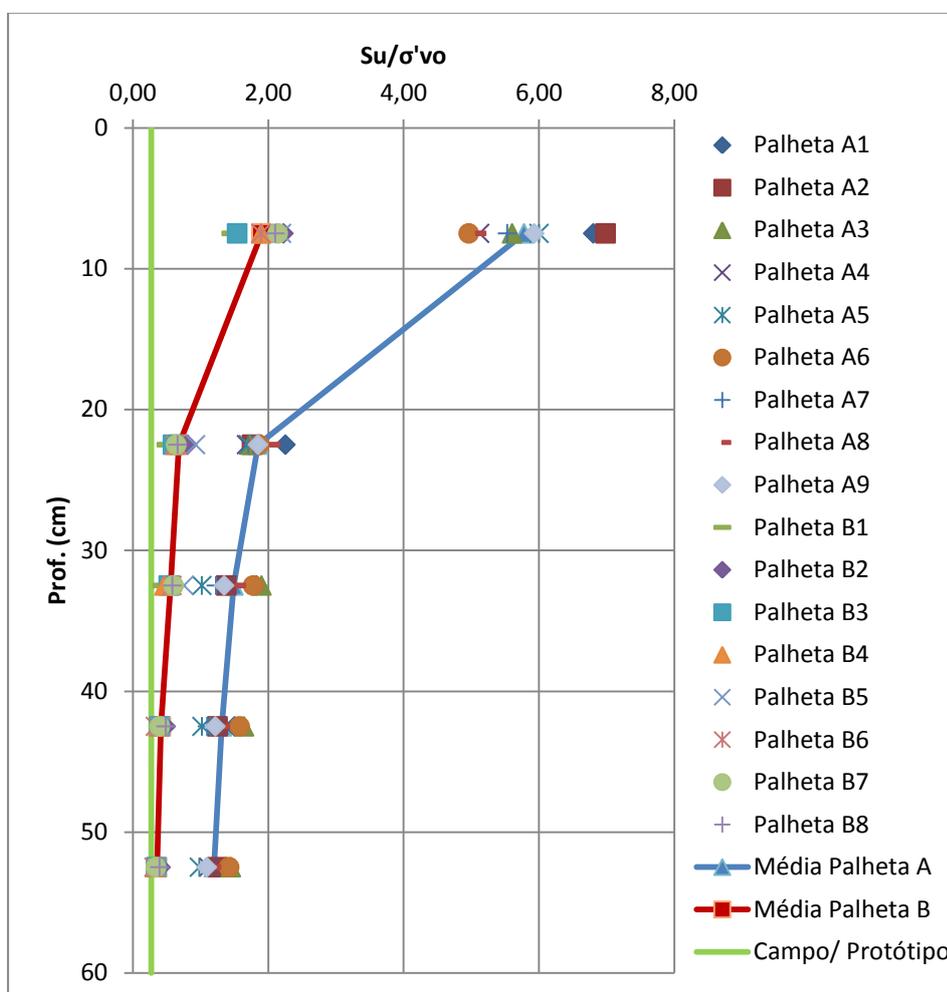


Figura 5.38: Resistência ao cisalhamento não drenada normalizada (S_u/σ'_{vo}) versus profundidade.

6 CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DO TRECHO ENTERRADO DA LINHA DE ANCORAGEM – RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, são analisadas as configurações geométricas assumidas pela amarra inserida no solo, para cada posição imposta durante os ensaios. São reportadas também análises comparativas com os resultados obtidos pelo programa DIGIN. Os ensaios de carregamento estático foram projetados para 12 ângulos de incidência nominais entre 0° (posição 1) e 55° (posição 12) com relação à vertical. As leituras para identificação da configuração geométrica da amarra ao longo da profundidade, por meio do detector de materiais, iniciou-se na posição relativa ao ângulo nominal de 15° (posição 4), em consequência dos baixos deslocamentos da amarra nas posições anteriores.

Para o atendimento pleno dos objetivos desta dissertação, no que diz respeito à similaridade, todas as grandezas de interesse obedeceram aos seus respectivos fatores de escala estabelecidos na seção 4.3. Os resultados dos ensaios de mini palheta mostrados anteriormente no item 5.6, bem como sua interpretação, foram necessários à caracterização das duas misturas argilosas (A e B) utilizadas nesta pesquisa, conforme discutidas no capítulo 5.

Inicialmente os ensaios foram realizados com a linha de ancoragem inserida nas argilas A e B, com altura de solo de 72 cm correspondente à profundidade de 28,80 m na escala do protótipo. Posteriormente foi feito um novo conjunto de ensaios para a argila B, incluindo outras duas alturas de solo de 48 cm e 24 cm, que representam as profundidades de cravação do topo da estaca torpedo na escala do protótipo de 19,20 m e 9,60 m, respectivamente. As características geotécnicas das argilas são apresentadas no capítulo 5, destacando-se que a argila B se assemelha às condições de campo.

Para melhor entendimento, todos os gráficos apresentados neste capítulo são referenciados por meio do ângulo nominal. Conforme informado no item 5.5.1.3, o ângulo nominal é o ângulo de incidência da amarra junto à célula de carga, no caso do tanque vazio. É importante destacar que, ao contrário dos ângulos nominais, todos os ângulos de incidência medidos nos ensaios são referenciados a partir do eixo horizontal.

Para uma análise rigorosa da geometria da catenária foi desenvolvido um script de cálculo em linguagem Octave que realiza automaticamente a interpolação spline dos seguintes pontos de referência medidos em laboratório, durante os ensaios:

- a) coordenadas do ponto de partida da linha, no moitão superior (conforme o ângulo nominal);
- b) coordenadas do TDP, observadas na superfície do solo;
- c) coordenadas de um ponto intermediário, dentro do solo, medidas com um sensor por ultrassom;
- d) coordenadas do ponto de ligação com a célula de carga;
- e) coordenadas de um ponto 6cm acima da célula, definidas de modo a reproduzir o ângulo de chegada da amarra tal como obtido da decomposição da força.

Tal procedimento fornece uma descrição precisa da geometria da catenária a cada passo em qualquer ensaio.

Os resultados, provenientes da determinação da geometria da amarra por interpolação, estão dispostos no Apêndice A, no qual são apresentadas as catenárias estimadas para todos os ensaios, em todos os ângulos nominais (indicados nas figuras) e todos os ciclos de carregamento. Considera-se que durante a descarga não há mudança perceptível na geometria da catenária. Os pontos de referência são indicados na figura através de asteriscos.

Uma vez definida a configuração geométrica assumida pela amarra, a análise concentra-se nos resultados e tendências de atenuação de carga nas 12 posições de estudo e carregamentos até 14 kg. Portanto, a seguir será abordada e discutida a transferência de carga no trecho enterrado no solo da linha de ancoragem.

Ao final deste capítulo, é realizada uma análise geral de todos os resultados obtidos.

6.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA CARREGAMENTO MÁXIMO

As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam resumidamente os ângulos de incidência medidos na superfície do solo (TDP) e no topo da estaca, respectivamente, referentes ao carregamento máximo de ensaio de 14 kg em cada condição de ensaio. Para uma análise estatística são apresentados o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV). Observa-se baixa

variabilidade dos dados obtidos, indicando consistência dos resultados. Sendo assim, optou-se por expressar graficamente os resultados médios obtidos em cada condição de ensaio.

Tabela 6.1: Ângulos de incidência no leito (TDP), para carga de 14 kgf.

Condição	Posição de ensaio	Ângulo nominal (°)	Ângulo de incidência medido no leito/TDP (°)						
			Ensaio				Média	Desvio Padrão(σ_s)	Coeficiente Variação (%)
			1	2	3	4			
Argila A h=72 cm	4	15,0	67,0	67,0	68,0	-	67,3	0,6	0,9
	5	20,0	61,0	61,0	62,0	-	61,3	0,6	0,9
	6	25,0	55,0	55,0	56,0	-	55,3	0,6	1,0
	7	30,0	50,0	49,0	50,0	-	49,7	0,6	1,2
	8	35,0	45,0	43,0	44,0	-	44,0	1,0	2,3
	9	40,0	39,0	39,0	40,0	-	39,3	0,6	1,5
	10	45,0	33,0	33,0	34,0	-	33,3	0,6	1,7
	11	50,0	28,0	28,0	29,0	-	28,3	0,6	2,0
Argila B h=72 cm	4	15,0	70,0	70,1	70,6	69,6	70,1	0,4	0,6
	5	20,0	65,1	65,1	64,8	65,3	65,1	0,2	0,4
	6	25,0	59,9	59,2	59,5	59,7	59,6	0,3	0,5
	7	30,0	54,8	55,2	54,8	55,1	55,0	0,2	0,4
	8	35,0	49,6	49,1	49,7	50,0	49,6	0,4	0,7
	9	40,0	44,5	44,4	44,0	44,2	44,3	0,2	0,5
	10	45,0	38,7	38,2	38,6	39,3	38,7	0,4	1,1
	11	50,0	32,9	33,1	33,0	32,7	32,9	0,2	0,5
Argila B h=48 cm	4	15,0	72,6	71,8	72,2	72,0	72,2	0,4	0,5
	5	20,0	67,5	67,1	67,4	67,0	67,2	0,2	0,4
	6	25,0	62,7	62,4	62,3	62,9	62,6	0,2	0,4
	7	30,0	57,6	57,6	56,8	57,4	57,4	0,4	0,6
	8	35,0	52,8	52,2	52,4	52,5	52,5	0,2	0,5
	9	40,0	47,5	47,0	47,0	46,9	47,1	0,3	0,5
	10	45,0	43,0	42,3	42,3	42,4	42,5	0,3	0,8
	11	50,0	38,0	36,5	37,6	36,9	37,3	0,7	1,8
Argila B h=24 cm	4	15,0	75,0	74,0	74,0	74,0	74,3	0,5	0,7
	5	20,0	70,0	70,0	69,0	70,0	69,8	0,5	0,7
	6	25,0	65,0	65,0	64,0	64,0	64,5	0,6	0,9
	7	30,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	0,0	0,0
	8	35,0	54,0	54,0	54,0	54,0	54,0	0,0	0,0
	9	40,0	50,0	49,0	50,0	49,0	49,5	0,6	1,2
	10	45,0	45,0	45,0	45,0	44,0	44,8	0,5	1,1
	11	50,0	39,0	40,0	40,0	39,0	39,5	0,6	1,5
	12	55,0	35,0	35,0	35,0	34,0	34,8	0,5	1,4

Tabela 6.2: Ângulos de incidência no topo da estaca, para carga de 14 kgf.

Condição	Posição de ensaio	Ângulo nominal (°)	Ângulo de incidência medido no topo da estaca (°)						
			Ensaio				Média	Desvio Padrão(σ_s)	Coeficiente de Variação (%)
			1	2	3	4			
Argila A h=72 cm	4	15,0	88,1	87,4	87,9	-	87,8	0,4	0,4
	5	20,0	87,9	86,2	85,9	-	86,7	1,0	1,2
	6	25,0	86,4	85,2	84,8	-	85,5	0,9	1,0
	7	30,0	85,9	85,0	82,9	-	84,6	1,6	1,9
	8	35,0	82,2	81,7	81,7	-	81,9	0,3	0,3
	9	40,0	81,5	78,9	78,7	-	79,7	1,5	1,9
	10	45,0	78,0	76,6	75,3	-	76,6	1,4	1,8
	11	50,0	73,5	74,2	73,1	-	73,6	0,6	0,8
Argila B h=72 cm	4	15,0	86,4	85,9	84,5	85,7	85,7	0,8	0,9
	5	20,0	82,4	82,9	81,0	82,9	82,3	0,9	1,1
	6	25,0	78,7	78,0	77,3	77,1	77,8	0,7	0,9
	7	30,0	75,3	73,1	72,6	70,5	72,9	2,0	2,7
	8	35,0	71,8	69,2	67,4	65,4	68,4	2,7	4,0
	9	40,0	69,4	64,8	62,5	61,4	64,5	3,6	5,5
	10	45,0	62,9	61,2	58,0	57,7	59,9	2,5	4,2
	11	50,0	57,3	56,1	55,7	55,2	56,1	0,9	1,6
Argila B h=48 cm	4	15,0	85,2	86,7	85,0	83,3	85,1	1,4	1,6
	5	20,0	81,0	81,0	81,9	78,5	80,6	1,5	1,9
	6	25,0	75,3	73,7	76,0	71,8	74,2	1,9	2,5
	7	30,0	68,8	69,2	69,9	67,2	68,8	1,1	1,7
	8	35,0	63,4	64,6	63,6	63,4	63,8	0,6	0,9
	9	40,0	59,6	59,0	59,2	59,6	59,3	0,3	0,4
	10	45,0	58,3	56,6	56,3	51,3	55,7	3,0	5,4
	11	50,0	52,8	50,9	49,9	47,1	50,2	2,4	4,8
Argila B h=24 cm	4	15,0	80,5	82,9	82,9	82,9	82,3	1,2	1,4
	5	20,0	76,0	73,3	77,3	77,8	76,1	2,0	2,6
	6	25,0	69,4	69,9	72,4	73,3	71,3	1,9	2,7
	7	30,0	66,6	65,4	67,4	67,4	66,7	0,9	1,4
	8	35,0	61,6	62,3	63,4	63,4	62,7	0,9	1,5
	9	40,0	56,6	59,4	58,0	58,0	58,0	1,1	1,9
	10	45,0	52,8	54,4	51,6	53,7	53,1	1,2	2,2
	11	50,0	49,6	50,8	47,5	49,9	49,5	1,4	2,8
12	55,0	43,8	45,7	44,3	44,5	44,6	0,8	1,8	

Ao analisar os resultados apresentados nas figuras 6.1 a 6.4, em que no eixo das abscissas está representado o deslocamento horizontal (δ) da amarra a partir do topo da estaca e o eixo das

ordenadas representa a altura de solo (H), verifica-se um comportamento característico quanto à configuração geométrica da linha de ancoragem, que assume a forma de uma curva denominada de catenária invertida para todas as posições de ensaio. Refletindo a condição de equilíbrio da linha de ancoragem no trecho enterrado.

Conforme apresentado na seção 2.8, a configuração em catenária invertida também foi constatada por BANG *et al* (2003), WANG *et al* (2010) e NEUBECKER & RANDOLPH (1995) em ensaios de centrífuga e por Liu *et al* (2012, 2013) por meio de solução analítica.

A figura 6.1 apresenta os resultados médios obtidos para a linha de ancoragem enterrada na argila A, com altura de solo de 72 cm. Nas figuras 6.2 a 6.4 pode-se conferir os resultados médios obtidos na argila B para a altura de solo de 72 cm, 48 cm e 24 cm respectivamente.

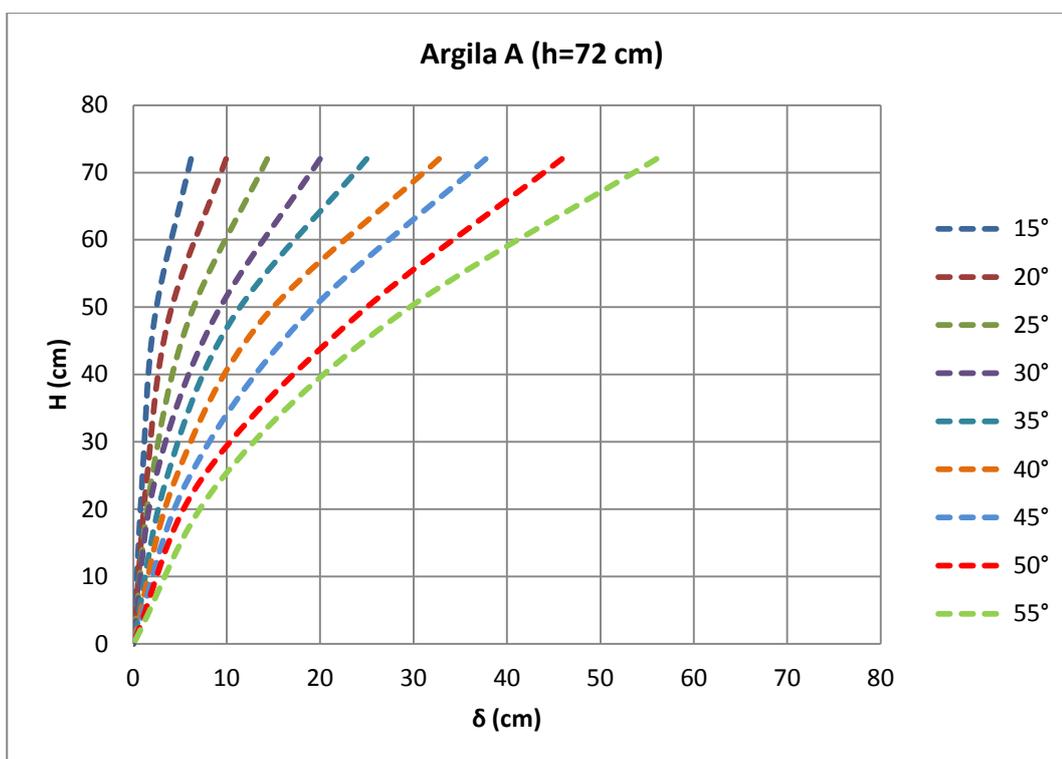


Figura 6.1: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila A com altura de solo de 72 cm, para carregamento de 14 kg.

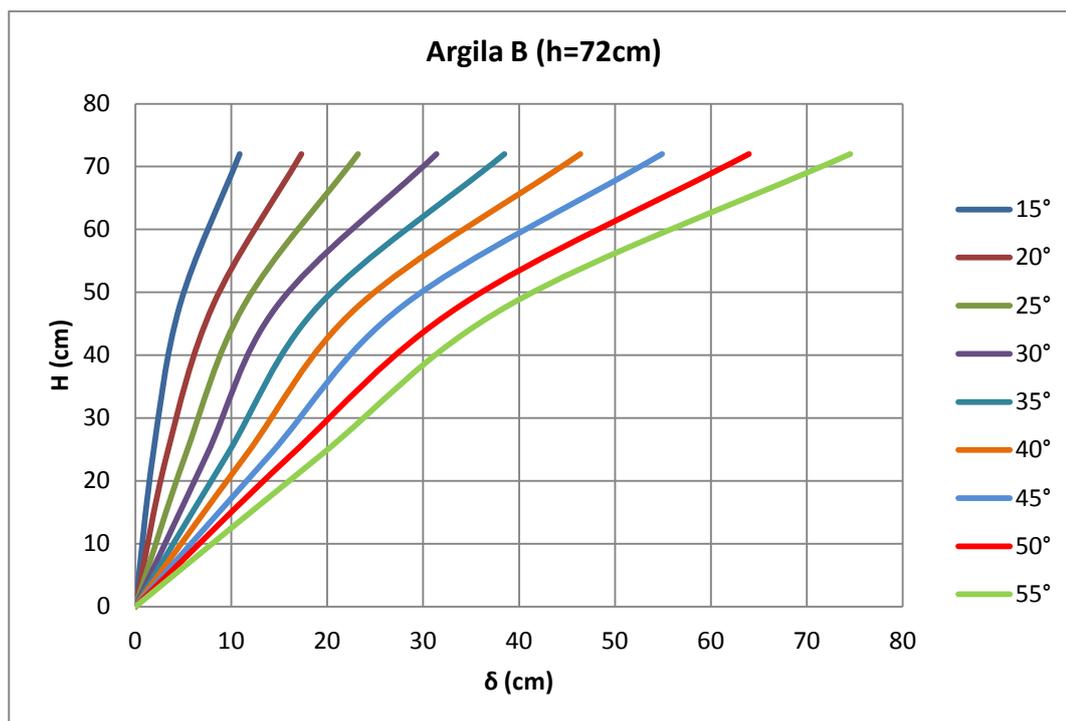


Figura 6.2: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 72 cm, para carregamento de 14 kg.

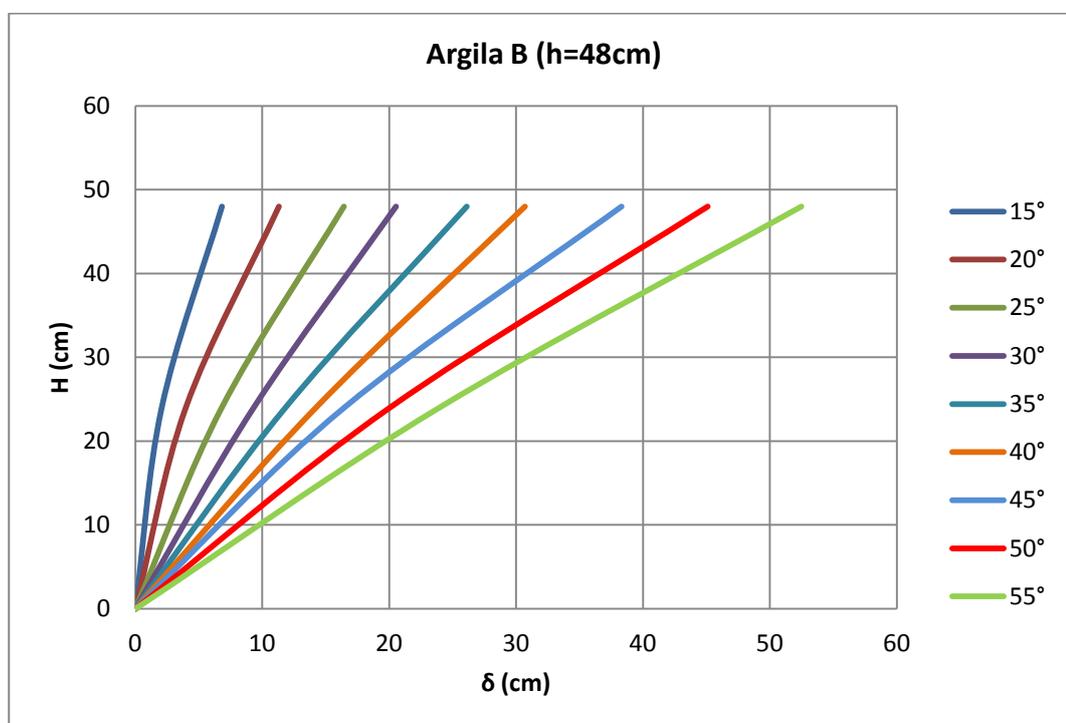


Figura 6.3: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 48 cm, para carregamento de 14 kg.

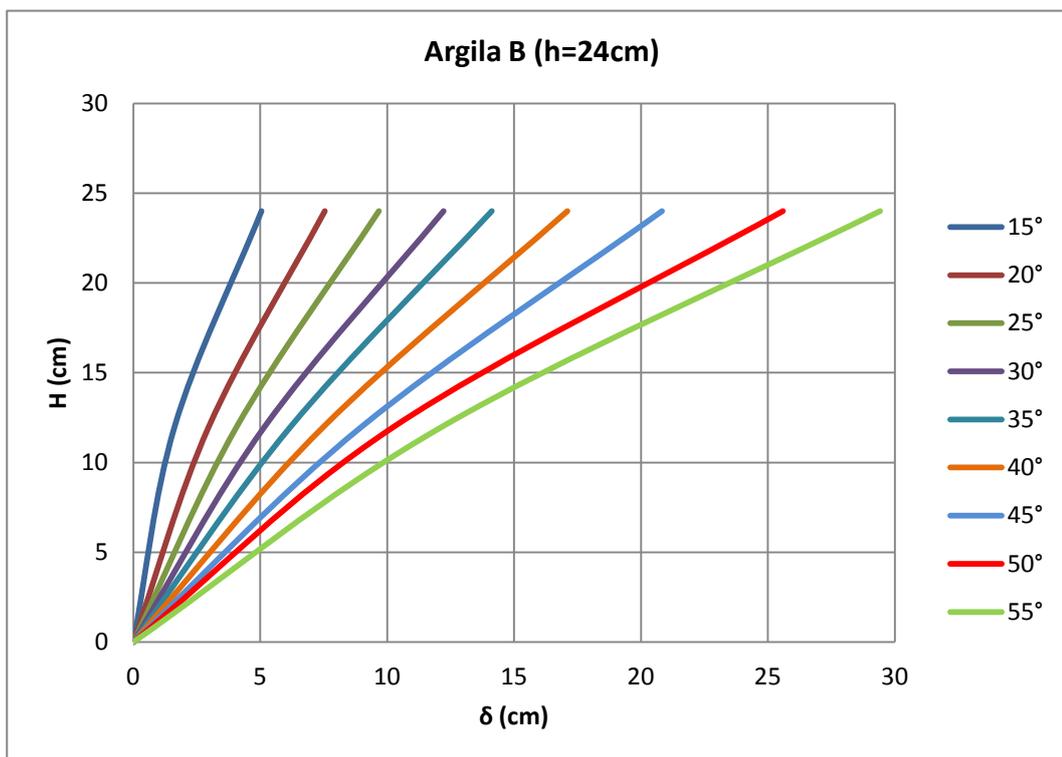


Figura 6.4: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 24 cm, para carregamento de 14 kg.

Na figura 6.5 compara-se a configuração geométrica e os deslocamentos da amarra enterrada nas argilas A e B. Conforme previsto, em ambos os casos a amarra assume a configuração em catenária invertida. Cabe ressaltar que a força necessária para movimentar a amarra depende das propriedades da argila, expressa pela resistência ao cisalhamento não drenada. Os resultados mostram claramente um maior arrasto da amarra enterrada na argila B, justificado pela menor resistência ao cisalhamento não drenada apresentada e conseqüentemente pela maior adesão não drenada entre a amarra e a argila B. Portanto, os resultados dos ensaios de carregamento estático são compatíveis com as resistências medidas nos ensaios de caracterização geotécnica já discutidos no capítulo 5.

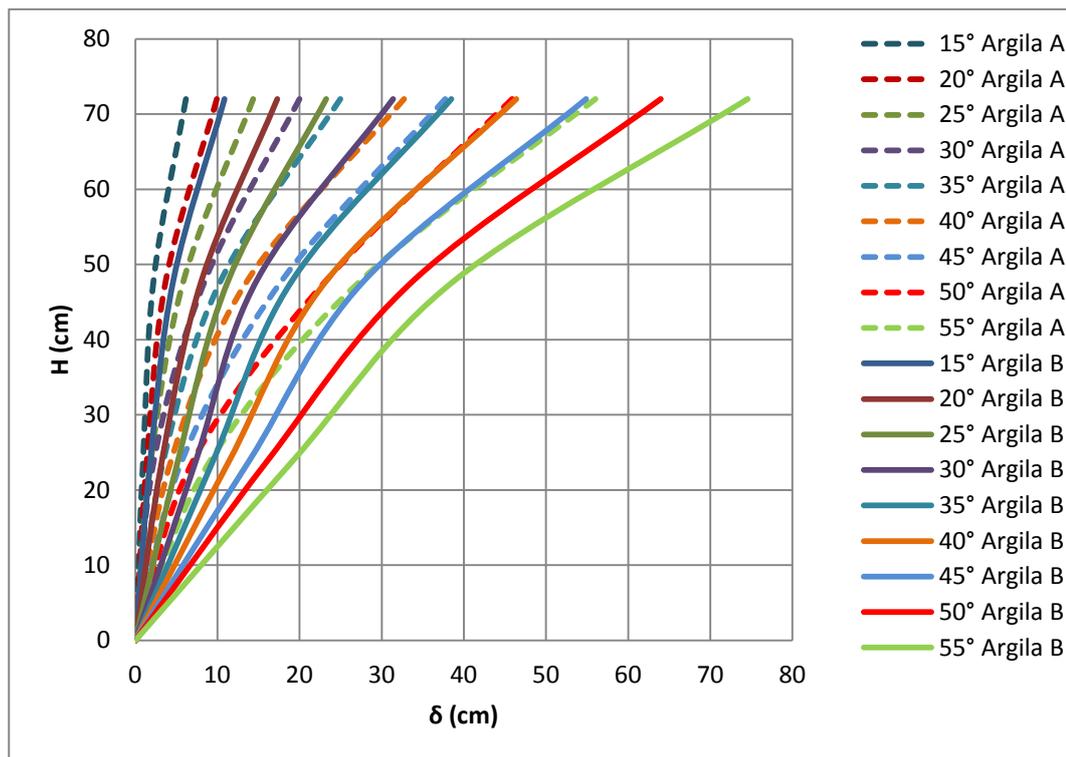


Figura 6.5: Comparação dos deslocamentos e da configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida nas argilas A e B, para o carregamento de 14 kg.

Para comparar os ensaios realizados com mesmo material (Argila B) e diferentes alturas de solo (H), é fundamental adimensionalizar os resultados. Desta forma a figura 6.6 apresenta os deslocamentos horizontais (δ) e a altura de solo (H) adimensionalizados pela altura máxima (H_{\max}). Comparativamente, observa-se que quanto menor a altura de solo, maior é deslocamento da amarra. Para que haja deslocamento, a força de arrasto da amarra deve ser superior à adesão solo-amarra. A adesão é mobilizada ao longo de todo o comprimento da amarra e, assim, camadas de solo de mais espessura correspondem a mais comprimento enterrado de amarra e, portanto, maior atenuação de cargas. Para as posições de ensaio referentes aos ângulos nominais de até 20° , verifica-se uma tendência de sobreposição da configuração geométrica da amarra para os ensaios realizados nas alturas de solo de 24 cm e 48 cm.

Para facilitar a comparação entre ensaios foram utilizadas as mesmas cores para cada posição, sendo que diferentes traços representam as três alturas de solo estudadas.

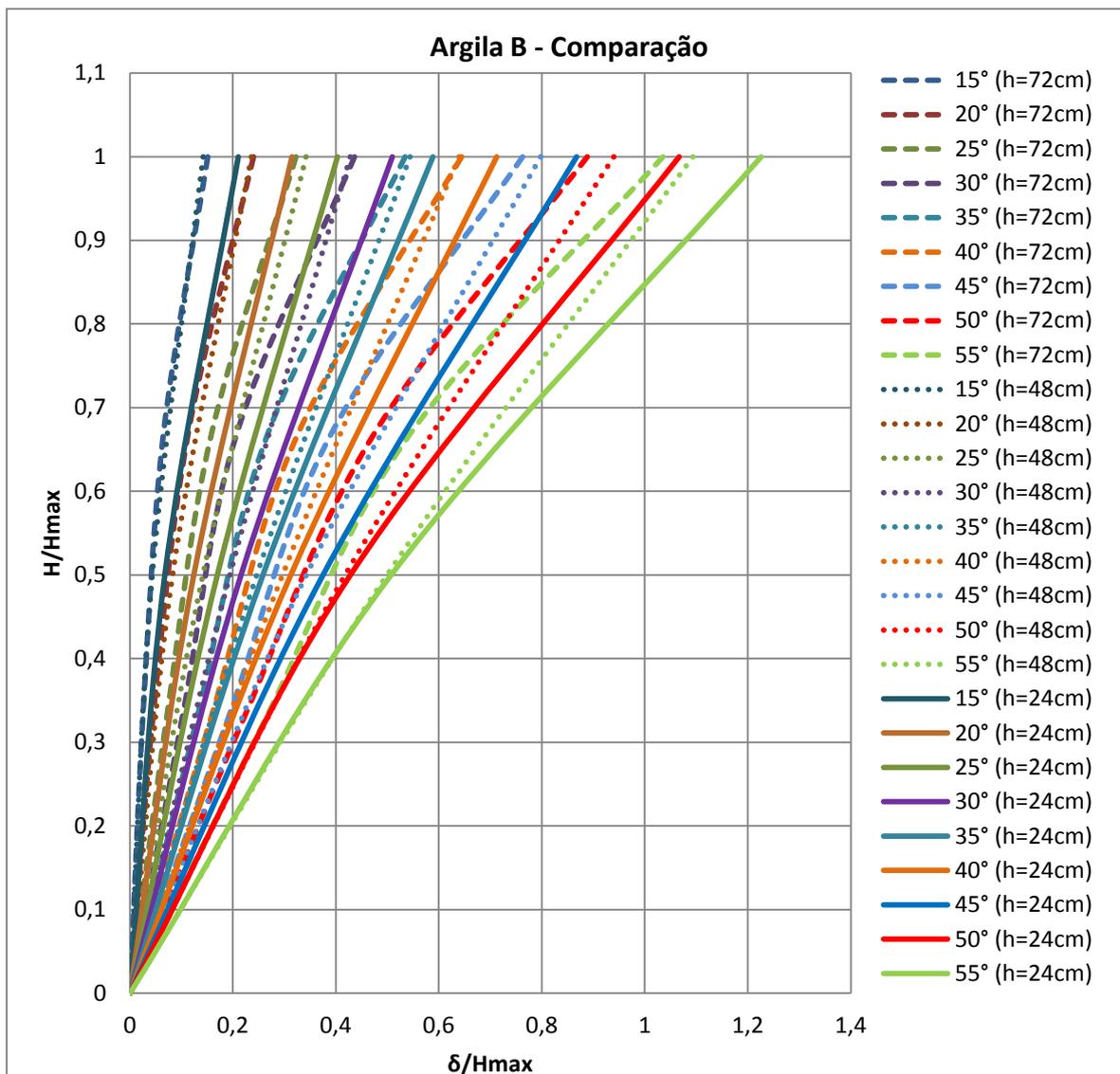


Figura 6.6: Comparação dos deslocamentos e da configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila B com alturas de solo de 72 cm, 48 cm e 24 cm para carregamento de 14 kg.

6.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA DIFERENTES CARREGAMENTOS

É importante destacar que todas as análises anteriores referentes à configuração geométrica remetem-se ao carregamento máximo de ensaio (14 kg). Para os demais carregamentos o comportamento é semelhante, conforme pode ser observado nas figuras 6.7 a 6.14, que apresentam os deslocamentos do trecho enterrado da amarra para três posições de ensaio referentes aos ângulos nominais (θ_n) de 15°, 45° e 55°, nas situações sem carga e carregamento de 10 kg aplicado na superfície do leito em cada condição de ensaio.

Tabela 6.3: Comparação entre os ângulos de incidência no leito (TDP) e no topo da célula de carga para carregamentos de 0, 10 e 14 kg.

Condição	Posição de ensaio	Ângulo nominal θ_n (°)	Ângulo de incidência medido no leito/TDP (°)		Ângulo de incidência medido no topo da estaca (°)		
			10 kg	14kg	sem carga	10 kg	14kg
Argila A h=72 cm	4	15,0	67,0	67,3	89,0	88,6	87,5
	5	20,0	60,3	61,3	86,7	85,6	85,6
	6	25,0	54,3	55,3	85,3	83,5	83,5
	7	30,0	48,3	49,7	82,4	80,9	80,5
	8	35,0	42,7	44,0	80,3	78,8	77,9
	9	40,0	38,3	39,3	76,6	75,5	74,7
	10	45,0	33,0	33,3	74,3	72,9	72,0
	11	50,0	27,7	28,3	70,6	69,0	69,3
Argila B h=72 cm	4	15,0	69,0	69,3	87,6	87,3	85,8
	5	20,0	63,3	65,1	85,5	83,9	82,5
	6	25,0	58,0	59,6	82,5	80,2	78,1
	7	30,0	53,3	55,0	77,5	75,6	73,4
	8	35,0	48,0	49,6	72,6	70,7	69,1
	9	40,0	43,0	44,3	67,9	66,9	65,2
	10	45,0	37,0	38,7	64,6	62,7	60,7
	11	50,0	31,8	32,9	59,8	57,9	56,9
Argila B h=48 cm	4	15,0	71,3	72,2	84,2	84,2	84,2
	5	20,0	66,3	67,3	79,1	79,1	79,1
	6	25,0	61,8	62,6	73,0	73,0	73,0
	7	30,0	56,8	57,4	67,5	67,5	67,5
	8	35,0	51,8	52,5	62,2	62,2	62,2
	9	40,0	46,5	47,1	57,8	57,8	57,8
	10	45,0	41,0	42,5	55,1	55,1	55,1
	11	50,0	36,3	37,3	49,7	49,7	49,7
Argila B h=24 cm	4	15,0	74,0	74,3	84,8	82,3	82,3
	5	20,0	69,3	69,8	79,7	77,2	76,1
	6	25,0	64,0	64,5	75,1	72,4	71,3
	7	30,0	59,3	60,0	71,5	67,6	66,7
	8	35,0	54,0	54,0	67,4	63,4	62,7
	9	40,0	49,5	49,5	62,9	58,8	58,0
	10	45,0	44,3	44,8	59,3	55,1	53,1
	11	50,0	39,3	39,5	52,0	50,0	49,5
	12	55,0	34,0	34,8	48,1	45,3	44,6

Analisando a tabela 6.3 conjuntamente com as figuras 6.7 a 6.14, verifica-se que a configuração geométrica da amarra influencia no ângulo de incidência da carga no topo da estaca e depende diretamente da magnitude e da inclinação da carga de tração aplicada na

amarra. Verifica-se que para uma mesma posição de ensaio, um acréscimo de carga eleva o deslocamento (ou arrasto) da amarra no solo, reduzindo o ângulo de incidência no topo da estaca. A resultante da carga, em qualquer ponto, acompanha a inclinação da amarra, ou seja, a inclinação da força resultante aplicada em um determinado ponto da amarra é igual à inclinação da amarra neste ponto.

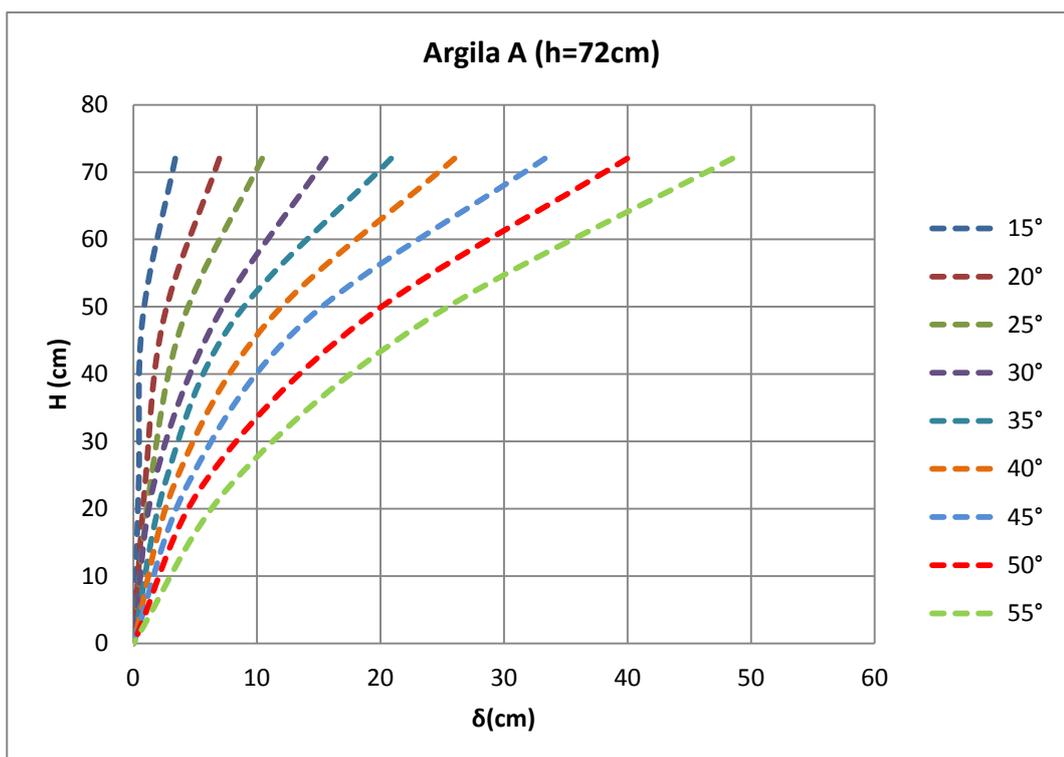


Figura 6.7: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila A com altura de solo de 72 cm, sem carregamento.

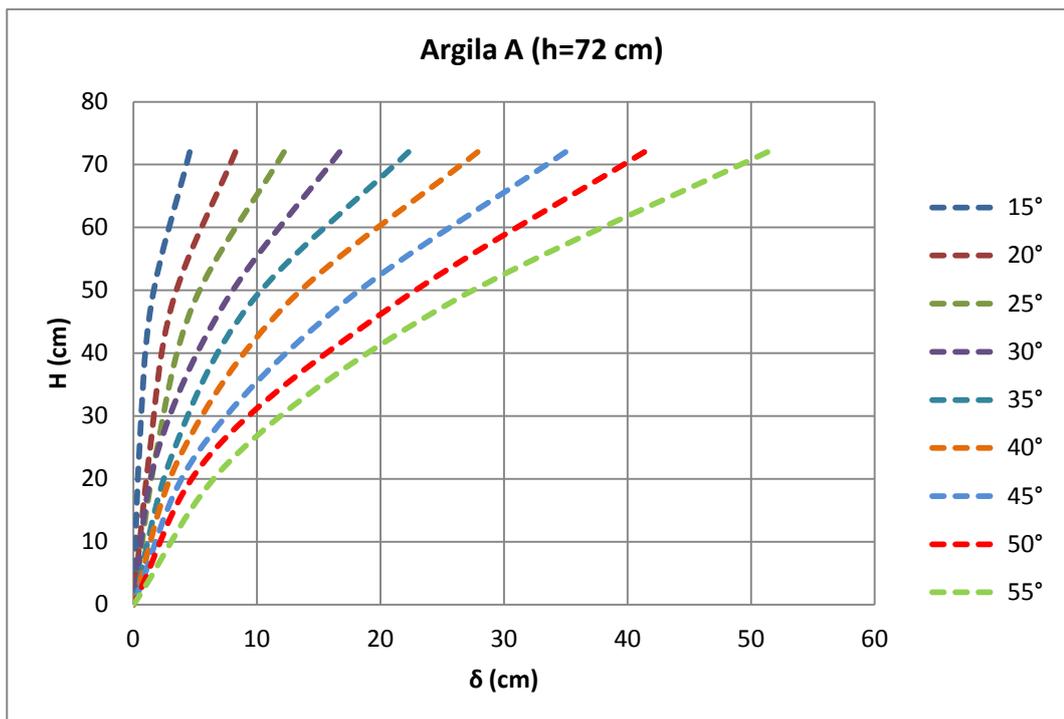


Figura 6.8: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila A com altura de solo de 72 cm, para carregamento de 10 kg.

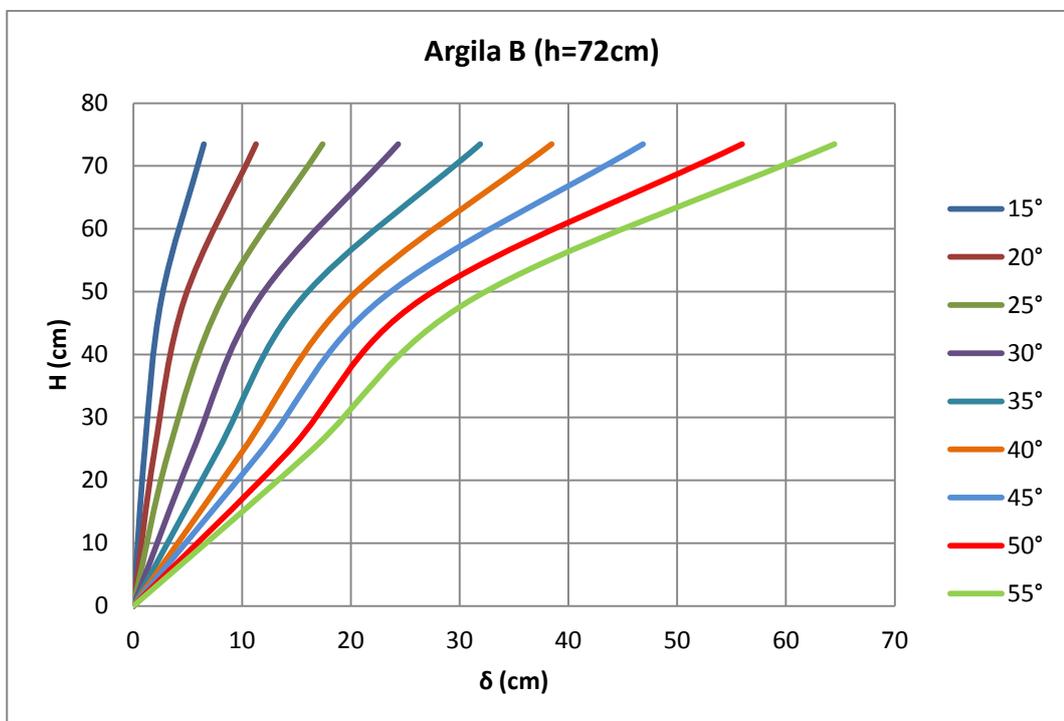


Figura 6.9: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 72 cm, sem carregamento.

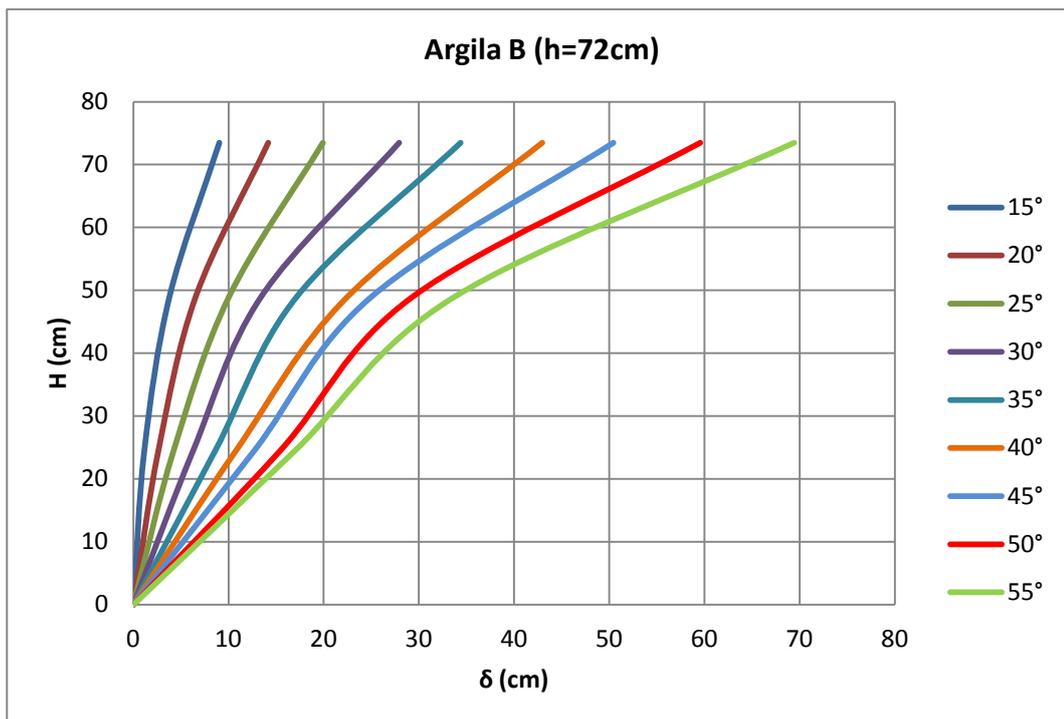


Figura 6.10: Configuração geométrica em catenária invertida da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 72 cm, para carregamento de 10 kg.

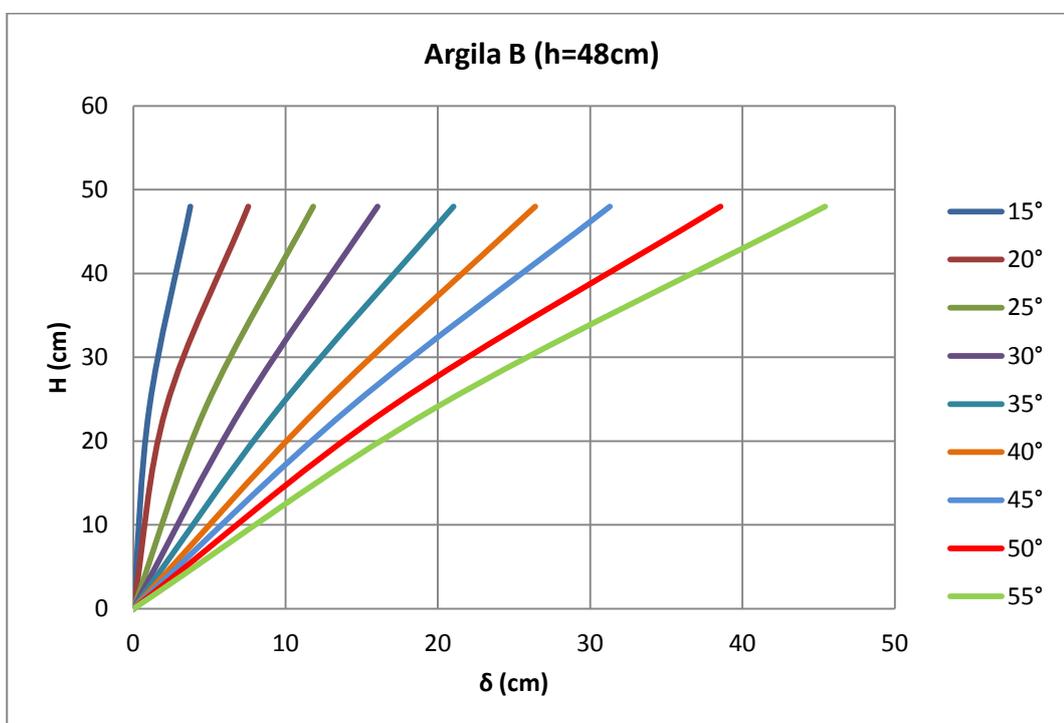


Figura 6.11: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 48 cm, sem carregamento.

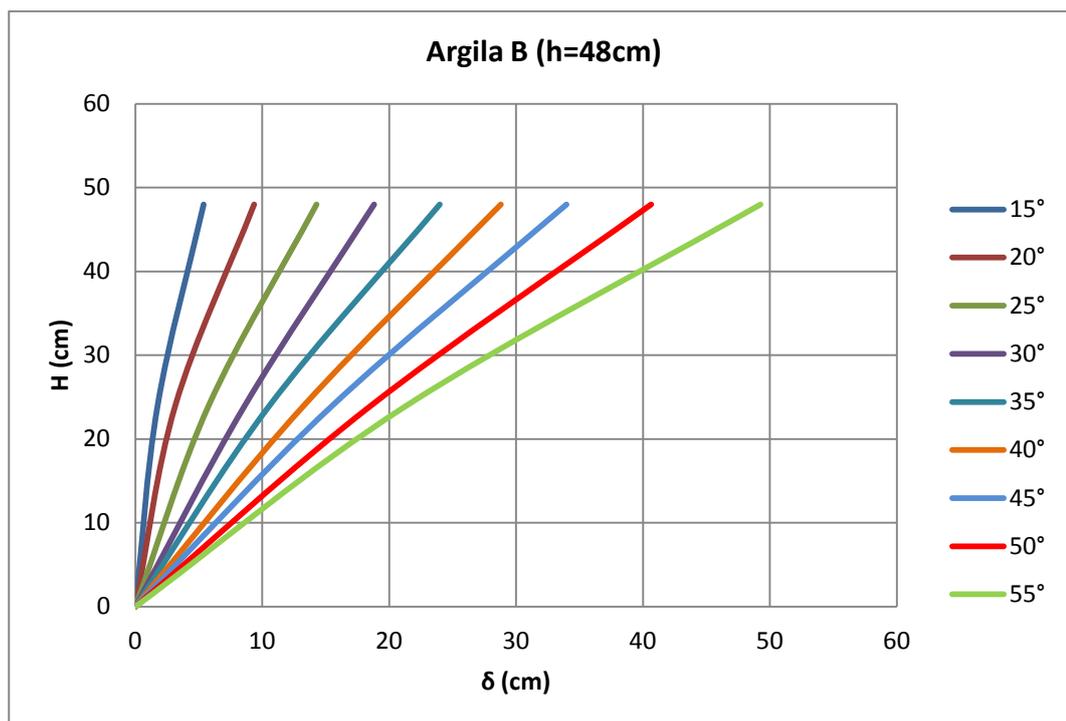


Figura 6.12: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 48 cm, para carregamento de 10 kg.

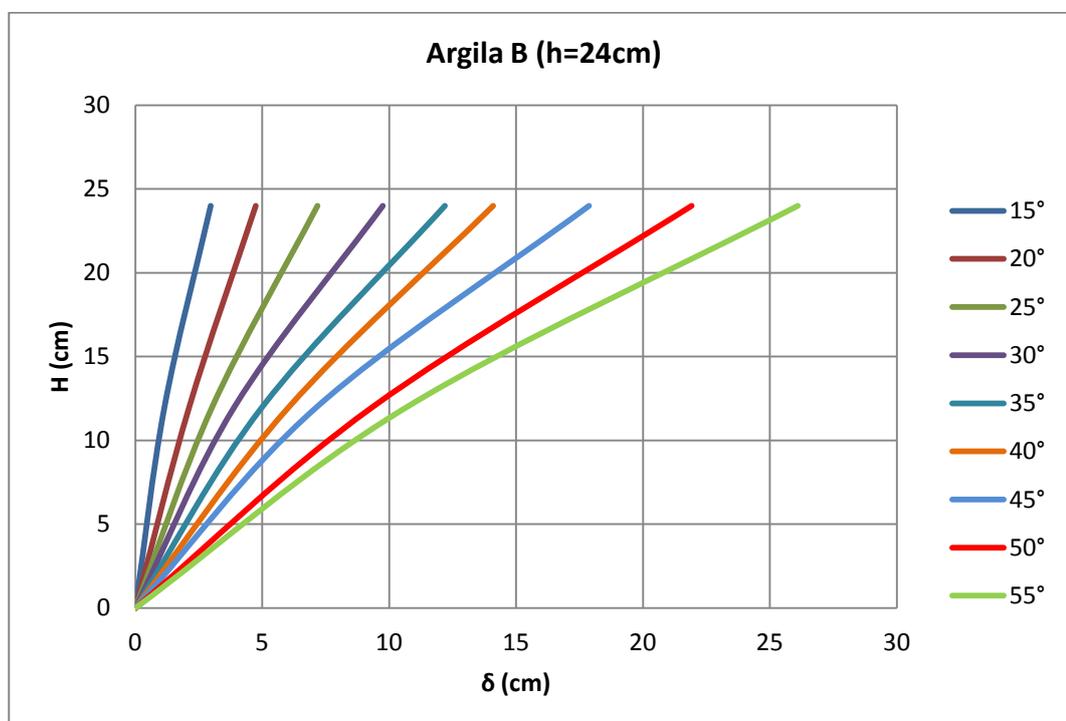


Figura 6.13: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 24 cm, sem carregamento.

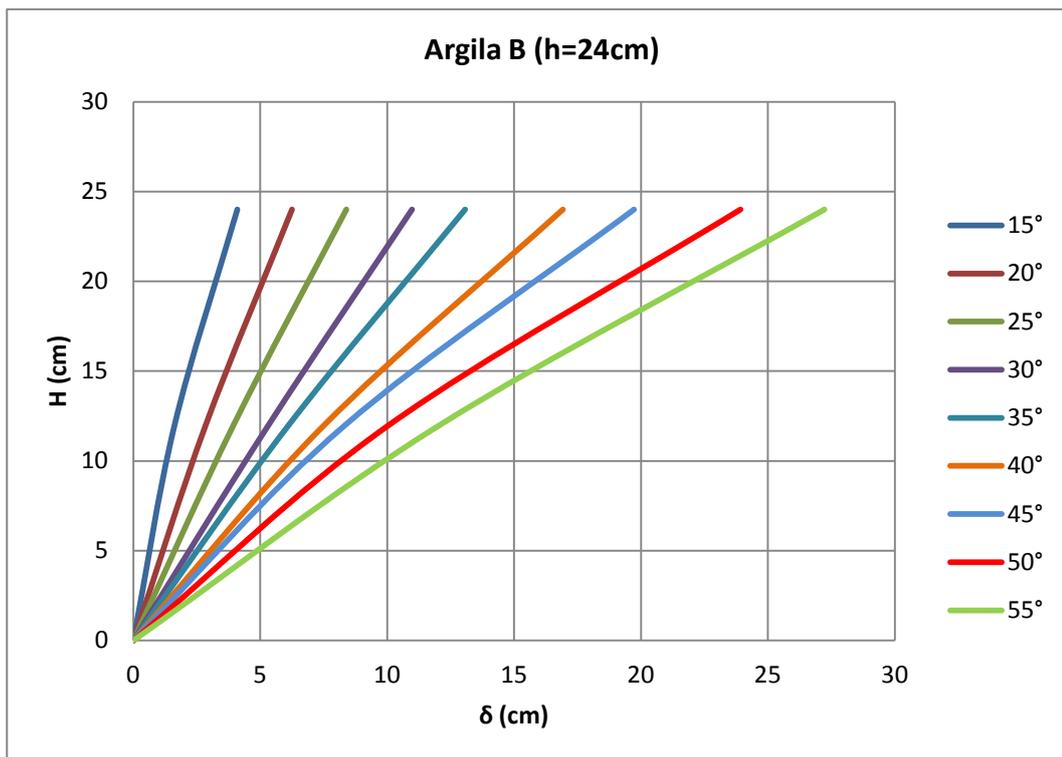


Figura 6.14: Configuração geométrica da linha de ancoragem inserida na argila B com altura de solo de 24 cm, para carregamento de 10 kg.

6.2.1 Comparação entre os resultados obtidos para diferentes carregamentos

As figuras 6.15 a 6.18 ilustram a configuração geométrica formada pela amarra para sucessivos níveis de carregamento. Para facilitar a visualização optou-se por mostrar os resultados de apenas três posições de ensaios referentes aos ângulos nominais de 15°, 45° e 55° e para a amarra submetida a três carregamentos (0, 10 kg e 14 kg). Observa-se que para uma mesma inclinação de carregamento, o deslocamento da amarra em função do acréscimo de carga foi inferior na argila A devido a maior resistência ao cisalhamento medida. Em todas as condições de ensaio percebe-se que, quanto maior a carga maior o deslocamento imposto à amarra e quanto maior a inclinação da força aplicada, com relação à vertical, maior a mobilização do solo e arrasto da amarra.

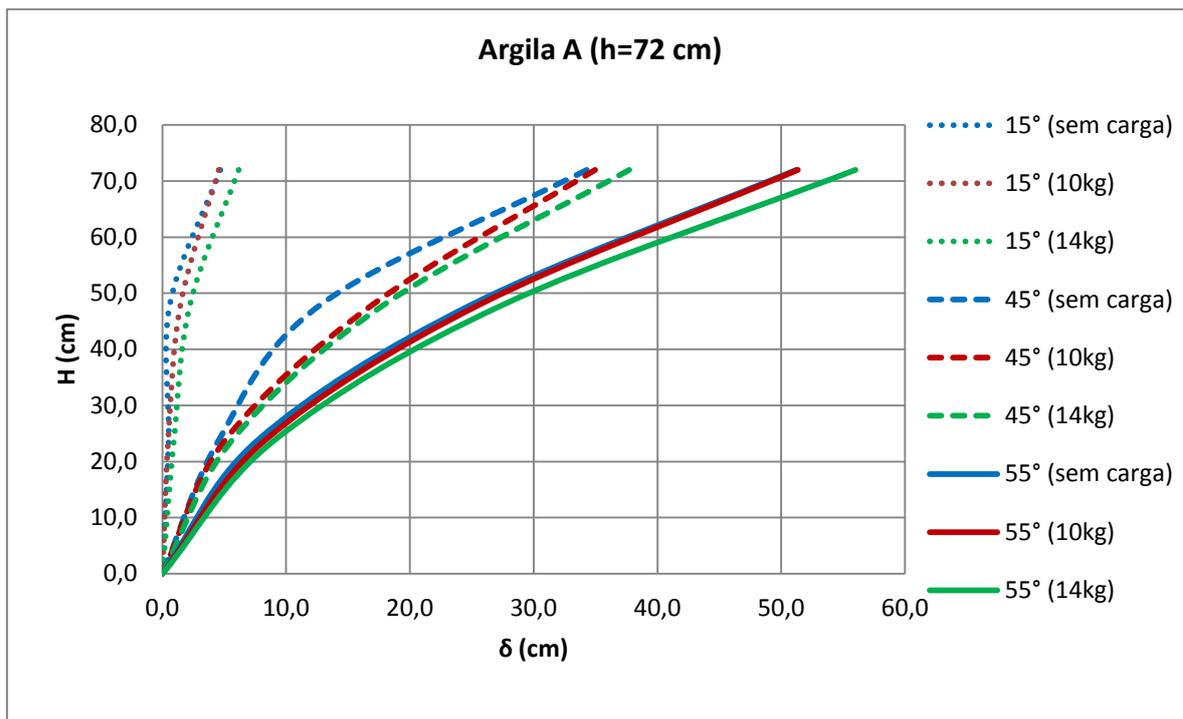


Figura 6.15: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios sob diferentes carregamentos e posições na argila A.

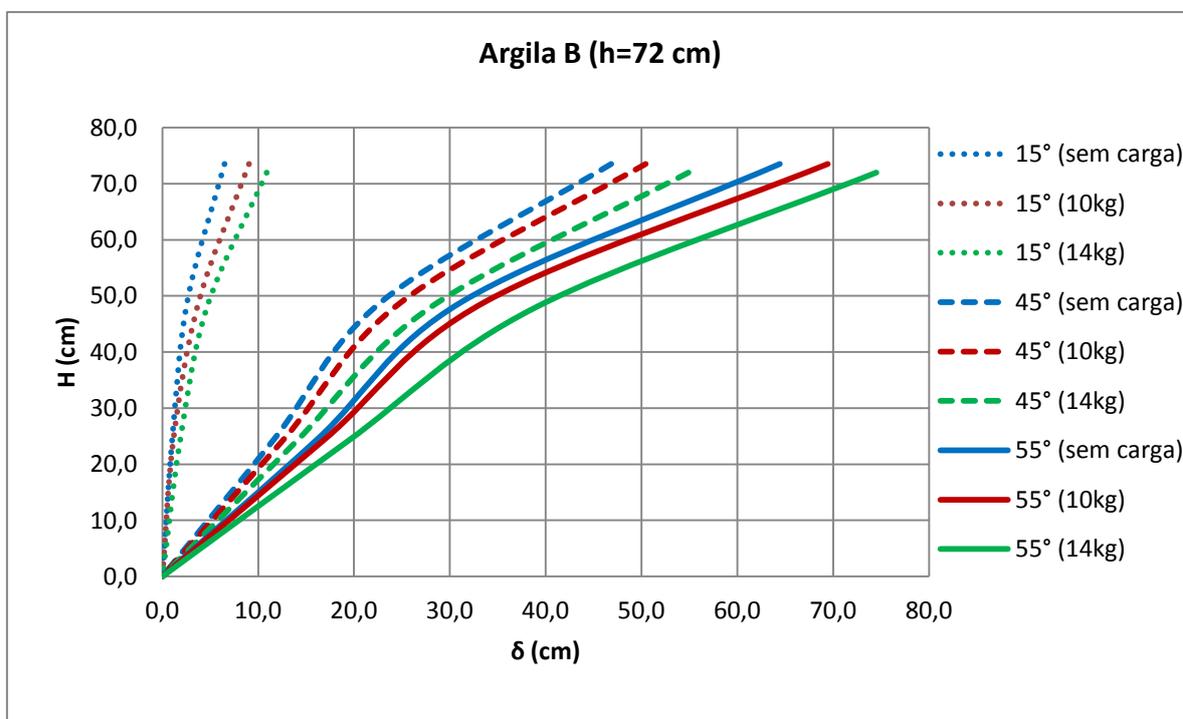


Figura 6.16: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios sob diferentes carregamentos e posições na argila B, com 72 cm de altura de solo.

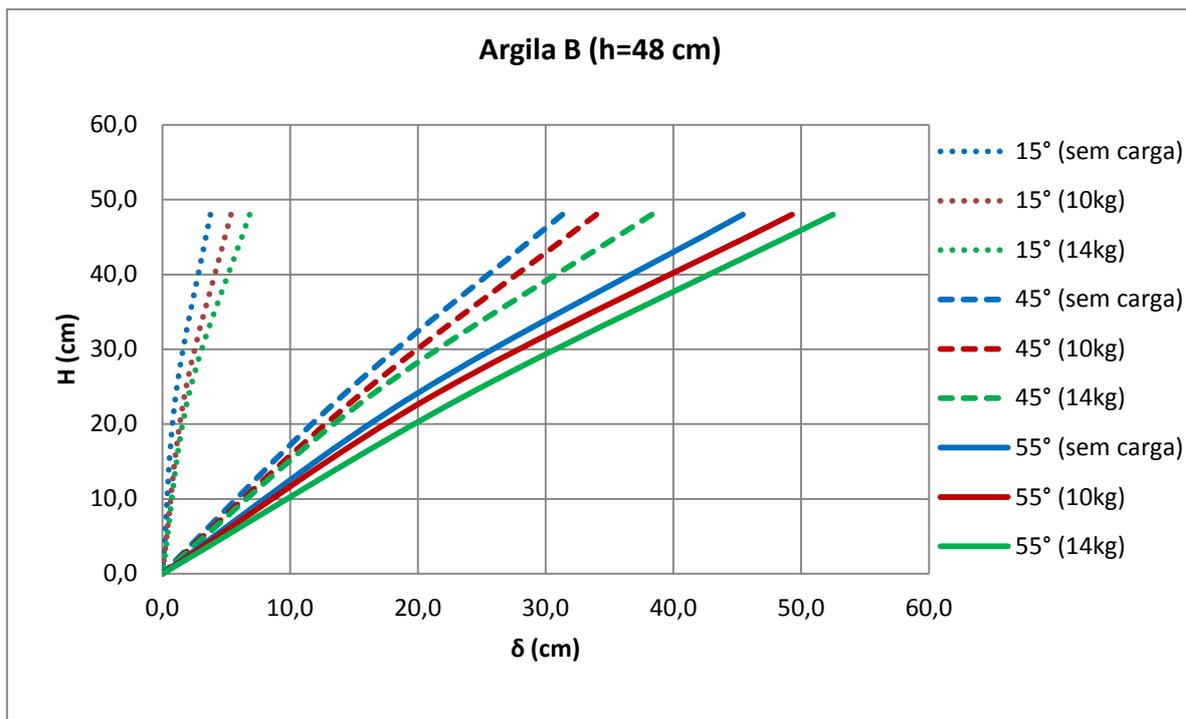


Figura 6.17: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios sob diferentes carregamentos e posições na argila B, com 48 cm de altura de solo.

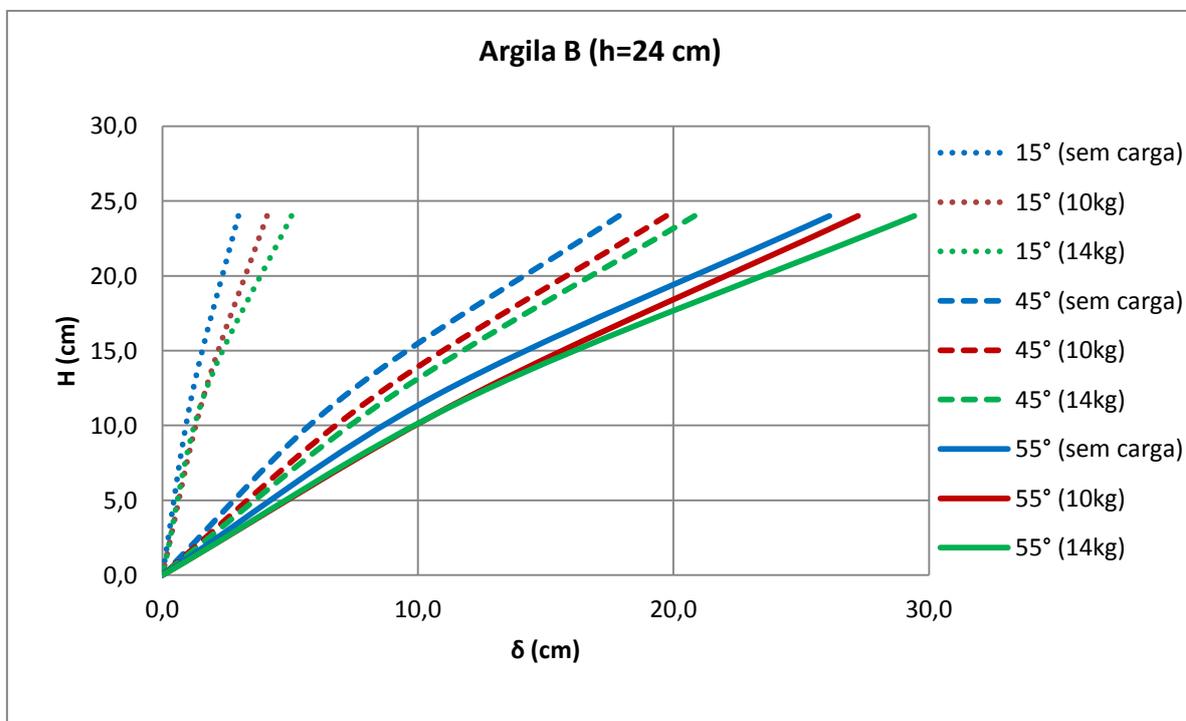


Figura 6.18: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios sob diferentes carregamentos e posições na argila B, com 24 cm de altura de solo.

6.3 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

A comparação entre o modelo e protótipo permite a avaliação de possíveis distorções atribuídas a efeitos de escala, que é de fundamental importância nesta pesquisa. As grandezas referentes ao protótipo foram fornecidas pelo programa DIGIN.

Buscou-se simular no DIGIN, os parâmetros do solo obtidos nos ensaios de mini palheta. Conforme apresentado no item 5.6, o ganho de resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) com a profundidade obtido pelo ensaio de mini palheta foi de $2,47z + 0,88$ para a argila A e $0,3z + 0,41$ para a argila B.

Nas figuras 6.19 a 6.22 são apresentadas as configurações geométricas assumidas pela amarra submetida ao carregamento máximo de 14kg, nas posições de ensaio que se aproximam das soluções apresentadas pelo DIGIN para diferentes S_u . É importante destacar que o S_u de campo ($S_u=1,4z$) também foi utilizado nas análises.

Apesar das limitações de uso do programa numérico às condições geométricas da câmara de ensaio, as simulações são em geral compatíveis com as medidas experimentais. Como a resistência ao cisalhamento da argila A é superior aos valores de campo, os valores de deslocamento da amarra no trecho enterrado são inferiores aos valores previstos numericamente, conforme observado na figura 6.19.

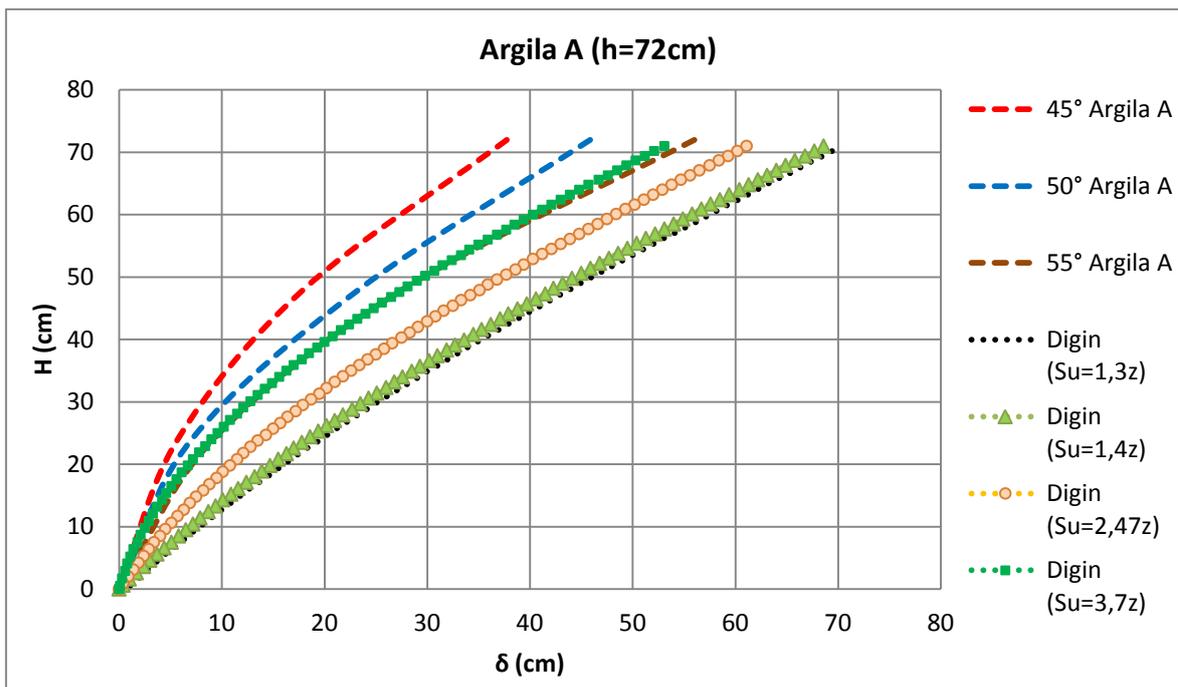


Figura 6.19: Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente na argila A e os resultados gerados pelo DIGIN.

Na figura 6.20 nota-se que a configuração geométrica referente ao ângulo nominal de 55° da amarra imersa na argila B com altura de solo de 72 cm, se aproxima da catenária prevista pelo DIGIN para o S_u de campo compatível com valores medidos em laboratório. Comportamento semelhante ao observado nas figuras 6.21 e 6.22, que apresentam os resultados obtidos na argila B para altura de solo de 48 cm e 24 cm, respectivamente. Portanto, para confrontação entre os resultados dos ensaios experimentais em escala reduzida e os resultados previstos para o protótipo, utilizou-se os resultados obtidos para o ângulo nominal de 55° para todas as condições de ensaio.

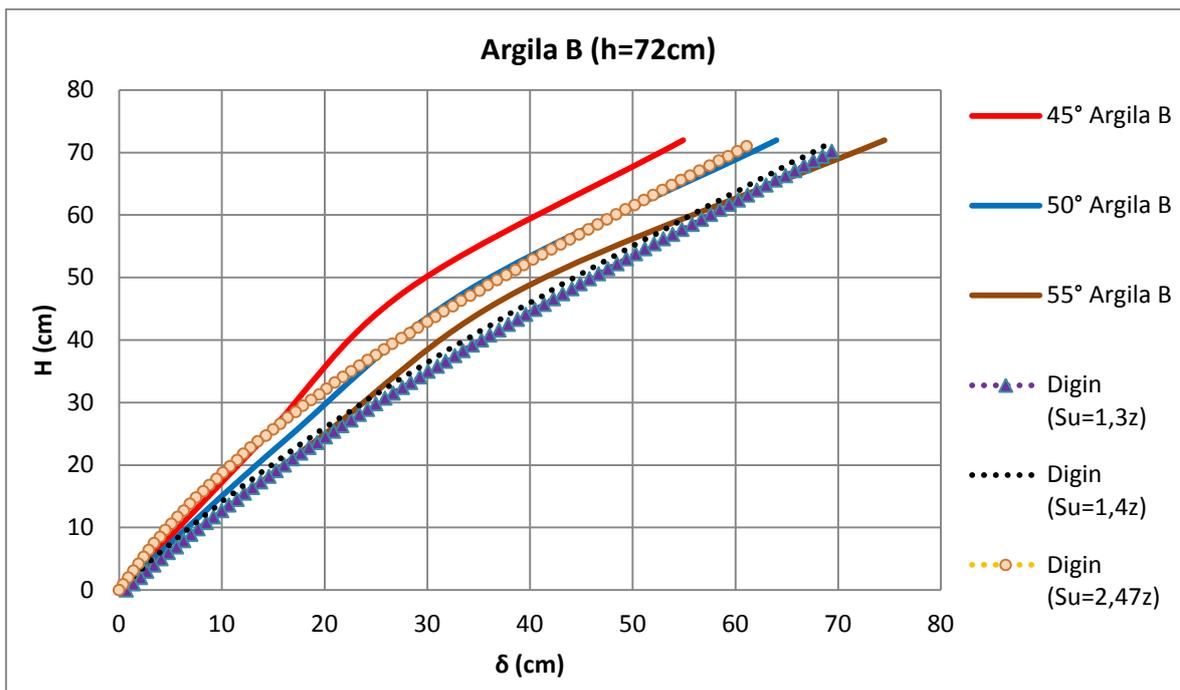


Figura 6.20: Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente na argila B com altura de solo de 72 cm e os resultados gerados pelo DIGIN.

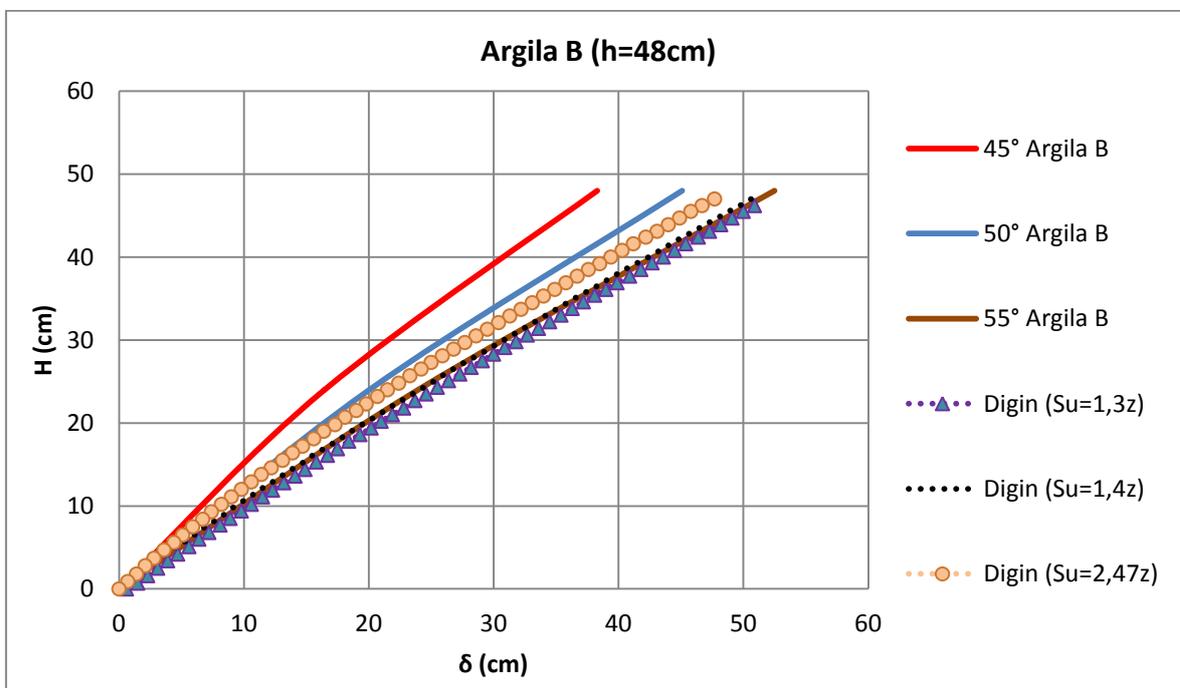


Figura 6.21: Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente na argila B com altura 48 cm e os resultados gerados pelo DIGIN.

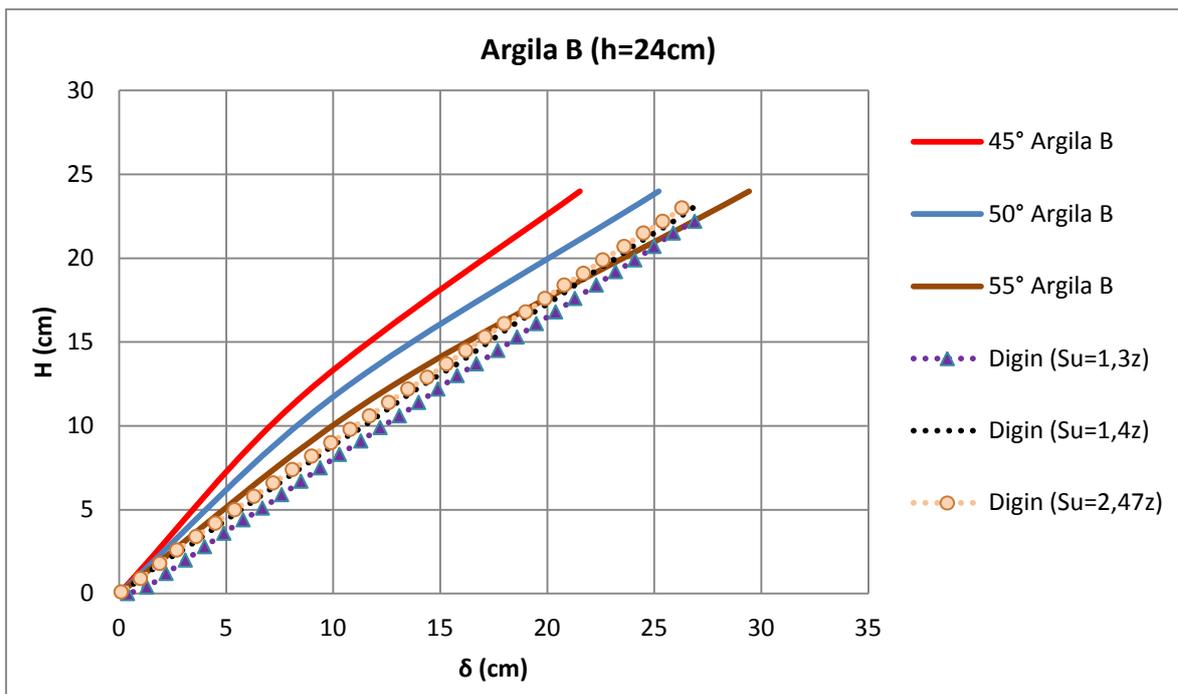


Figura 6.22: Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente na argila B com altura 24 cm e os resultados gerados pelo DIGIN.

As tabelas 6.4 a 6.6 apresentam resumidamente as grandezas referentes ao protótipo fornecidas pelo programa DIGIN e os resultados referentes ao carregamento máximo de 14 kg obtidos experimentalmente. Para comparação optou-se transpor os resultados do modelo reduzido para o protótipo. Na tabela 6.4 são comparados os resultados obtidos nos ensaios realizados nas argilas A e B com altura de solo de 72 cm, correspondente à 28,8 m na escala real. Observa-se que argila B reproduz as condições de campo e portanto se ajusta às simulações realizadas no DIGIN. A argila A é um material de maior resistência que pode ser útil na identificação de padrões de comportamento em condições nas quais a resistência ao cisalhamento não drenada condiciona as medidas *in situ*.

Tabela 6.4: Comparação entre resultados fornecidos pelo DIGIN e os resultados obtidos experimentalmente nas argilas A e B com altura de solo de 72 cm.

Grandezas	DIGIN	Resultados experimentais escala do protótipo	
	Protótipo	Argila A	Argila B
Carregamento máximo (kN)	8789,00	8789,76	8789,76
Carga estaca torpedo (kN)	8727,00	6964,48	7892,48
Atenuação (%)	0,71	20,77	10,21
Altura de solo (m)	28,80	28,80	28,80
L embutido (m)	43,00	35,88	41,89
Ângulo de inclinação leito (°)	34,90	23,00	27,10
Ângulo de inclinação estaca (°)	53,40	69,10	51,30

Nas tabelas 6.5 e 6.6 são apresentados, respectivamente, os resultados obtidos nos ensaios realizados na argila B com altura de solo de 48 cm, correspondente à 19,20 m na escala real e altura de solo de 24 cm, correspondente à 9,60 m na escala real.

Tabela 6.5: Comparação entre resultados fornecidos pelo DIGIN e os resultados obtidos experimentalmente na argila B com altura de solo de 48 cm.

Grandezas	DIGIN	Resultados experimentais: escala do protótipo
	Protótipo	
Carregamento máximo (kN)	8789,00	8789,76
Carga estaca torpedo (kN)	8748,00	8261,76
Atenuação (%)	0,47	6,01
Altura de solo (m)	19,20	19,20
L embutido (m)	30,00	28,38
Ângulo de inclinação leito (°)	34,50	32,30
Ângulo de inclinação estaca (°)	43,60	45,10

Tabela 6.6: Comparação entre resultados fornecidos pelo DIGIN e os resultados obtidos experimentalmente na argila B com altura de solo de 24 cm.

Grandezas	DIGIN	Resultados experimentais: escala do protótipo
	Protótipo	
Carregamento máximo (kN)	8789,00	8789,76
Carga estaca torpedo (kN)	8769,00	9076,31
Atenuação (%)	0,23	-3,26
Altura de solo (m)	9,60	9,60
L embutido (m)	15,00	15,07
Ângulo de inclinação leito (°)	34,10	34,8
Ângulo de inclinação estaca (°)	36,60	44,6

No que se refere à geometria da amarra no trecho imerso em solo as comparações são satisfatórias. Observou-se que as catenárias do modelo reduzido são menos pronunciadas justamente devido à maior resistência do solo junto à superfície. Já no que se refere à atenuação de cargas o programa DIGIN é conservador, visto que a carga aplicada no leito marinho (TDP) e a carga transmitida à estaca são praticamente as mesmas. A atenuação de carga obtida nos ensaios para a carga máxima aplicada e última posição de ensaio, foi de 20,77% na argila A e 10,21% na argila B, sendo ambas medidas para uma altura de solo de 72 cm. A atenuação na argila B para altura de solo de 48 cm foi de 6,01%, já na altura de 24 cm não houve atenuação sendo toda carga aplicada transmitida para a célula de carga. Observou-se inclusive que a carga medida foi superior à carga aplicada, indicando a existência de carga residual, proveniente de estágios de carregamento/ descarregamento de ensaios em posições anteriores.

7 ENSAIOS DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de tração na amarra para diferentes ângulos de incidência, em estágios de carga e descarga. Os ensaios de carregamento estático foram realizados com o objetivo de estudar o comportamento do trecho enterrado da linha de ancoragem de modo a fornecer subsídios para quantificar a atenuação dos esforços de tração devido à mobilização da força de atrito decorrente da interação entre o solo e a linha de ancoragem. Durante os ensaios foram registrados, por meio de um detector de materiais, a configuração geométrica da linha de ancoragem em decorrência dos carregamentos impostos.

7.1 TRANSFERÊNCIA DE CARGA

Os resultados dos ensaios de carregamento estáticos são aqui representados, nas seguintes condições impostas:

Tabela 7.1: Ensaios realizados.

CONDIÇÃO DE ENSAIO		
ARGILA	ALTURA DE SOLO (cm)	ENSAIO
A	72	A1
		A2
		A3
B	72	B1
		B2
		B3
		B4
B	48	B6
		B7
		B8
		B9
B	24	B10
		B11
		B12
		B13

7.1.1 Forças transmitidas

As figuras 7.1 a 7.4 apresentam os gráficos das componentes horizontais e verticais das forças medidas pela célula de carga em cada posição de ensaio referenciada pelo respectivo ângulo nominal.

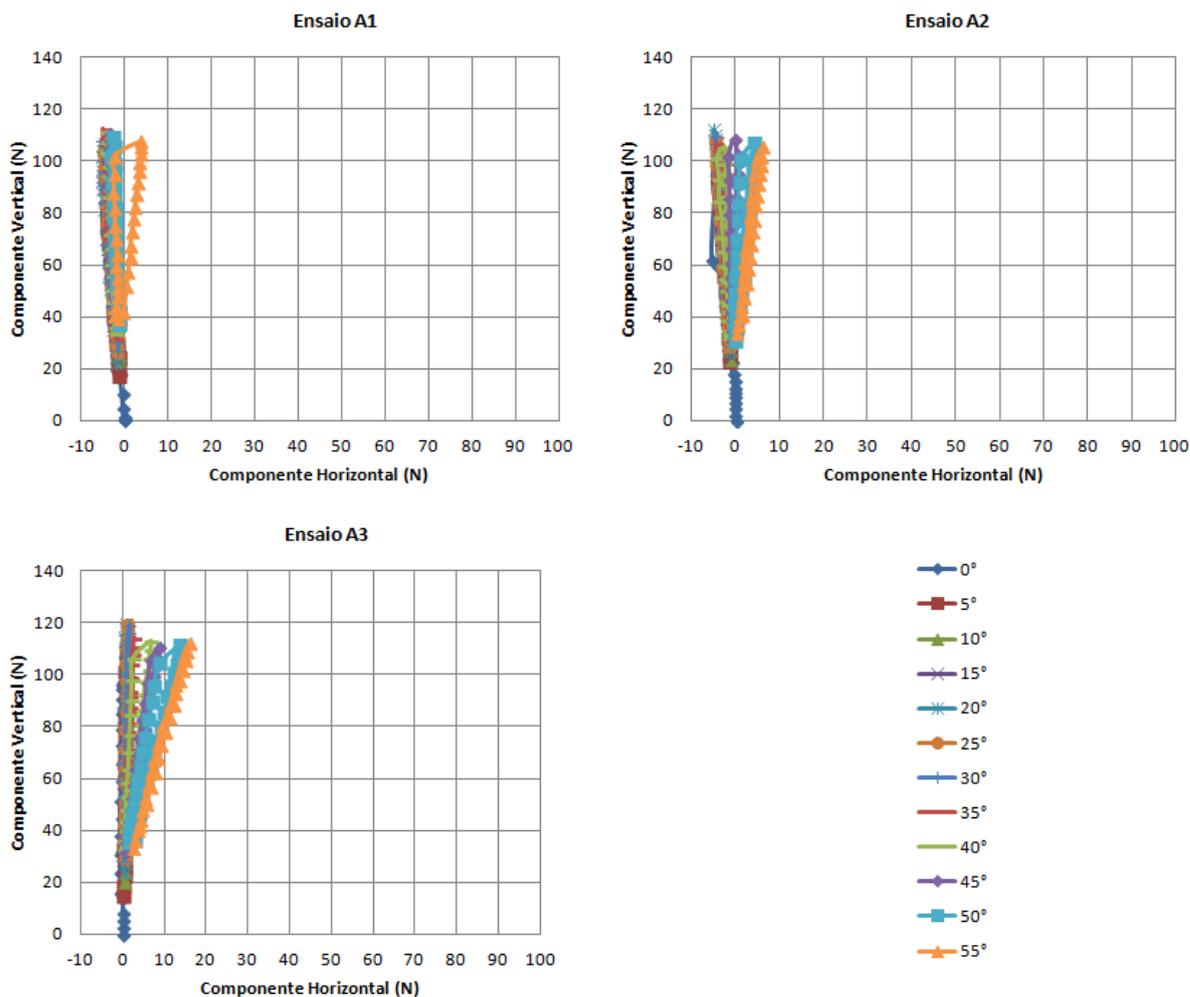


Figura 7.1: Componente horizontal *versus* componente vertical das forças medidas nos ensaios realizados na argila A com altura de solo de 72 cm.

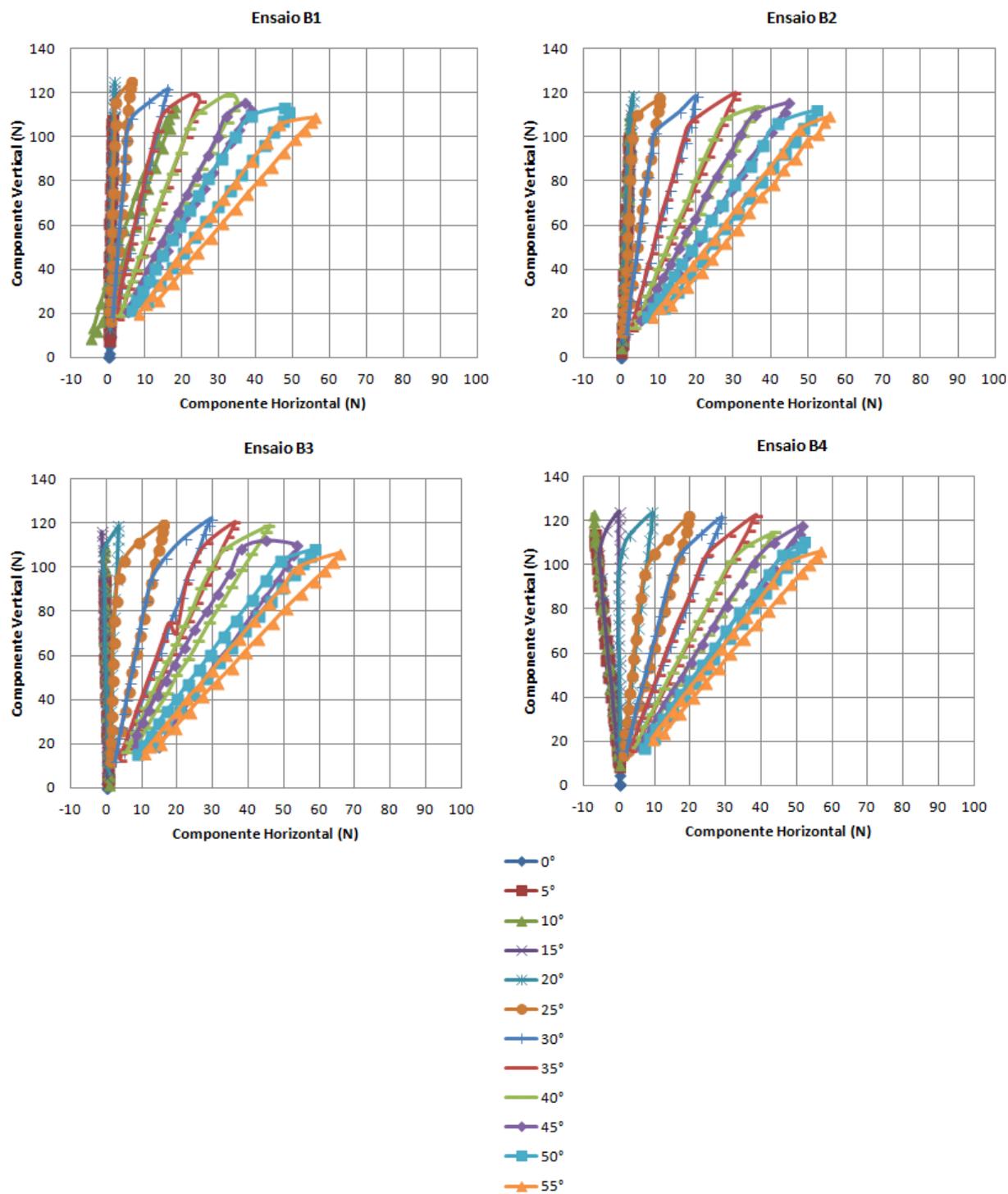


Figura 7.2: Componente horizontal *versus* componente vertical das forças medidas nos ensaios realizados na argila B com altura de solo de 72 cm.

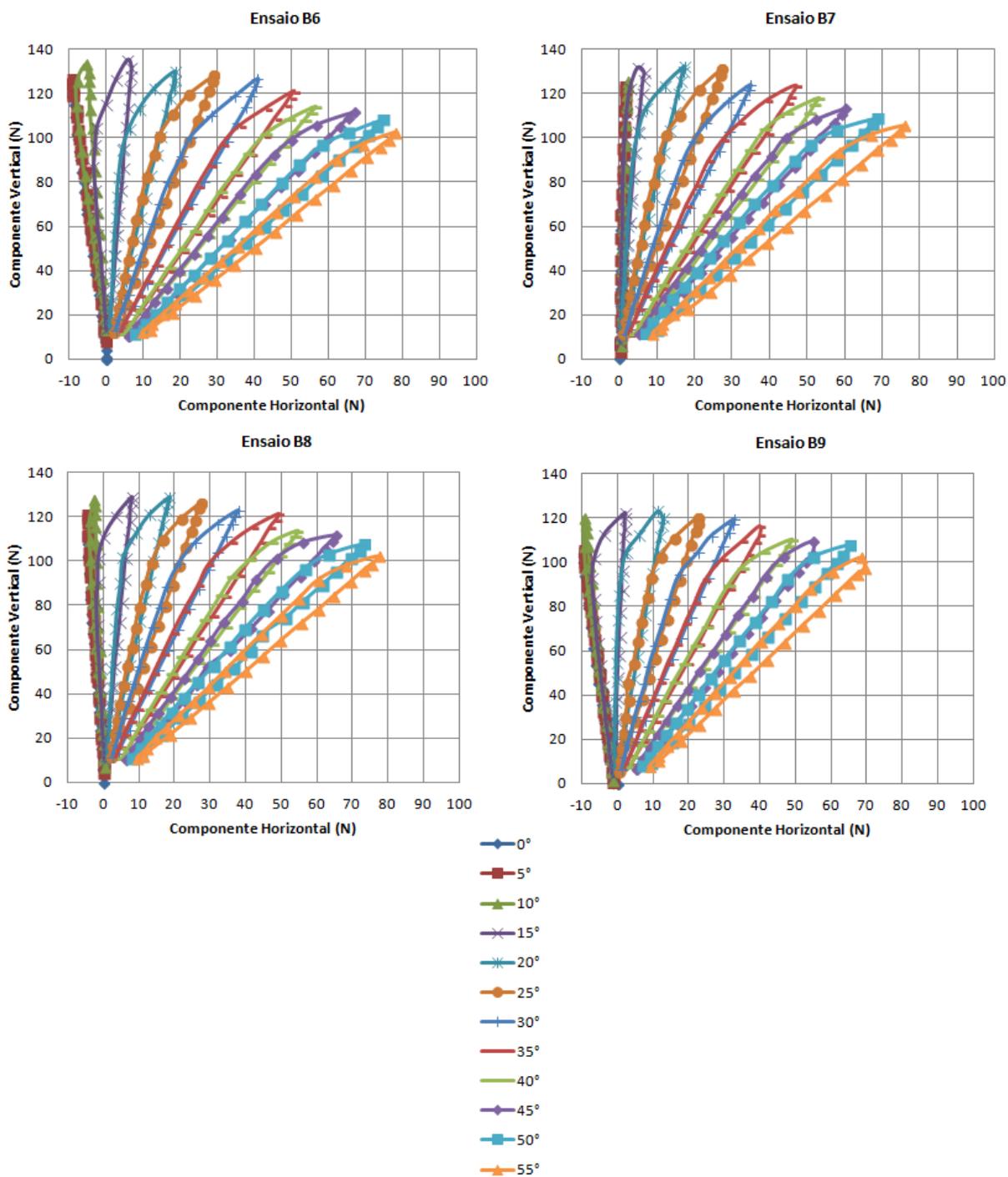


Figura 7.3: Componente horizontal *versus* componente vertical das forças medidas nos ensaios realizados na argila B com altura de solo de 48 cm.

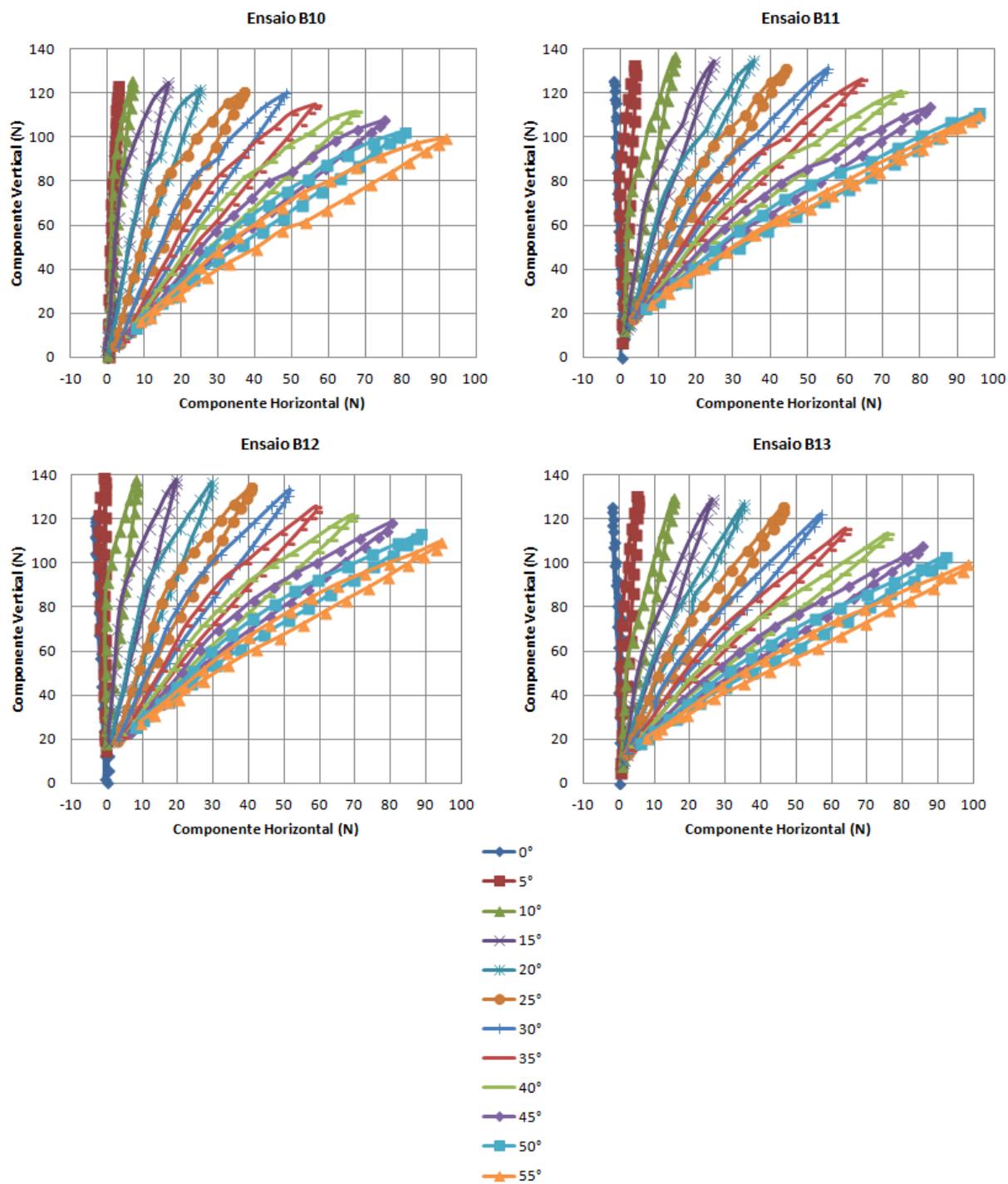


Figura 7.4: Componente horizontal *versus* componente vertical das forças medidas nos ensaios realizados na argila B com altura de solo de 24 cm.

7.1.2 Forças transmitidas *versus* forças aplicadas

Nas figuras 7.5 a 7.8 são expostos os resultados obtidos nos estágios de carregamento e descarregamento em cada ensaio separadamente. Por fim, a figura 7.9 apresenta os resultados referentes às leituras na célula de carga relacionando-as com as respectivas cargas aplicadas em cada argila e altura de solo, objetivando-se com isto demonstrar a repetibilidade dos ensaios, que de forma geral, apresentam um padrão definido, exibindo curvas sobrepostas, com pouca dispersão.

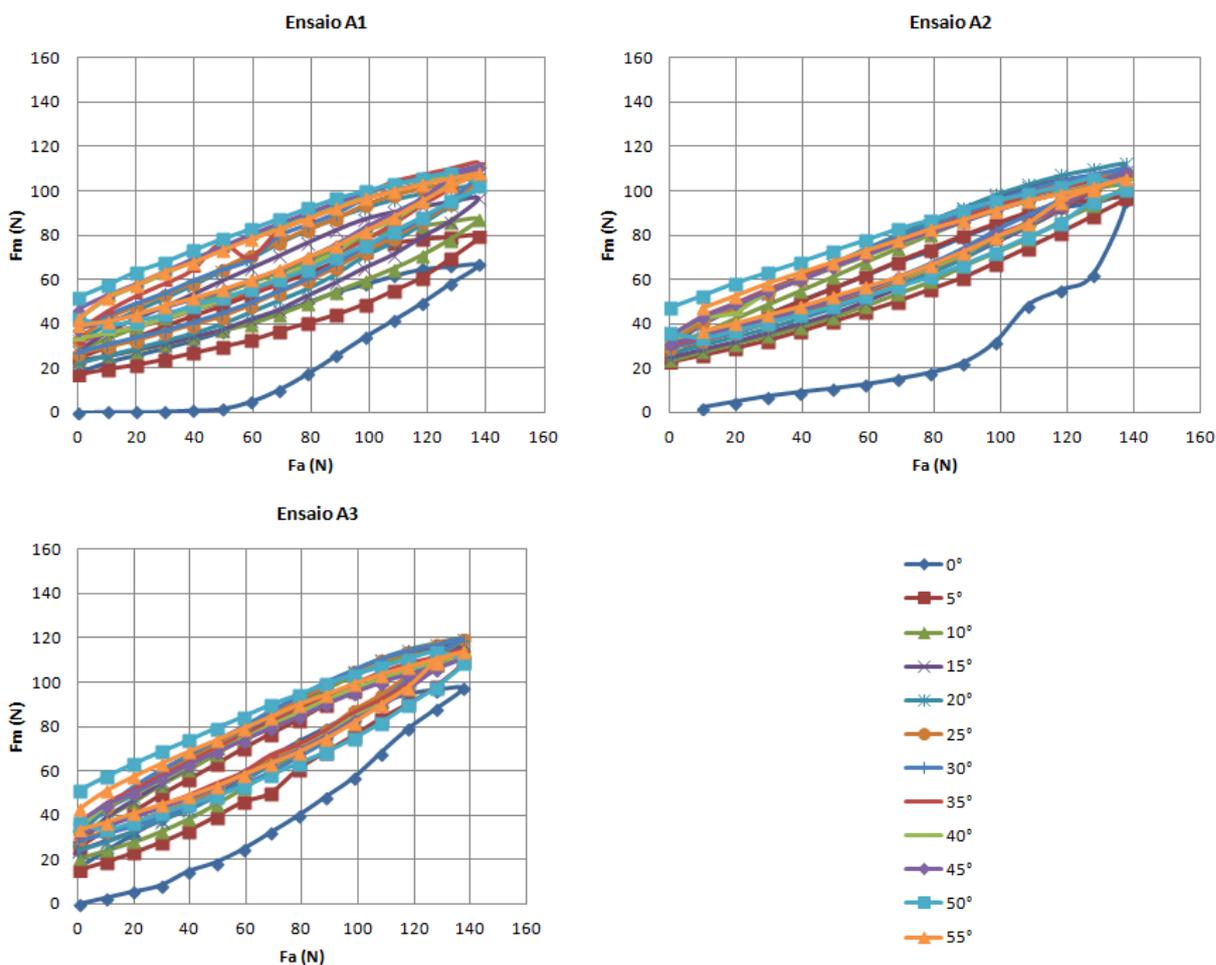


Figura 7.5: Carga aplicada (F_a) *versus* carga medida (F_m) em cada ensaio realizado na Argila A, com altura de solo de 72 cm.

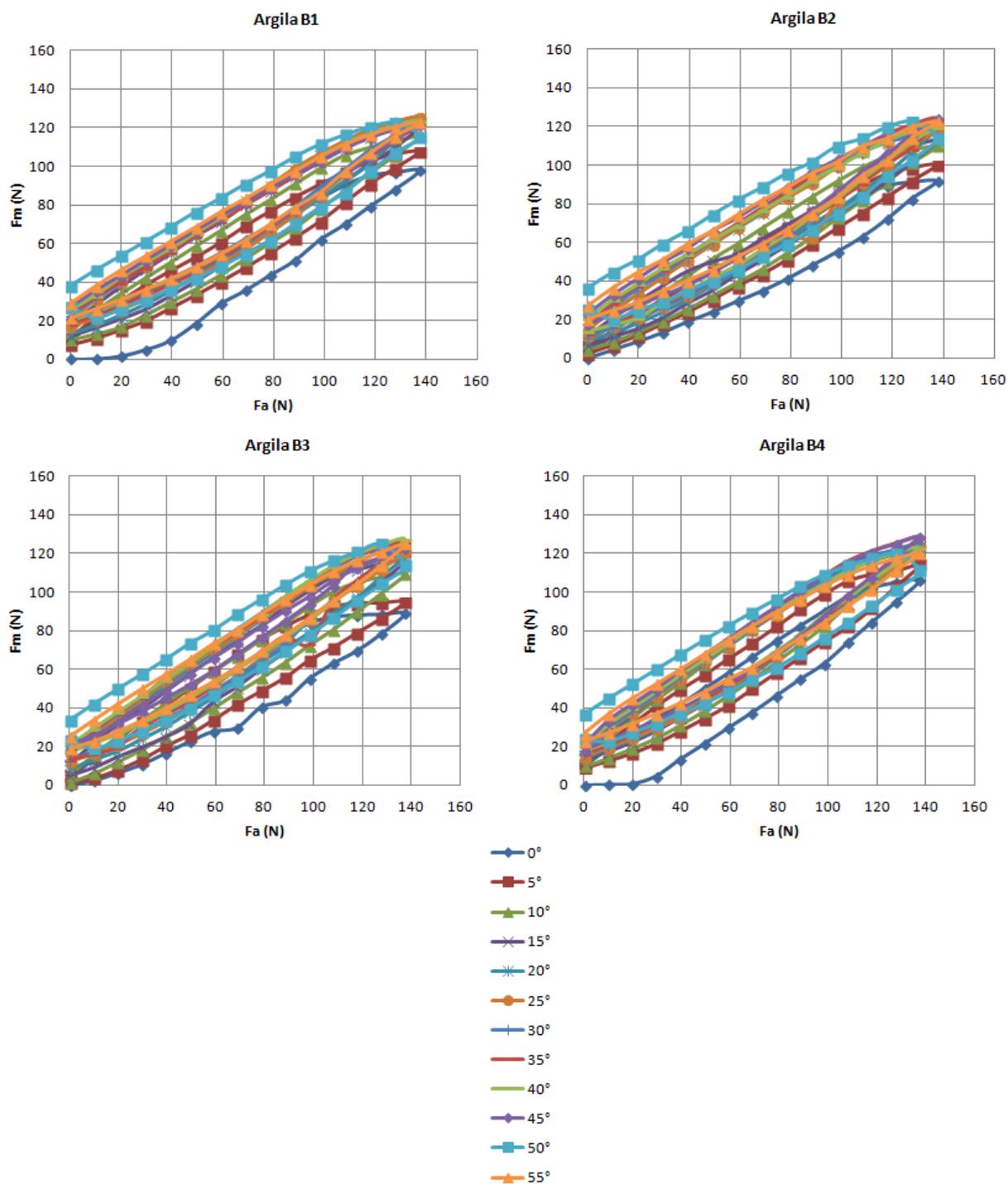


Figura 7.6: Carga aplicada (F_a) versus carga medida (F_m) em cada ensaio realizado na Argila B com altura de solo de 72 cm.

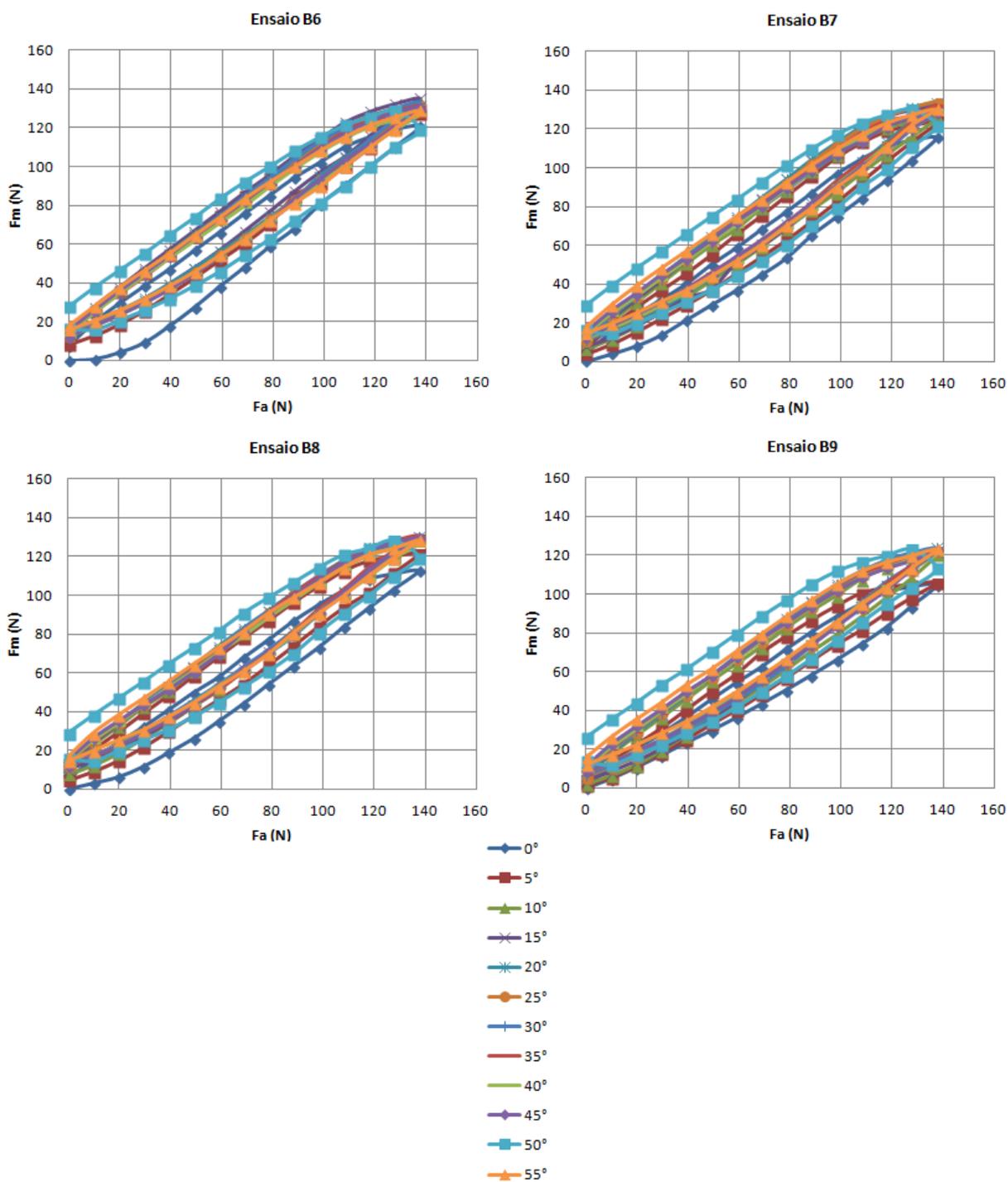


Figura 7.7: Carga aplicada (F_a) versus carga medida (F_m) em cada ensaio realizado na Argila B com altura de solo de 48 cm.

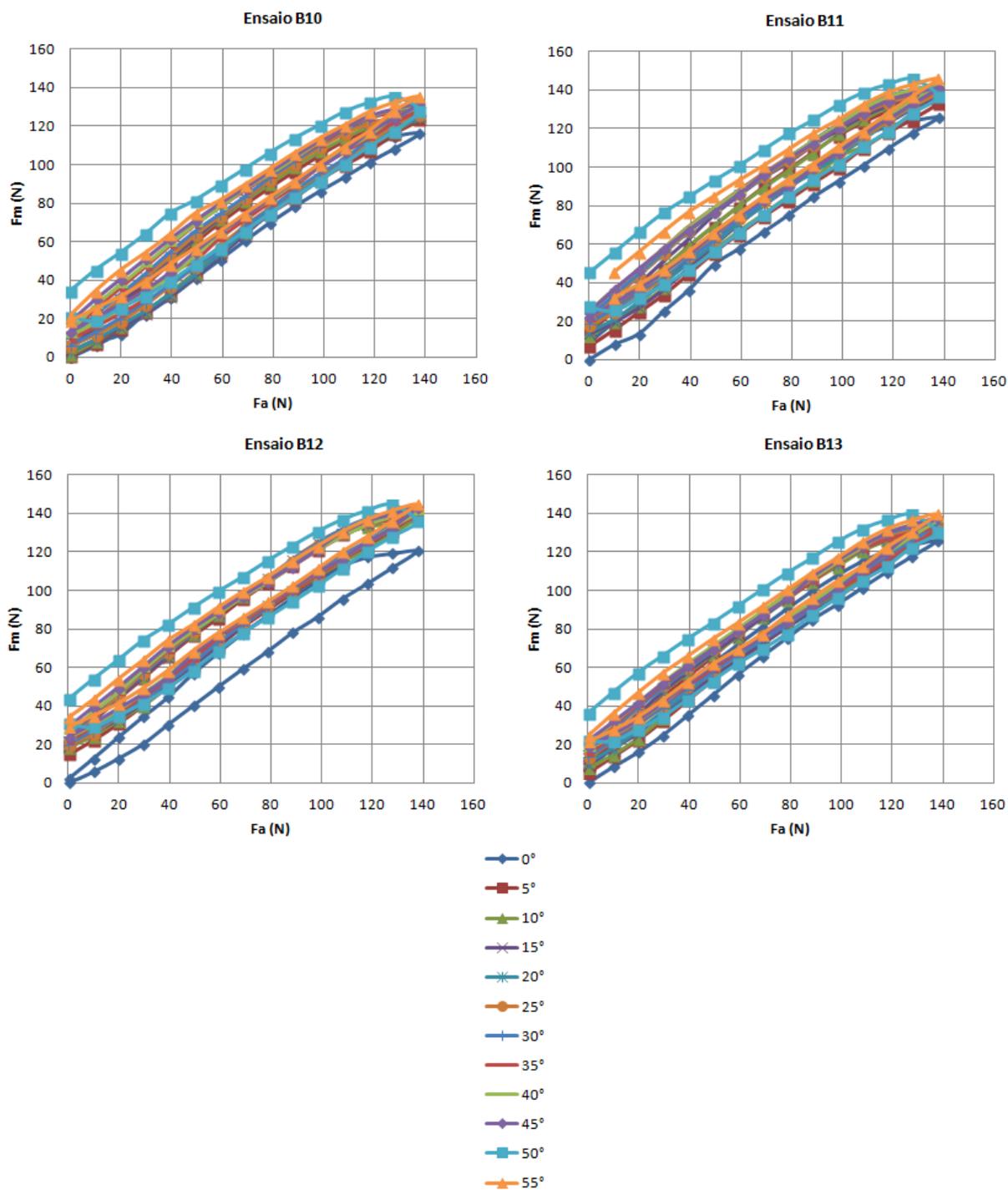


Figura 7.8: Carga aplicada (F_a) versus carga medida (F_m) em cada ensaio realizado na Argila B com altura de solo de 24 cm.

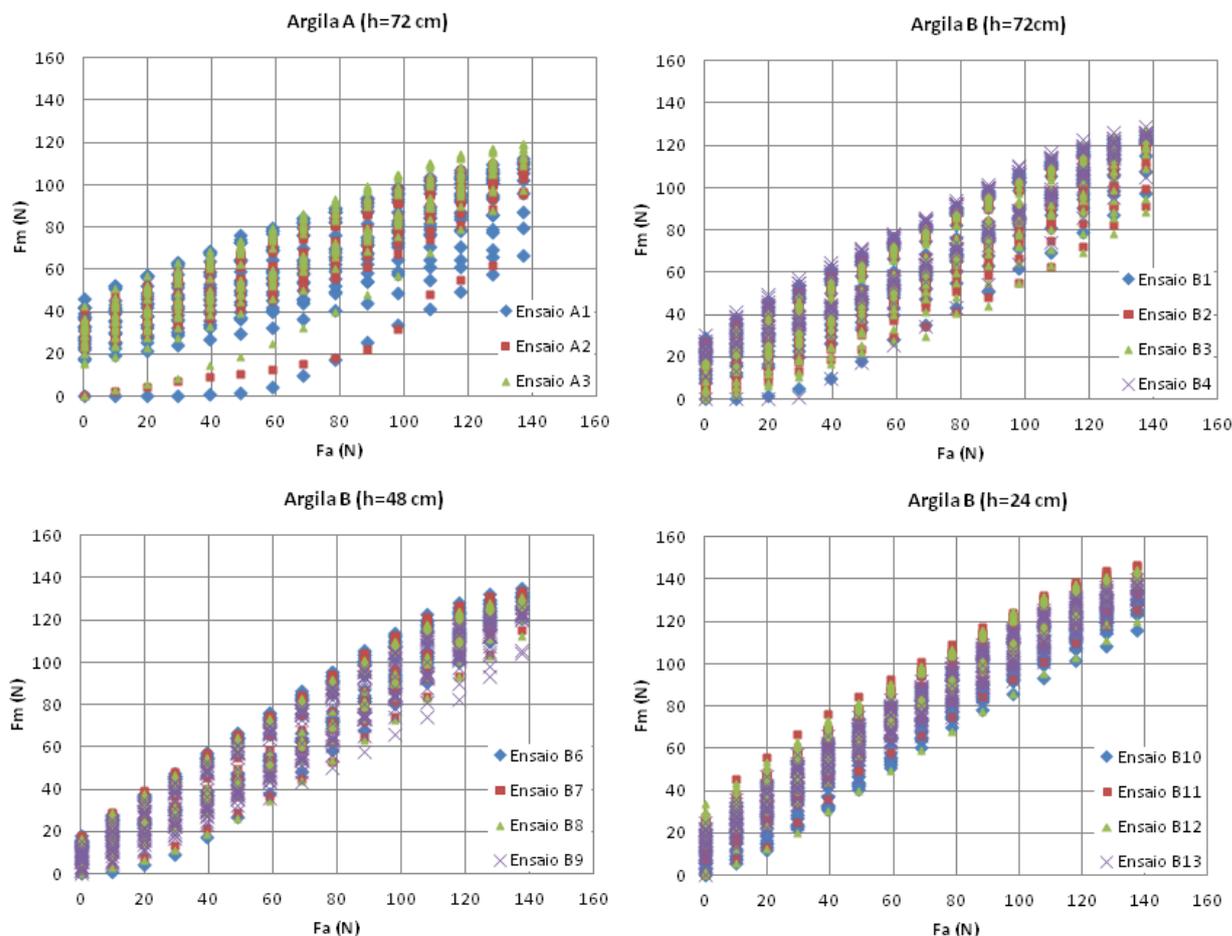


Figura 7.9: Comparação entre carga aplicada (F_a) *versus* carga medida (F_m) em cada condição de ensaio.

7.1.3 Resultados de ciclos de carga e descarga

Todos os resultados mostrados anteriormente foram obtidos por meio de um ciclo de carga/descarga em cada posição. Com o objetivo de avaliar o comportamento do solo quando submetido a vários ciclos de carga/descarga em uma mesma posição, foram realizados ensaios de carregamento cíclico na posição inicial de ensaio, correspondente ao ângulo nominal de 0° e na posição final, que corresponde ao ângulo nominal de 55° . Todos os ciclos em uma mesma posição foram executados em sequência, para evitar o ganho de resistência da argila com o tempo. Tais ensaios foram realizados com a amarra inserida na argila A com altura de solo de 72 cm e na Argila B com altura de solo de 24 cm.

Na figura 7.10 são apresentados os resultados obtidos para a argila A, na primeira posição de ensaio, cujo ângulo nominal é de 0° .

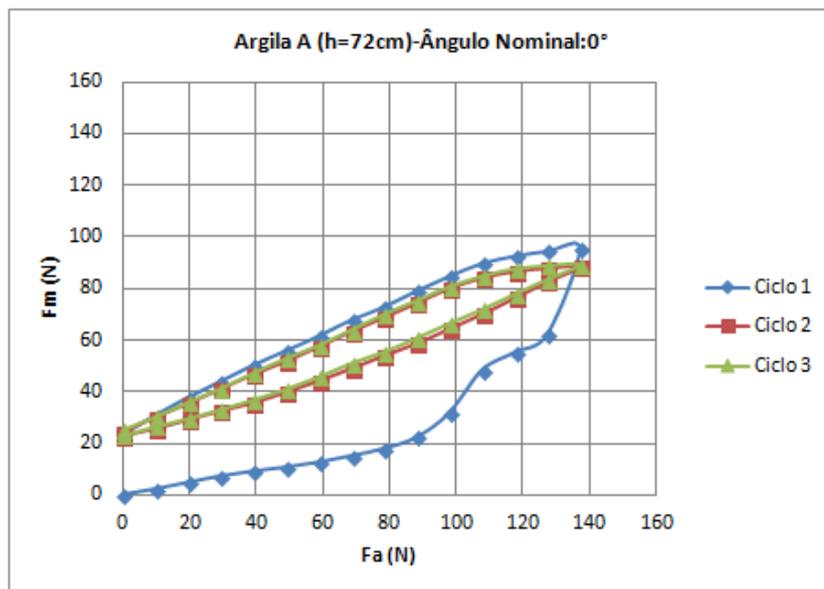


Figura 7.10: Carga aplicada (F_a) versus carga medida (F_m) em ensaios com ciclos de carga e descarga realizado na Argila A, com altura de solo de 72 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 0° .

Na última posição de ensaio, cuja inclinação nominal é de 55° , realizou-se apenas dois ciclos de carga e descarga, conforme observado na figura 7.11.

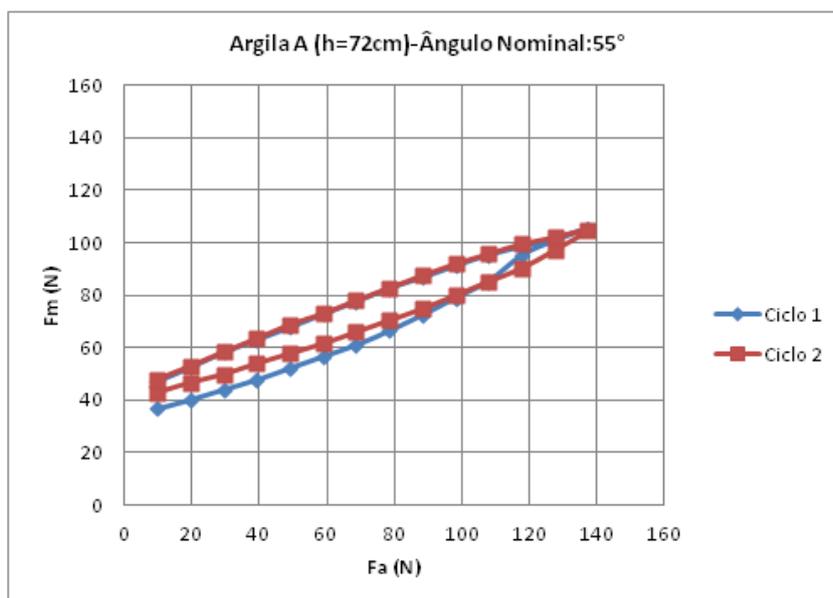


Figura 7.11: Carga aplicada (F_a) versus carga medida (F_m) em ensaios com ciclos de carga e descarga realizado na Argila A, com altura de solo de 72 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 55° .

Na argila B com altura de solo de 24 cm procedeu-se os ensaios com quatro ciclos de carga e descarga para a posição inicial (ângulo nominal de 0°) e três ciclos para a posição final de ensaio (ângulo nominal de 55°), os resultados podem ser observados nas figuras 7.12 e 7.13.

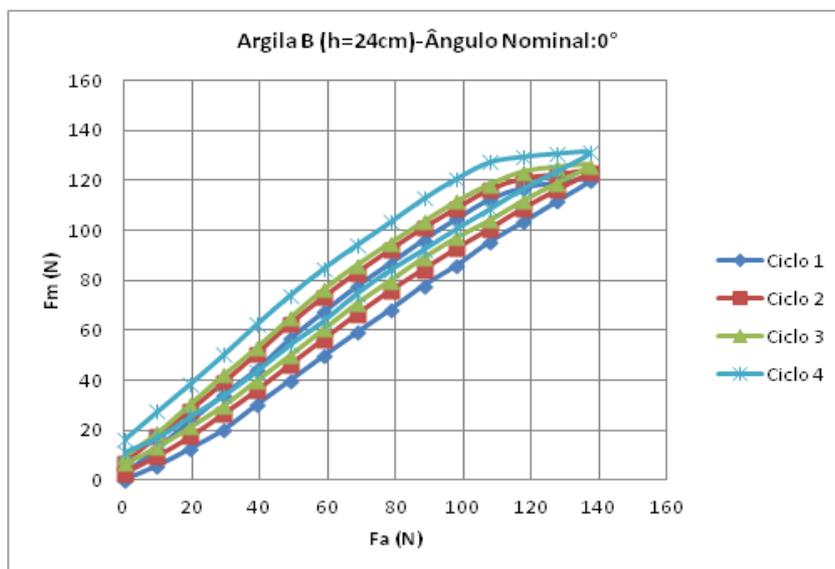


Figura 7.12: Carga aplicada (F_a) versus carga medida (F_m) em ensaios com ciclos de carga e descarga realizado na Argila B, com altura de solo de 24 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 0° .

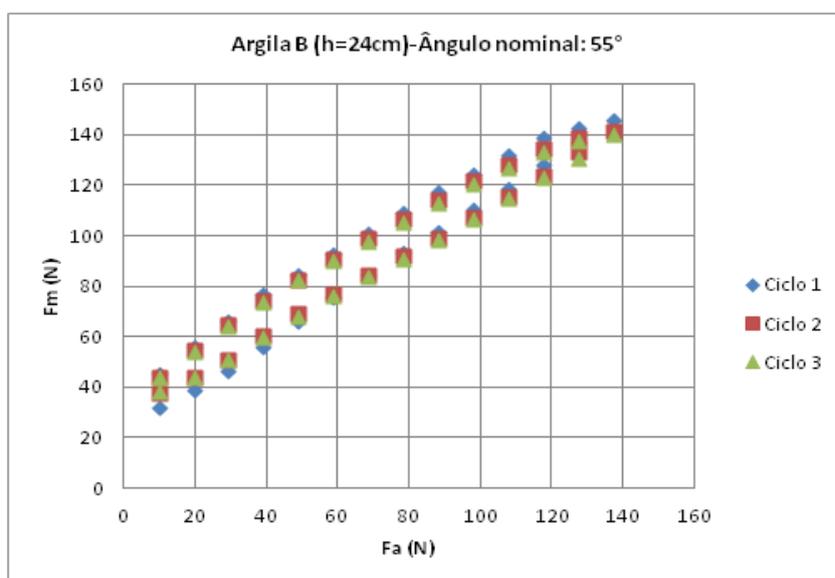


Figura 7.13: Carga aplicada (F_a) versus carga medida (F_m) em ensaios com ciclos de carga e descarga realizado na Argila B, com altura de solo de 24 cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 55° .

8 ENSAIOS DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – ANÁLISES

A tabela 8.1 exhibe resumidamente os resultados obtidos para o carregamento máximo em cada posição de ensaio. O ângulo nominal refere-se ao ângulo de incidência teórico com relação à vertical, a carga nominal é aquela aplicada à amarra. São apresentados também o comprimento aproximado do trecho de amarra embutida, a força resultante (que é a força que chega à estaca) e o ângulo da aplicação da resultante com relação à horizontal. Observa-se que na argila A, que apresenta maior resistência ao cisalhamento, não houve variação significativa no ângulo de incidência da amarra no topo da estaca nas diferentes posições de ensaio. À medida que a resistência oferecida pelo solo se reduz, a variação da inclinação da amarra no topo da estaca aumenta, podendo chegar a 45% entre a posição inicial (0°) e a posição final de ensaio (55°) na argila B com altura de solo. De acordo com o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) observa-se que os resultados obtidos nos ensaios experimentais apresentaram pouca dispersão e, portanto, consistentes.

Tabela 8.1: Resultados dos ensaios de carregamento estático.

Ensaio	Ângulo nominal (°)	Carga Nominal Aplicada (N)	Comprimento Embutido Amarra (m)	Força Resultante Média na Estaca (N)	Desvio padrão (σ)	CV (%)	Ângulo Aplicação Resultante (°)	Desvio padrão (σ)	CV (%)
Argila A (h=72cm)	0	137,34	0,72	86,48	17,27	19,98	88,19	1,54	1,74
	5	137,34	0,72	95,08	14,89	15,66	88,13	1,38	1,56
	10	137,34	0,72	102,09	14,84	14,53	88,31	1,13	1,28
	15	137,34	0,72	107,43	10,61	9,87	88,08	1,45	1,65
	20	137,34	0,73	111,20	8,73	7,85	88,08	1,41	1,60
	25	137,34	0,74	110,79	7,33	6,62	88,13	1,19	1,35
	30	137,34	0,75	112,37	5,98	5,33	88,00	1,04	1,18
	35	137,34	0,77	111,23	3,72	3,34	87,93	0,65	0,73
	40	137,34	0,8	109,89	3,89	3,54	87,74	1,04	1,19
	45	137,34	0,82	109,88	1,27	1,16	87,90	2,18	2,48
	50	137,34	0,87	109,69	2,63	2,40	86,44	3,05	3,53
Argila B (h=72cm)	0	137,34	0,72	91,73	4,06	4,43	89,21	0,35	0,40
	5	137,34	0,72	99,11	6,12	6,17	89,22	0,44	0,49
	10	137,34	0,72	110,89	3,06	2,76	86,50	4,17	4,78
	15	137,34	0,73	116,53	3,42	2,93	89,11	0,29	0,32
	20	137,34	0,74	120,37	2,92	2,43	88,68	0,41	0,46
	25	137,34	0,76	120,97	3,07	2,54	84,85	2,26	2,68
	30	137,34	0,77	123,52	2,45	1,99	79,76	3,00	3,81
	35	137,34	0,81	124,26	2,07	1,66	76,10	2,68	3,56
	40	137,34	0,84	124,60	3,69	2,96	71,91	2,78	3,91
	45	137,34	0,89	122,50	1,04	0,85	68,33	3,91	5,81
	50	137,34	0,94	123,29	0,37	0,30	64,55	2,73	4,28
Argila B (h=48cm)	0	137,34	0,48	113,15	6,79	6,00	87,57	2,04	2,34
	5	137,34	0,48	119,23	9,34	7,84	87,67	1,98	2,28
	10	137,34	0,48	126,74	5,45	4,30	88,54	1,66	1,89
	15	137,34	0,48	129,50	5,60	4,33	87,30	1,04	1,19
	20	137,34	0,49	129,55	4,20	3,24	82,08	1,41	1,70
	25	137,34	0,51	129,00	4,95	3,83	77,78	0,92	1,18
	30	137,34	0,52	128,61	3,85	2,99	73,11	1,17	1,59
	35	137,34	0,55	129,33	4,32	3,34	68,18	1,70	2,46
	40	137,34	0,57	125,86	3,74	2,97	64,64	1,15	1,77
	45	137,34	0,61	127,52	3,63	2,85	60,27	2,03	3,32
	50	137,34	0,65	129,07	2,26	1,75	56,26	1,64	2,88
Argila B (h=24cm)	0	137,34	0,24	120,57	3,91	3,24	88,67	0,39	0,45
	5	137,34	0,24	133,48	7,32	5,49	88,87	0,69	0,78
	10	137,34	0,24	134,61	6,06	4,50	85,91	1,37	1,59
	15	137,34	0,25	135,33	6,37	4,70	81,30	1,32	1,62
	20	137,34	0,25	135,84	7,68	5,65	77,12	1,38	1,79
	25	137,34	0,26	136,19	6,96	5,11	72,53	0,84	1,16
	30	137,34	0,27	139,40	6,47	4,64	68,02	0,84	1,23
	35	137,34	0,28	136,91	6,09	4,45	63,91	0,89	1,39
	40	137,34	0,3	138,32	5,19	3,75	59,18	1,14	1,92
	45	137,34	0,33	139,46	5,50	3,94	55,04	0,89	1,61
	50	137,34	0,35	141,22	7,43	5,26	51,03	1,35	2,64
55	137,34	0,38	142,47	4,88	3,43	48,54	0,97	1,98	

8.1 ANÁLISE DAS FORÇAS MEDIDAS EM FUNÇÃO DAS FORÇAS APLICADAS

Na análise das figuras 7.1 a 7.4, que relaciona as componentes horizontais e verticais das forças medidas pela célula de carga em cada ensaio, e da figura 8.1 que apresenta os resultados médios para cada condição de ensaio, observa-se claramente que, à medida em que o processo de carga e descarga ocorre para ângulos (com a direção vertical) cada vez maiores, a amplitude da carga que efetivamente chega ao ponto de ancoragem diminui. Esta evidência comprova que, mesmo em carregamentos estáticos, flutuações de carga na linha de ancoragem não são inteiramente transmitidas à fundação (torpedo), sendo parcialmente absorvidas ao longo da amarra. Comparando-se os resultados obtidos nas diferentes condições de ensaio, pode-se concluir que a variação do ângulo de incidência da amarra no topo da célula de carga aumenta à medida que a resistência apresentada pelo solo diminui, evidenciado nos gráficos pela elevação da componente horizontal. Observa-se que a componente vertical da força medida não retorna à zero após o descarregamento, mesmo na primeira inclinação de ensaio. Isto ocorre devido à tensão residual proveniente da força de reação do solo. Quanto mais inclinada a amarra maior é a tensão residual, devido à maior superfície de contato solo-amarra.

Observa-se que em alguns casos, a componente horizontal da força transmitida é negativa, isto ocorre em decorrência da amarra na primeira posição de ensaio (0°) não estar totalmente vertical dentro do solo e sua inclinação estar na porção negativa do sistema de coordenadas adotado.

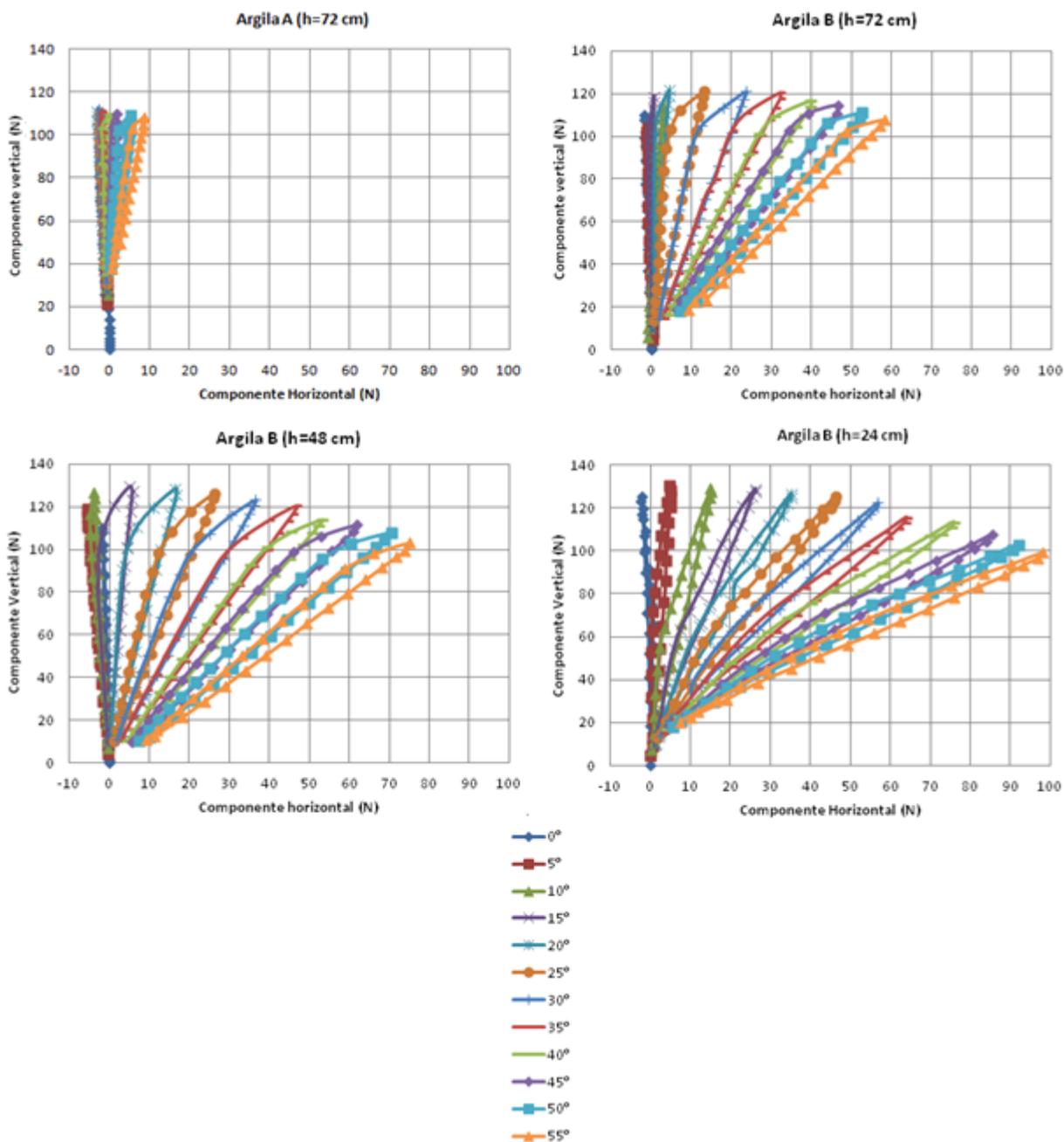


Figura 8.1: Comparação entre os resultados médios das componentes horizontais e verticais nas diferentes condições de ensaio.

Nas figuras 7.5 a 7.8 observa-se que as curvas de carga e descarga não se sobrepõem, este fenômeno é conhecido por histerese. Em todas as condições de ensaio verifica-se que a amarra apresenta maior histerese na primeira posição de ensaio do que em outras faixas de inclinação. Inicialmente o solo que não foi submetido a nenhum carregamento anterior absorve grande parte dos esforços, à medida que se eleva a carga aplicada, o solo ao redor da amarra perde parte da sua resistência ao cisalhamento em razão do amolgamento e como

consequência, aumenta a carga transmitida para a célula de carga. Comparativamente, para um mesmo carregamento e posição de ensaio, a argila A apresenta maior diferença entre a carga aplicada à amarra (F_a) e a carga medida (F_m) devido a alta resistência ao cisalhamento não drenada. Com relação aos ensaios realizados na argila B em diferentes alturas, a diferença entre a força aplicada e a força medida tende a diminuir com a redução da altura de solo.

De acordo com os resultados de ensaios de mini palheta e cravação dinâmica discutidos no capítulo 5, a argila A apresenta resistência ao cisalhamento não drenada superior ao da argila B e conforme esperado, para uma mesma carga aplicada em ambas argilas, a carga transferida para a célula de carga foi inferior na argila A, portanto a dissipação da carga de tração foi superior ao da argila B. A partir dos gráficos apresentados na figura 8.2 pode-se concluir que, para uma mesma argila, quanto maior a altura de solo menor é a carga medida, ou seja, maior é a atenuação do carregamento aplicado. Por meio destes resultados, e como esperado, a profundidade de penetração da estaca bem como parâmetros do solo, tais como resistência ao cisalhamento não drenada influenciam na atenuação das cargas aplicadas na amarra.

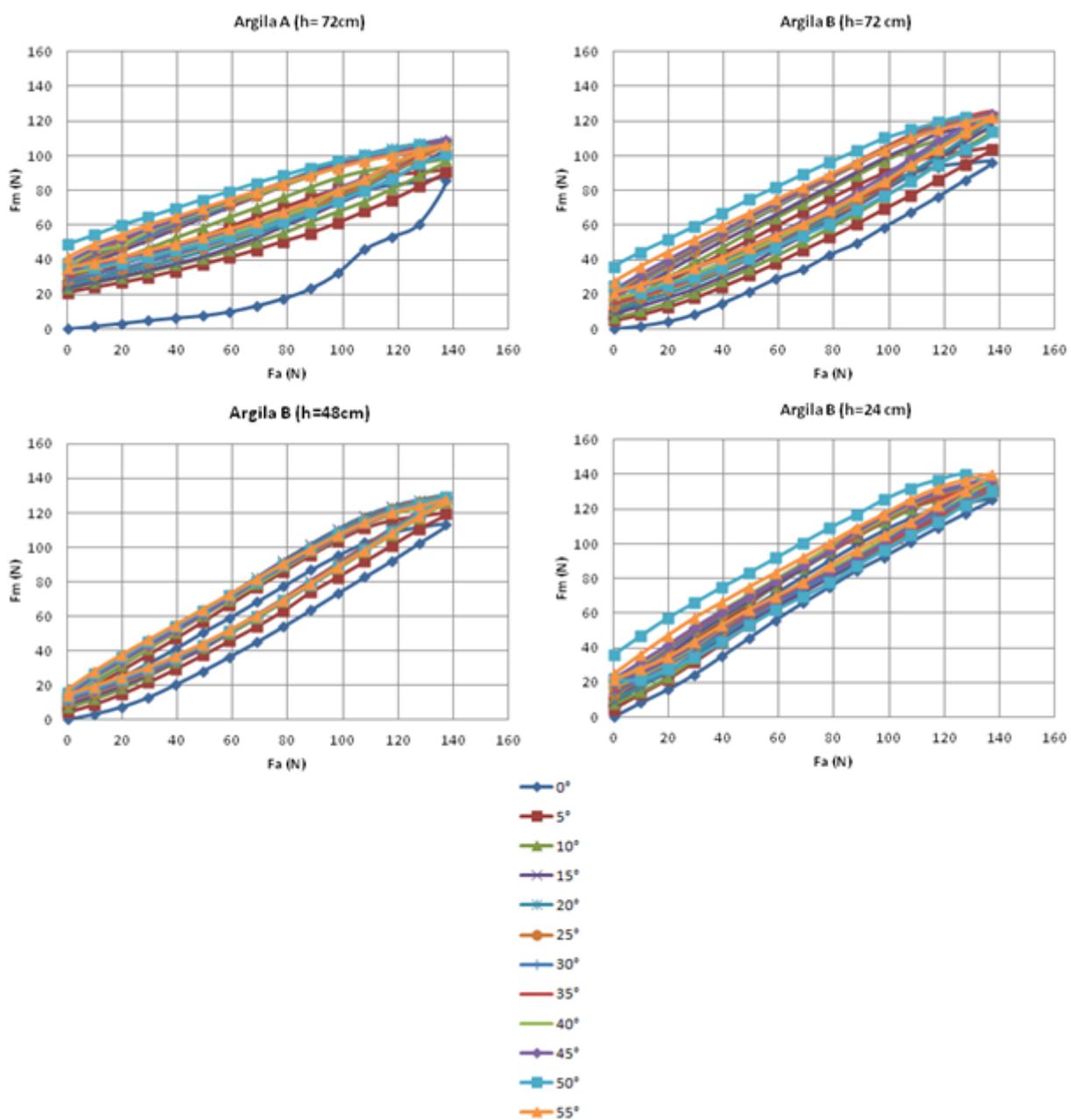


Figura 8.2: Comparação entre os resultados médios das forças medidas (F_m) em relação às forças aplicadas (F_a) nas diferentes condições de ensaio.

8.2 ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DE CARGA

8.2.1 Considerações iniciais

Em uma análise preliminar, considerou-se a atenuação ou dissipação da carga ao longo do trecho enterrado (ζ) como uma grandeza adimensional representada pela uma relação entre a força aplicada na amarra e a força medida pela célula de carga, conforme equação (8.1):

$$\zeta = \frac{F_a - F_m}{F_a} \quad (8.1)$$

Onde:

ζ = Atenuação;

F_a = Força aplicada (N);

F_m = Força medida (N).

Nas figuras 8.3 a 8.6 são mostrados os resultados obtidos nos ensaios realizados na argila A com altura de solo de 72 cm e na Argila B para três alturas de solo.

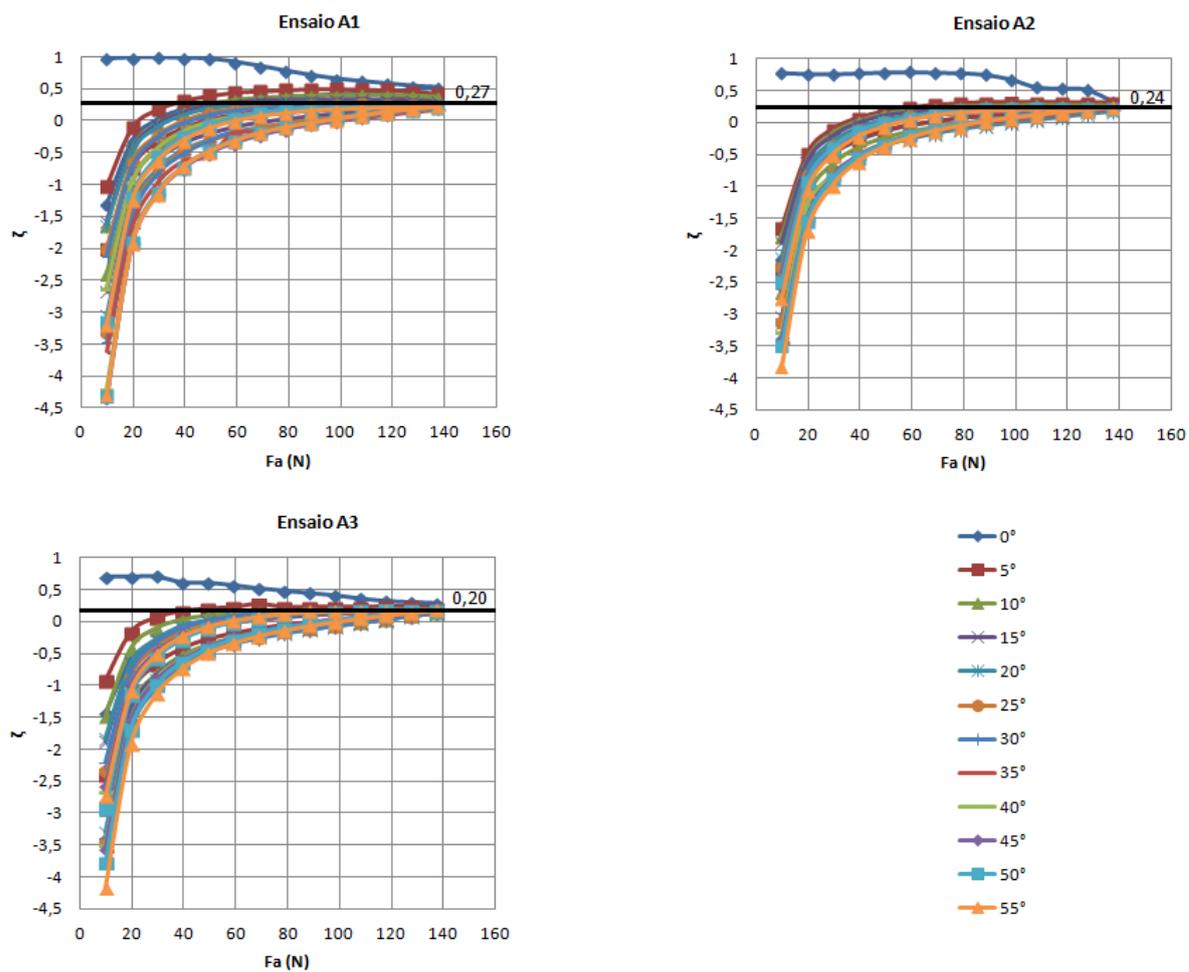


Figura 8.3: Relação entre carga aplicada e atenuação em cada ensaio realizado na argila A ($H=72$ cm).

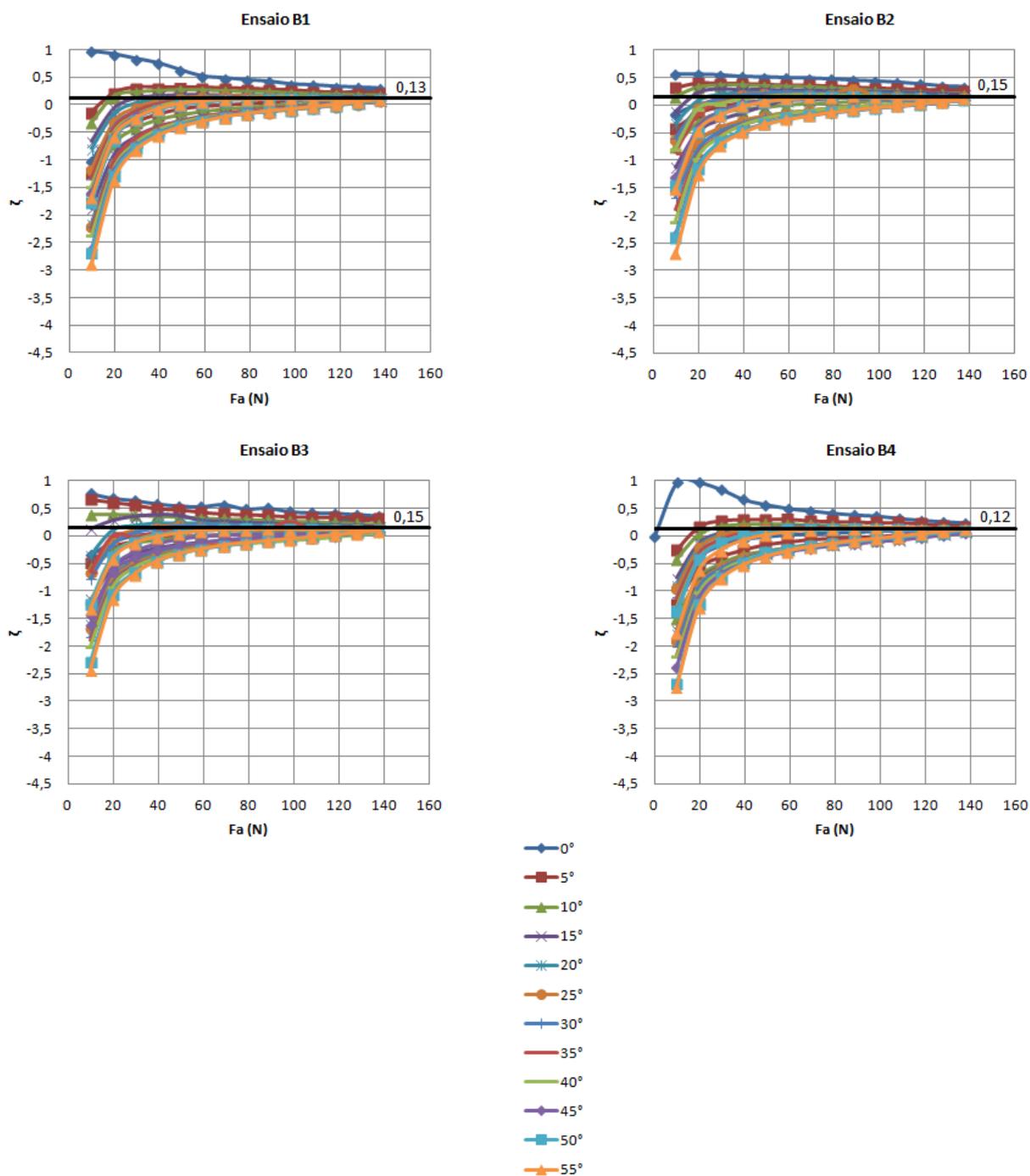


Figura 8.4: Relação entre carga aplicada e atenuação em cada ensaio realizado na argila B (H=72 cm).

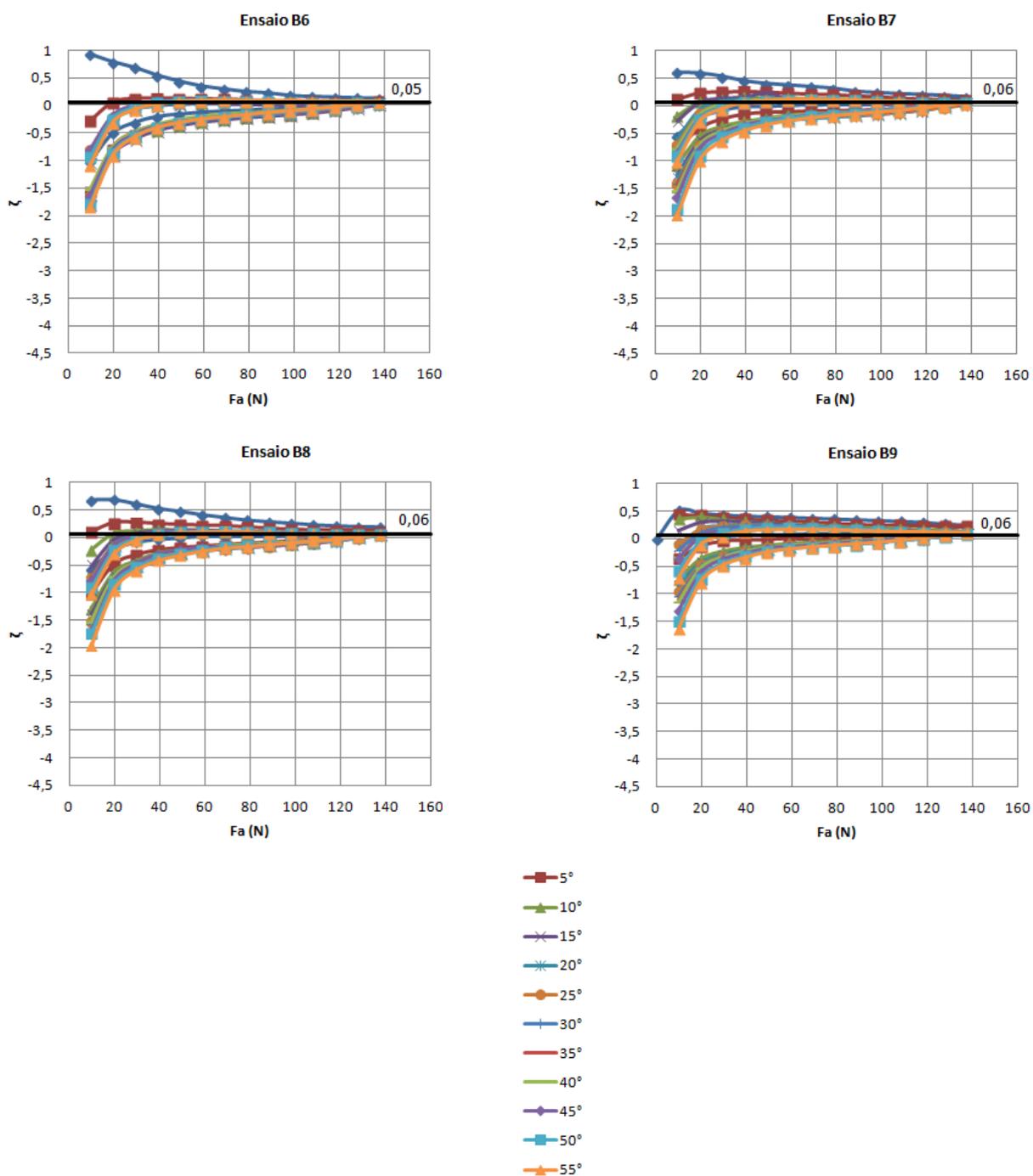


Figura 8.5: Relação entre carga aplicada e atenuação em cada ensaio realizado na argila B (H=48 cm).

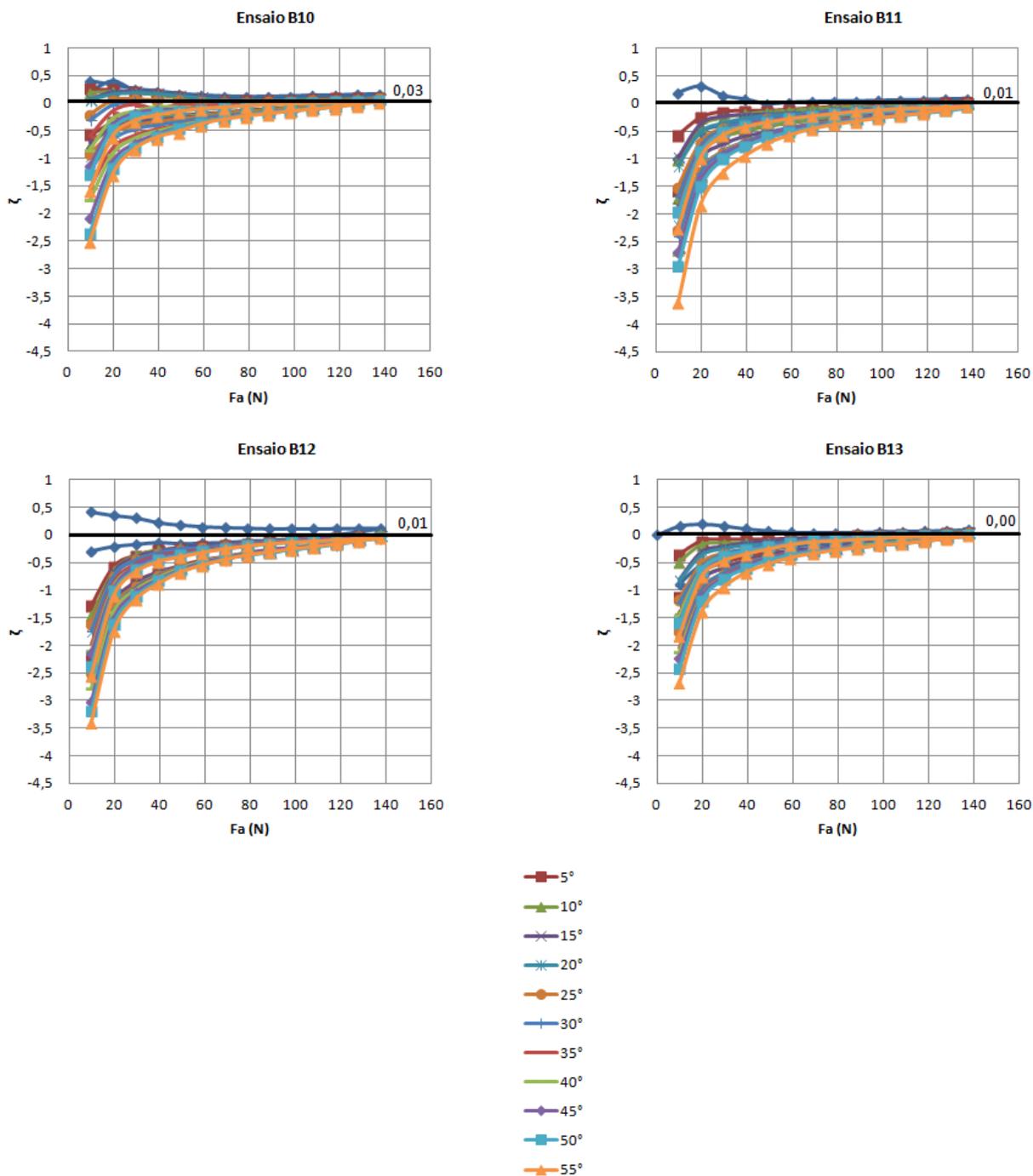


Figura 8.6: Relação entre carga aplicada e atenuação em cada ensaio realizado na argila B (H=24 cm).

A figura 8.7 apresenta a relação entre atenuação e o ângulo de incidência da amarra, com a vertical, no topo da estaca para cada condição de ensaio.

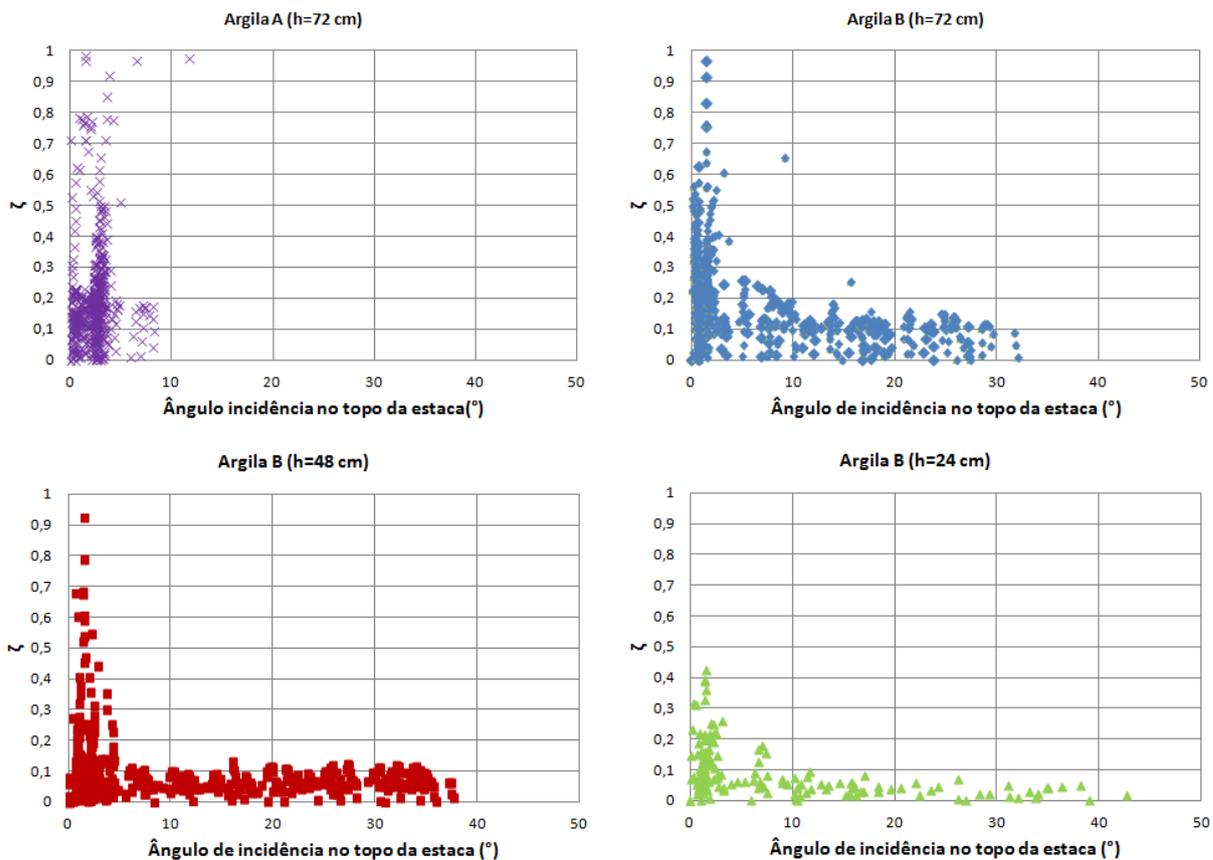


Figura 8.7: Comparação entre os ângulos de incidência da carga no topo da estaca em cada condição de ensaio.

A figura 8.8 apresenta a influência da inclinação da amarra no topo da estaca, representada pela relação entre o comprimento da amarra embutida no solo (L) e a altura de solo (H) na atenuação da carga transmitida em cada condição de ensaio. A zona negativa do gráfico se refere à carga residual lida pela célula de carga durante o descarregamento e depende da resistência do solo ao deslocamento da linha de ancoragem.

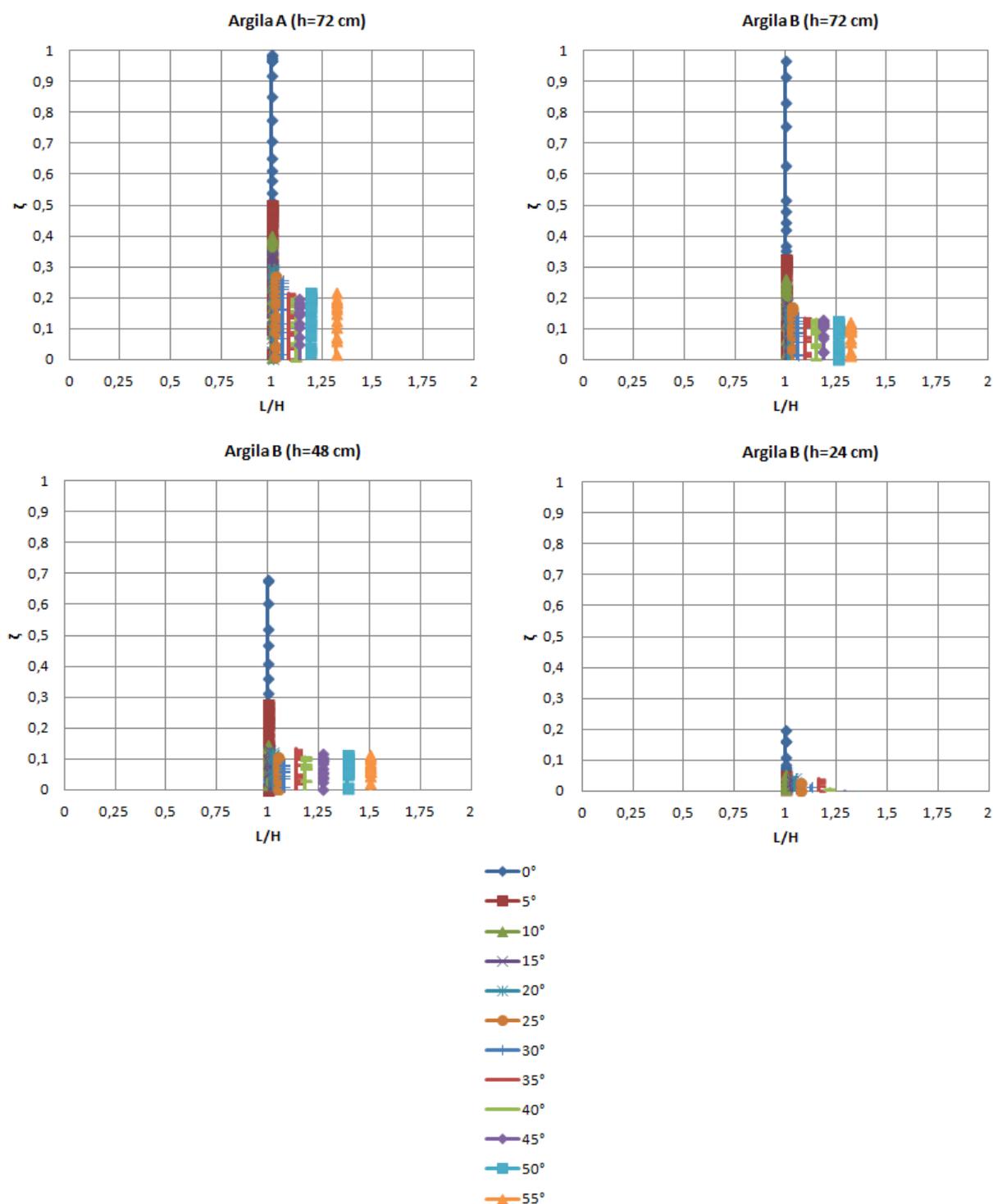


Figura 8.8: Comparação da atenuação da carga *versus* L/H nas diferentes condições de ensaio.

A figura 8.9 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaios realizados na argila A com altura de solo de 72 cm e na Argila B para três alturas de solo. À medida que se eleva a força aplicada (F_a) na amarra, para uma mesma posição de ensaio, a atenuação tende a um valor

constante e quanto maior a inclinação da força aplicada, com relação à vertical, menor é a atenuação. Observa-se que na primeira posição de ensaio, representado no gráfico pelo ângulo nominal de 0° , o solo está em uma condição de repouso e ainda não foi solicitado. A partir do início do ensaio, durante os primeiros incrementos praticamente toda a carga é absorvida pelo solo. À medida que ocorre o acréscimo de carga, a região circundante à amarra se amolga, com isto a transmissão de carga aumenta e conseqüentemente a atenuação é reduzida. Nas demais posições de ensaio a atenuação tende a diminuir, em consequência dos fenômenos de amolgamento do solo na região solicitada e do seu descolamento na região traseira da amarra, este último é pronunciado na argila A, que apresenta uma alta resistência ao cisalhamento não drenada e conseqüentemente um menor fator de adesão.

Durante o carregamento de tração o movimento relativo da massa de solo é para baixo, mesmo sentido do atrito entre o solo e a amarra. Portanto, ocorre uma dissipação da carga de tração ao longo do trecho enterrado. Já durante a descarga o atrito entre solo e a amarra se inverte, contribuindo para a carga residual, na qual a leitura na célula de carga é maior que a força efetivamente aplicada, demonstrando que o solo não está totalmente amolgado e oferece uma certa resistência.

Comparando-se os resultados obtidos nas diferentes condições de ensaio, nota-se que para uma mesma carga aplicada na amarra, a argila A apresenta maior dissipação de carga do que a argila B. A argila A apresentou tendência de estabilização da atenuação em torno de 24%, enquanto que a atenuação apresentada na argila B variou entre 14%, 6% e tendendo a 0 nos ensaios realizados respectivamente nas alturas de solo de 72 cm, 48 cm e 24 cm.

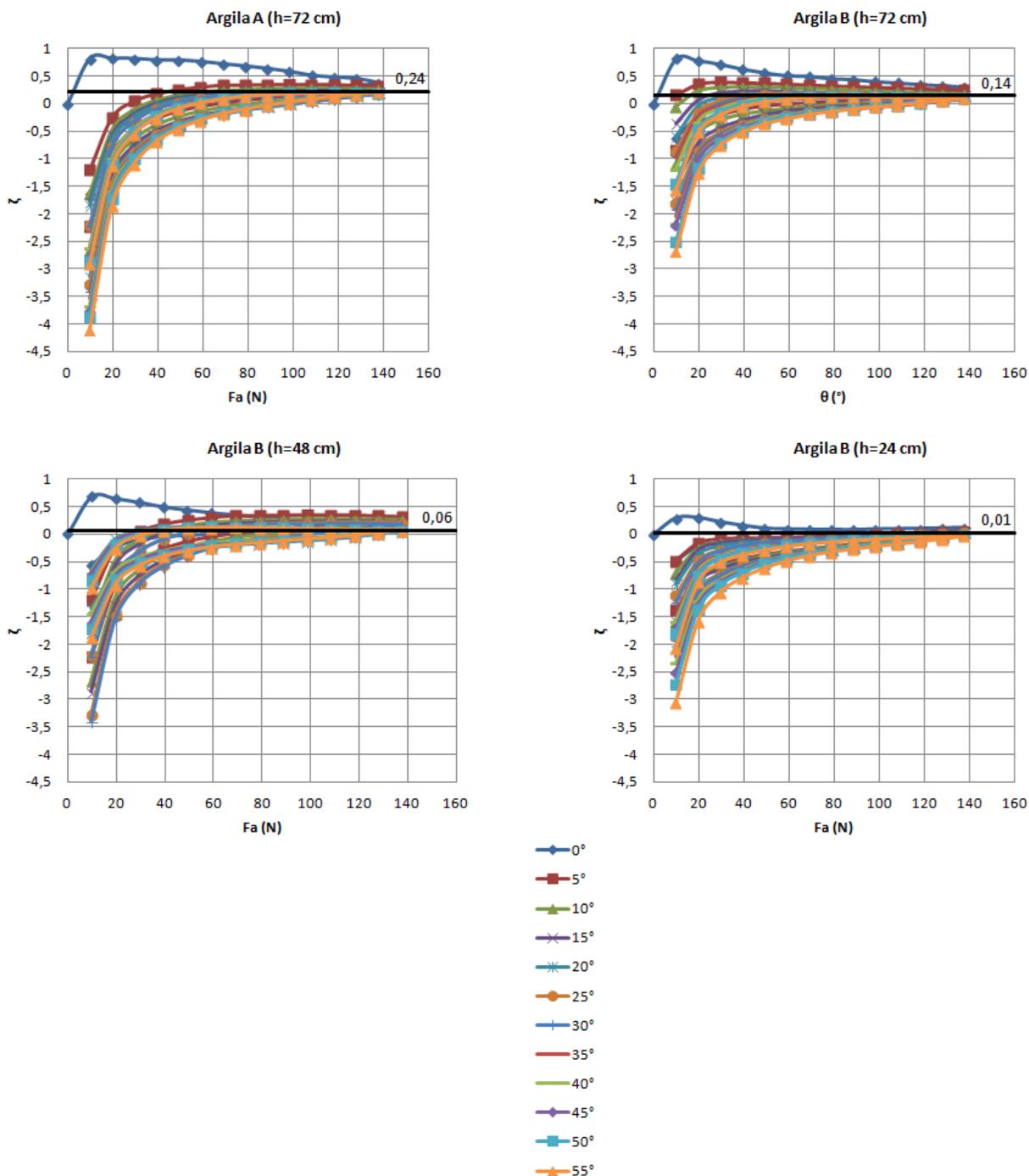


Figura 8.9: Relação entre os resultados médios de atenuação e carga aplicada em cada condição de ensaio.

Conforme já discutido neste capítulo, verifica-se na figura 8.7 que a variação do ângulo de incidência no topo da estaca reduz à medida que a resistência imposta pelo solo aumenta, ao passo que a atenuação é reduzida, ou seja, comparativamente, a argila A apresenta maior resistência ao cisalhamento que a argila B, conforme resultados de ensaios de mini palheta e comprovados nos ensaios de tração na amarra. Com relação aos ensaios realizados na argila B

em três alturas de solo distintas, quanto maior a altura de solo maior é a área de contato entre solo-amarra. Portanto, que a profundidade de penetração da estaca é um importante parâmetro para análise da atenuação das cargas transmitidas.

De acordo com a figura 8.7, o ângulo de incidência da amarra no topo da estaca apresenta uma grande variação entre os ensaios realizados nas diferentes condições de ensaio. Então, optou-se por apresentar a atenuação em relação ao ângulo nominal para permitir a comparação entre os resultados obtidos nas duas argilas e diferentes alturas de solo em função da posição de ensaio.

Nota-se um padrão de comportamento semelhante, no qual há uma tendência decrescente da atenuação com o aumento da inclinação da amarra com relação à vertical, conforme mostrado na figura 8.10. São apresentados todos os resultados condensados para avaliar as tendências de comportamento e exibidos os valores limites da atenuação das cargas aplicadas em cada posição. Nota-se que as quatro condições de ensaios apresentam um padrão de comportamento com tendência à redução da atenuação com o aumento da inclinação da amarra com relação à vertical. Em todos os casos os menores valores de atenuação ocorrem a partir da inclinação de 30° com a vertical, tendendo a permanecer com valores praticamente constantes para ângulos superiores a este.

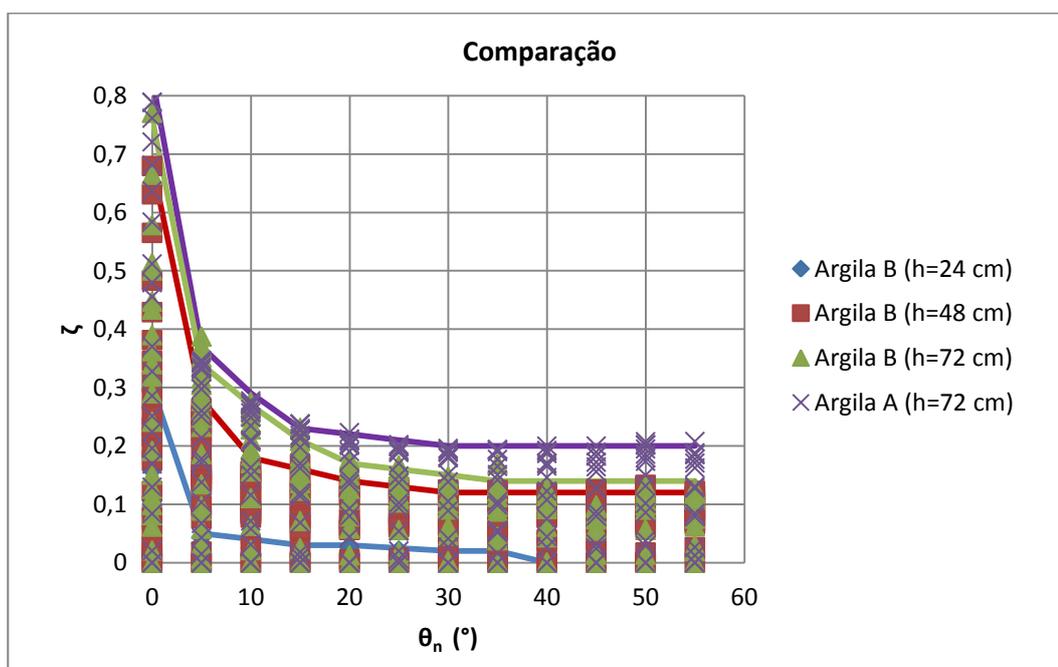


Figura 8.10: Comparação da atenuação *versus* ângulo nominal nas diferentes condições de ensaio.

Observa-se ainda na figura 8.10 que em todas as condições de ensaio o comportamento quanto à atenuação é semelhante, ocorrendo elevada dissipação de carga na posição inicial (vertical) e conforme aumenta o ângulo de incidência da carga, com relação à vertical, na superfície do solo a atenuação diminui drasticamente até atingir um patamar estável, a partir do qual se mantém constante. Conforme observado na figura 8.8, a partir da quarta posição de ensaio (correspondente ao ângulo nominal de 30°) a atenuação tende a permanecer constante.

O Apêndice “B” apresenta todos os ciclos de carga e descarga realizados durante o programa de ensaios até aqui, relacionando carga aplicada com força resultante medida na célula de carga, ou seja, relacionando Força aplicada (F_a) com Força medida (F_m).

Sobre cada gráfico está indicado o ângulo médio da curva histerética (inclinação da linha tracejada), que está relacionado a uma atenuação incremental média. Portanto, pode-se rapidamente comparar a inclinação da linha tracejada com a inclinação da linha cheia (45°), sendo que quanto maior a diferença maior é a atenuação que ocorre naquela configuração de ensaio específica.

Observa-se, por exemplo, que para a argila A, a atenuação é significativamente maior que para a argila B e que profundidades menores de solo também produzem uma menor atenuação, conforme esperado.

8.2.1.1 Análise de ciclos de carga e descarga

Na figura 7.10 são apresentados os resultados obtidos para a argila A, na primeira posição de ensaio. Nota-se uma redução significativa da histerese entre o primeiro e segundo ciclo. Em contrapartida, a partir do segundo ciclo de carga não ocorre variação entre a força aplicada e a força medida e a atenuação tende a permanecer constante, conforme mostrado na figura 8.11. Este comportamento se justifica pelo fato de que na primeira posição de ensaio, durante o primeiro ciclo, o solo absorve grande parte da carga aplicada na amarra, a partir do segundo ciclo o solo já perdeu parte de sua capacidade resistiva, fazendo com que a atenuação tenda a reduzir, em contrapartida o solo não está totalmente amolgado e continua aderido à amarra.

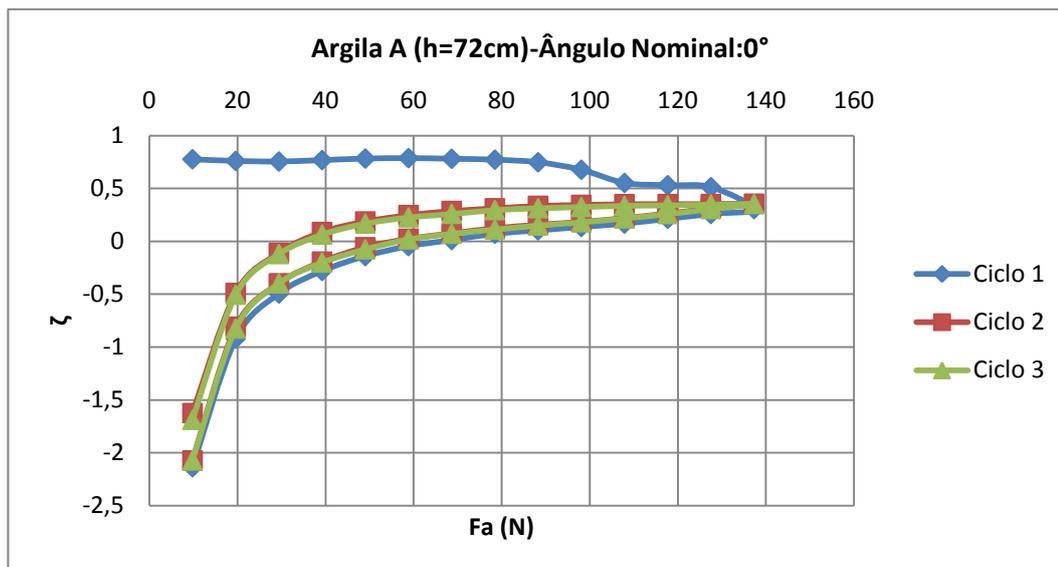


Figura 8.11: Relação entre atenuação e carga aplicada em cada ciclo de carga e descarga realizado na argila A, com altura de solo de 72cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 0°.

Conforme observado nas figuras 7.11 e 8.12 não houve variações significativas da relação entre carga aplicada (F_a) e a carga medida (F_m) nos ciclos 1 e 2 na última posição de ensaio (ângulo nominal de 55°) e assim como no caso anterior, a atenuação tende a um mesmo valor constante independente do ciclo.

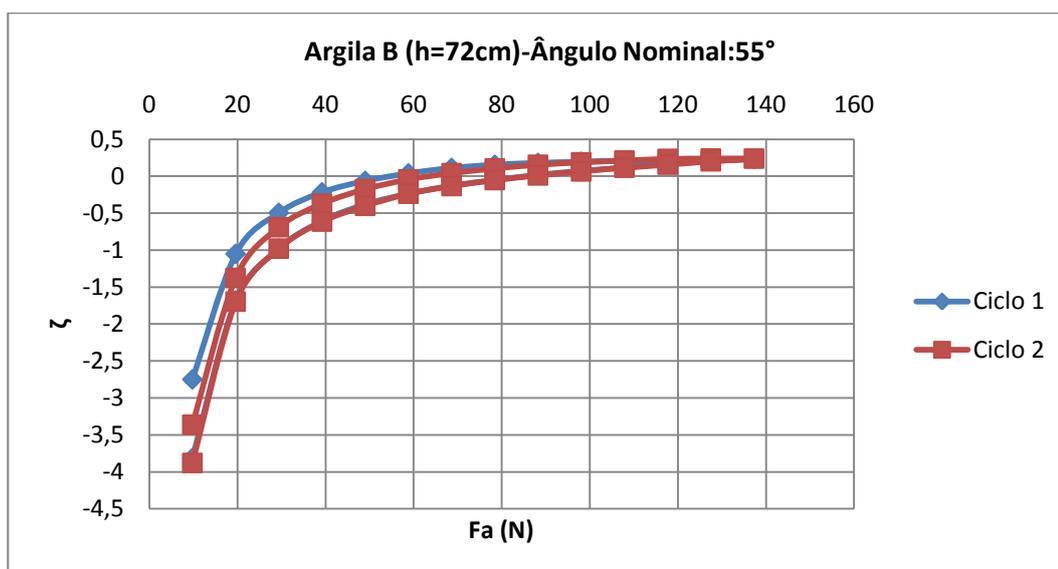


Figura 8.12: Relação entre atenuação e carga aplicada em cada ciclo de carga e descarga realizado na argila A, com altura de solo de 72cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 55°.

Observa-se na figura 7.12 que para uma mesma carga aplicada, a carga transmitida aumenta conforme quantidade de ciclos, portanto, a atenuação tende a diminuir sensivelmente, conforme apresentado na figura 8.13.

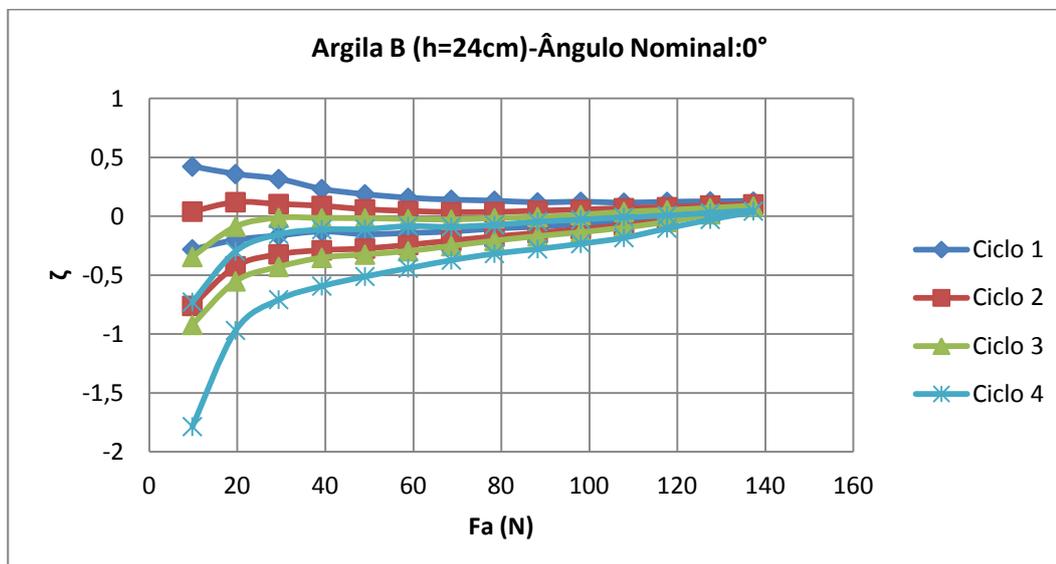


Figura 8.13: Relação entre atenuação e carga aplicada em cada ciclo de carga e descarga realizado na argila B, com altura de solo de 24cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 0°.

Na figura 8.14 são apresentados os resultados obtidos em três ciclos de carga e descarga na posição referente ao ângulo nominal de 55°, verifica-se que não houve variação significativa entre a força aplicada e a força lida na célula de carga. De acordo com a figura 8.11, não houve atenuação de carga no ensaio realizado nesta posição. Observa-se que em todos os ciclos, a carga medida na célula é maior que a carga efetivamente aplicada, comprovando-se a existência de uma carga residual.

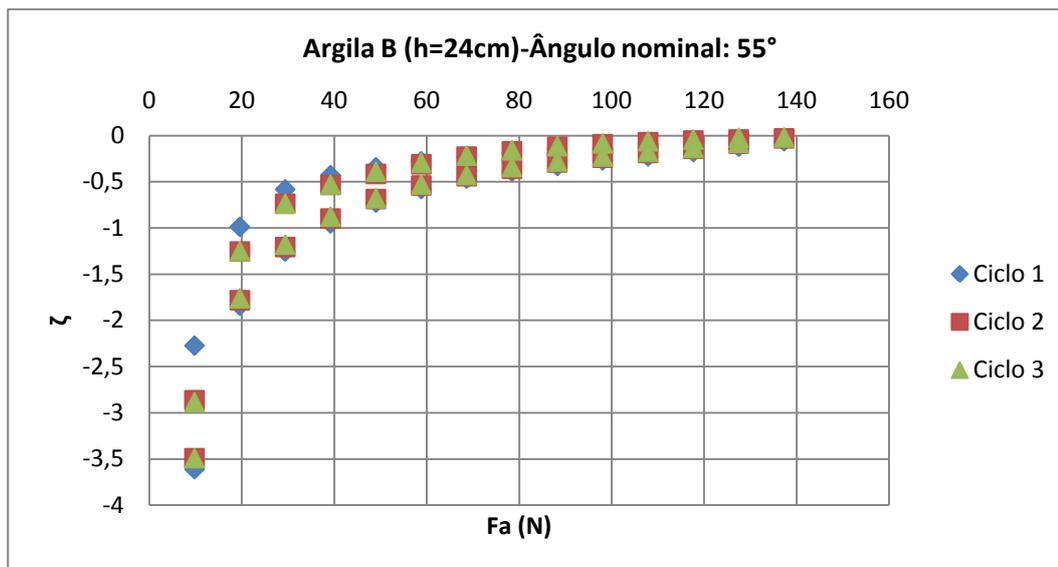


Figura 8.14: Relação entre atenuação e carga aplicada em cada ciclo de carga e descarga realizado na argila B, com altura de solo de 24cm na posição de ensaio referente ao ângulo nominal de 55°.

8.2.2 Comparação com resultados de outras pesquisas

A análise comparativa da atenuação de carga entre os resultados obtidos nesta pesquisa e os estudos descritos na seção 2.8 foi conduzida qualitativamente, em termos de força aplicada e força transmitida, posto que cada autor utilizou materiais com propriedades distintas, diferentes parâmetros e condições de ensaio.

Foram plotadas retas de ajuste linear relacionando força aplicada e força transmitida, com bons resultados de coeficiente de determinação, conforme observado na figura 8.15. Os resultados das diferentes pesquisas mostraram-se concordantes e com as mesmas tendências de comportamento. Observa-se que quanto menor a inclinação das retas de ajuste, maior é a atenuação da carga.

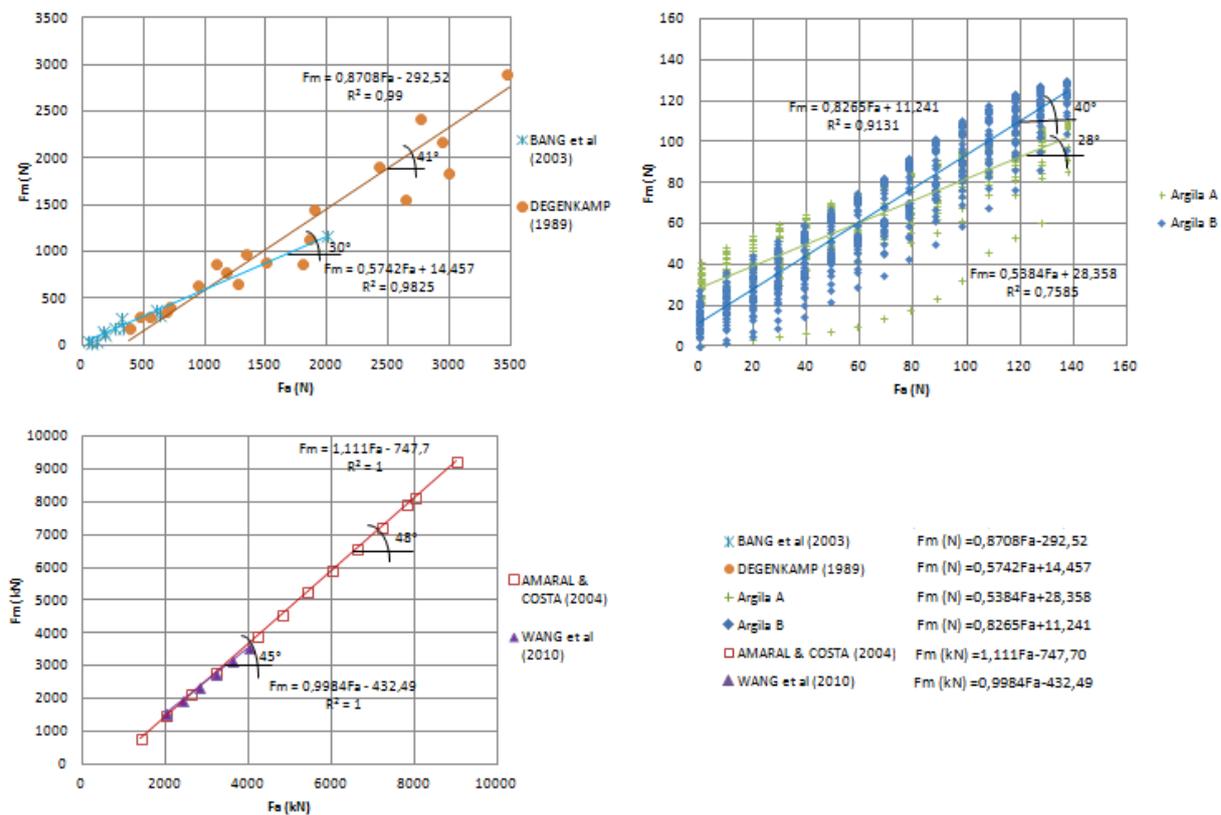


Figura 8.15: Resultados de força aplicada (F_a) versus força transmitida (F_m) de BANG *et al* (2003), DEGENKAMP (1989), AMARAL & COSTA (2004), WANG *et al* (2010) e presente pesquisa.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões desta dissertação, baseadas no programa experimental realizado e na análise dos resultados dos ensaios de laboratório, além de sugestões para futuras pesquisas.

9.1 CONCLUSÕES

Foram projetados e construídos os equipamentos para a realização dos ensaios experimentais de acordo com os princípios de escala e similaridade, com o objetivo de estabelecer condições de semelhança física entre o protótipo e o modelo utilizado nos ensaios de carregamento estático conduzido na escala de 1:40. Depois de construídos, os equipamentos foram utilizados nas campanhas experimentais em duas argilas, denominadas argila A e argila B.

A partir da análise e discussão dos resultados dos diversos ensaios que compõem esta pesquisa, aliados aos resultados obtidos pelo programa DIGIN, bem como da avaliação da influencia dos fatores controláveis sobre a atenuação de carga do trecho enterrado de linha de ancoragem em solo argiloso foram estabelecidas, dentro das condições e limites específicos deste estudo, as conclusões resumidas a seguir.

- a) Quanto à transferência de carga da linha de ancoragem para a fundação, demonstra-se através dos resultados apresentados, que mesmo em uma abordagem estática, ocorreu dissipação de parte da carga ao longo da amarra.
- b) Nos ensaios realizados em ambas argilas A e B observou-se que o trecho enterrado da linha de ancoragem assumiu a configuração de catenária invertida.
- c) Com relação aos deslocamentos horizontais da amarra embutida no solo, os resultados obtidos experimentalmente foram inferiores aos deslocamentos fornecidos pelo software, devido à alta resistência ao cisalhamento não drenada do solo na região próxima à superfície.
- d) A ferramenta computacional DIGIN subestimou os valores de atenuação para o estudo de caso analisado nesta pesquisa. A atenuação prevista varia entre 0,7% a 2,2 % enquanto os valores medidos em laboratório variam de 6% a 14%. Portanto, os resultados obtidos no modelo reduzido indicam que a atenuação é maior que a prevista em projeto.

- e) Os resultados experimentais para a atenuação de carga ao longo do segmento enterrado da amarra mostram valores coerentes de forma geral. A argila A apresentou tendência de estabilização da atenuação em torno de 24%, enquanto que a atenuação apresentada na argila B variou entre 14 %, 6% e tendendo a 0 nos ensaios realizados respectivamente nas alturas de solo de 72 cm, 48 cm e 24 cm.
- f) Os resultados das diferentes pesquisas mostraram-se concordantes e com as mesmas tendências de comportamento.
- g) Com relação aos resultados dos ensaios realizados com ciclos de carga e descarga em uma mesma posição, houve uma redução significativa da histerese entre o primeiro e segundo ciclo. Em contrapartida, a partir do segundo ciclo de carga não ocorre variação entre a força aplicada e a força medida e a atenuação tendeu a permanecer constante.
- h) De acordo com os resultados obtidos, comprova-se que a magnitude da força medida está relacionada com a magnitude e inclinação da força aplicada, comprimento da amarra embutida no solo e resistência ao cisalhamento não drenada do solo.
- i) Nesta pesquisa os parâmetros relacionados às propriedades físicas e geométricas da linha de ancoragem não fizeram parte das variáveis estudadas, uma vez que todos os ensaios foram realizados com um único modelo de amarra. Contudo, é de fundamental importância para a avaliação da atenuação em razão de que o solo no entorno da amarra sendo cisalhado ocorre um aumento da poropressão nesta região, diminuindo a tensão efetiva próximo à amarra. Como o volume de solo deslocado deve ser igual ao volume da amarra, a atenuação tende a ser mais significativa em amarras com diâmetros maiores.

9.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Durante a execução desta pesquisa surgiram alguns questionamentos e sugestões que poderiam ser considerados e aprofundados em pesquisas futuras, tais como:

- Ensaios de carregamento cíclico em cada posição.
- Ensaios de carregamento dinâmico.
- Avaliar numericamente os mecanismos de transferência de carga na interface solo/amarra.
- Aumentar a escala/ tamanho real: em campo.
- Experimentos conduzidos em diferentes escalas de comprimento para demonstrar a validade dos critérios implícitos na lei de semelhança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. S., SOUSA, J. R. M., ELLWANGER, G. B., PORTO, E. C., MEDEIROS JR, C. J., FOPPA, D. **Undrained load capacity of torpedo anchors in cohesive soil.** Proceedings of the OMAE Conference, Hawaii. 2009.

ALBRECHT, C. H. **Algoritmos Evolutivos Aplicados à Síntese e Otimização de Sistemas de Ancoragem.** 2005. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **D 4648M-10 - Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil,** 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos.** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.

API, 2005. **Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures (API RP 2SK)**, 3rd Edition, American Petroleum Institute, Washington, USA.

AYABE C., COSTA M.N.V.da, LEITÃO H.L.F., OLIVEIRA N.V. de, SILVA S.H.S.C., RIBEIRO E.J.B., **Semi-Submersible Drilling Rig Petrobras x: Past and Future**, 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, June 2001.

AMARAL, C. S., COSTA, A. M. da. **Verificação dos Fatores de Segurança das Estacas Torpedo para o Navio Avaré no Campo de Coral.** Relatório Parcial do Projeto – 601129. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello. 2004.

BANG, S. **Anchor Mooring Line Computer Program User Manual**. Contract Report CR - 6020 - OCN, Naval Facilities Engineering Service Center. 1996.

BANG, S., RICHARDSON, R., CHO, Y., KIM, Y. S. **Calibration of Analytical Solution Using Centrifuge Model Tests on Mooring Lines**. Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Havai, USA, 2003.

BRANDÃO, L.A. **Análise acoplada dos movimentos de uma unidade flutuante e da dinâmica dos sistemas de ancoragem e risers**. 2008. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CARBONO, A.J.J. **Otimização da disposição de Linhas de Ancoragem utilizando Algoritmos Genéticos**. 2005. Dissertação de Mestrado, PUC/RIO, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CARNEIRO, F. L. **Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos**. Rio de Janeiro. Editora da UFRJ, 2ª edição, 258p. 1996.

COLLIAT, J. L. **Anchor for Deepwater to Ultradeepwater Moorings**. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston. 2002.

CORRÊA, F.N. **Aplicação de Metodologias Híbridas em Estudos Paramétricos sobre o Comportamento de Sistemas *Offshore***. 2003. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

COSTA, R.G.B., SOUSA, J.R.M.de., AGUIAR, C.S. de. **Análise Paramétrica das Condições de Ancoragem de Plataformas *Offshore* utilizando Estacas Torpedo a partir de Modelos em Elementos Finitos**. Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010.

DEGENKAMP, G., DUTTA, A. **Soil Resistances to Embedded Anchor Chain**. In: Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v. 115, p. 1420-1438. 1989.

DNV, JIP, **Deep Water Anchors User's Manual DIGIN Ver.5.3**. In: Technical Report No-96-3637 Revision No.03, Det Norske Veritas, Norway, 1998.

ELTAHER A., RAJAPAKSA Y., CHANG K-T. **Industry Trends for Design of Anchoring Systems for Deepwater *Offshore* Structures**. *Offshore* Technology Conference, Paper 15265, Houston, Texas, May 2003.

EXCEL SENSORES. Disponível em: <www.excelsensor.com.br/>. 2013.

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.

GIRÓN, A.R.C. **Aplicação de Metodologias de Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers na Exploração de Petróleo *Offshore***. 2009. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HENRIQUES JR., P. R. D., FOPPA, D., PORTO, E. C., AND MEDEIROS JR., C. J., **A New Torpedo Pile Conception for High Mooring Loads and Application in a Floating Production Unity in the Pre-Salt Area**. Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010, IBP3355_10, Rio de Janeiro. 2010.

HOULSBY, G.T., BYRNE, B.W. **Design Procedures for Installation of Suction Caissons in Sand**. *Geotechnical Engineering*. 158 Issue GE3. Paper 13818. pp 135-144. July 2005.

JUNG, M. R. **Estudo do Jateamento em Solos Argilosos e sua Aplicação à Engenharia de Fundações *Offshore***. 2012. 181p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KAWASAKI, P. Y. **Análise de Linhas de Ancoragem de Plataformas Oceanicas considerando Diversos Tramos e o Trecho Enterrado da Linha**. 2010. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politecnica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

KUNITAKI, D. M. K. N. **Tratamento de Incertezas no Comportamento Dinâmico de Estacas Torpedo para Ancoragem de Sistemas Flutuantes na Exploração de Petróleo *Offshore***. 2006. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LACERDA, T.A.G. de. **Estimativa dos Movimentos Induzidos por Vórtices em Plataformas Flutuantes através de um Oscilador do tipo Van der Pol**. 2011. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LEFLER W. L., PATAROZZI R., STERLING G. **Deepwater Petroleum Exploration & Production - A Nontechnical Guide**. Tulsa, Oklahoma, 2003.

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, D.A. **Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas *Offshore* Considerando Aspectos do Projeto de Risers**. 2011. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LIU, H., LIU, C., YANG, H., LI, Y., ZHANG, W., XIAO, Z. **A novel kinematic model for drag anchors in seabed soils**. Proceedings of Ocean Engineering, v. 49, p. 33-42. 2012.

LIU, H., LIU, C., ZHAO, Y., WANG, C. **Reverse Catenary Equation of the Embedded Installation Line and Application to the Kinematic Model for Drag Anchors**. Proceedings of Applied Ocean Research, v. 43, p. 80-87. 2013.

LOUREIRO, R. R. **Análise Numerico-Experimental de Anomalia de Sistema de Ancoragem em Catenária devido à Falha de Manilhas de Linha de Poliéster**. 2007. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MARQUES, R.O. **Análise Acoplada dos Movimentos de um FPSO e da Dinâmica dos Sistemas de Ancoragem e Risers**. 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MASETTI, I.Q. **Análise Dinâmica de Navios Ancorados com Complacência Diferenciada**. 1997. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEDEIROS Jr., C. J. **Torpedo Anchor for Deep Water**. In: Deep *Offshore* Technology Conference, Rio de Janeiro, RJ, Outubro, 2001.

MEDEIROS Jr., C. J. **Low Cost Anchor System for Flexible Risers in Deep Waters**. Proceedings of the Annual *Offshore* Technology Conference, Paper 14151, Houston, Texas, 6 - 9 May, 2002.

MELLO, J. R., BOGOSSIAN, F. **Fundações de Estruturas *Offshore***. In: Hachich, W., Falconi, F. F., Saes, J. L., et al. (eds), *Fundações: Teoria e Prática*, 2 ed., cap. 11, São Paulo, SP, Editora Pini, 1998.

MONTEIRO, B. F. **Aplicação do Método do Enxame de Partículas na Otimização de Sistemas de Ancoragem de Unidades Flutuantes para Exploração de Petróleo *Offshore***. 2008. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NOGUEIRA, E.F., BORGES, A.T., JUNIOR, C. J. M., MACHADO, R. D. **Torpedo Base – A New Conductor Installation Process**. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, USA. 2005.

PERRY, C.C., LISSNER, H.R. **The Strain Gage Primer**. MacGraw Hill Book Company, N.Y. p. 332. 1962.

PETROBRAS. Disponível em: <www.petrobras.com.br>. 2012.

PINA, A.A.de. **Metodologias de Análise, Síntese e Otimização de Sistemas para Produção de Petróleo *Offshore* Através de Metamodelos e Enxame de Partículas**. 2010. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROCHA, M.M. **Vibrações em Estruturas – ENG0122**. Notas de aula. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

RODRIGUES, M. V. **Algoritmos Otimizados para a Análise Acoplada de Sistemas Flutuantes na Exploração de Petróleo Offshore**. 2004. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SAGRILO, L. LIMA, E. C. P., S., SOUSA, J. R. M., PORTO, E. C., FERNANDES, J. V. V., FOPPA, D. **Reliability-based design of torpedo anchors**. Proceedings of the OMAE Conference, Shanghai. 2010.

SAGRILO, L.V.S. ,LIMA, E. C. P., S., SOUSA, J. R. M., PORTO, E. C., FERNANDES, J. V. V. **A Study on the Holding Capacity Safety for Torpedo Anchors**. Journal of Applied Mathematics. 2012.

SCHNAID, F. **In situ testing in geomechanics**. 1ª ed, v. 1. 329 p. Oxon: Taylor & Francis, 2009.

SHARMA, P.P. **Ultimate capacity of suction caisson in normally and lightly overconsolidated clays**. 2004, 167p. Thesis of Master of Science – Office of Graduate Studies of Texas A&M University.

SKEMPTON, A. W., R. D. NORTHEY. **The Sensitivity of Clays**. In: Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnique Vol. 3, p. 30-53. 1952.

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.

SUKUMARAN, B. **Suction Caisson Anchors – A Better Option for Deep Water Applications**. Proceedings of the SWE Annual Conference, Houston. 1998.

TECHNICAL REPORT – **Geotechnical Analysis of The Mooring fixed Points of FPSO Cidade de Angra dos Reis (Tupi Pilot)** – I-RL-3010.86-1357-962-PPC-001. 2010.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia do Petróleo**. PETROBRAS. Editora interciência, rio de janeiro, 2001.

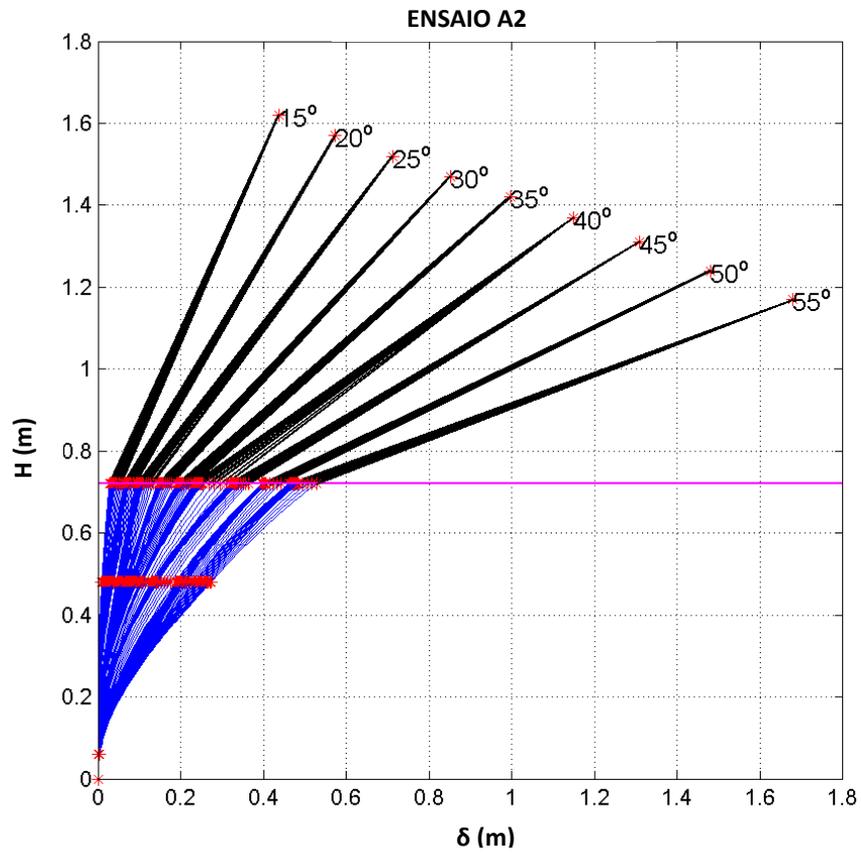
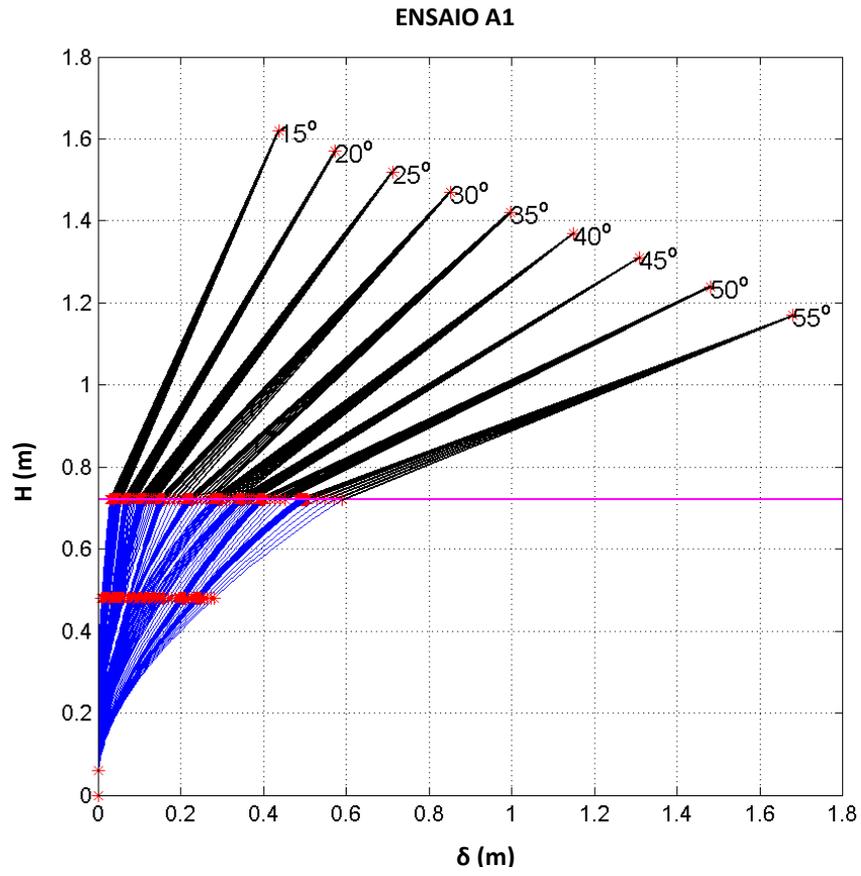
TRUE, D. G. **Undrained Vertical Penetration into Ocean Bottom Soils**. 1976. PhD Thesis, University of California, Berkeley, California.

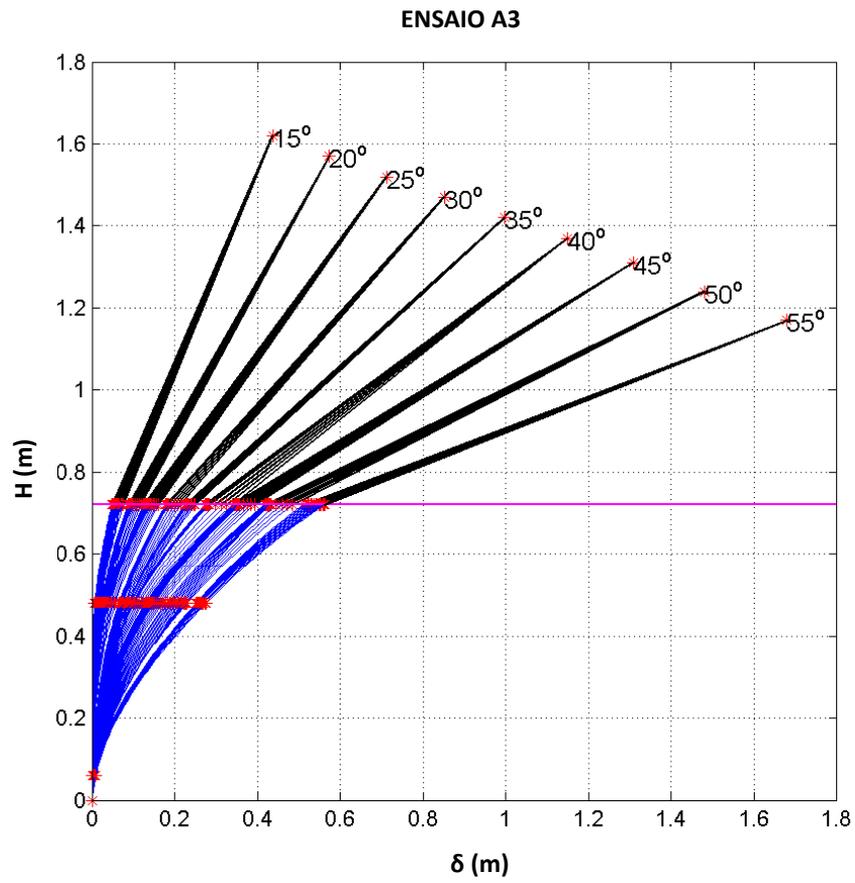
VRYHOF ANCHORS. **Anchor Manual 2010**. Vryhof Anchors, Krimpen ad Yjssel, The Netherlands.

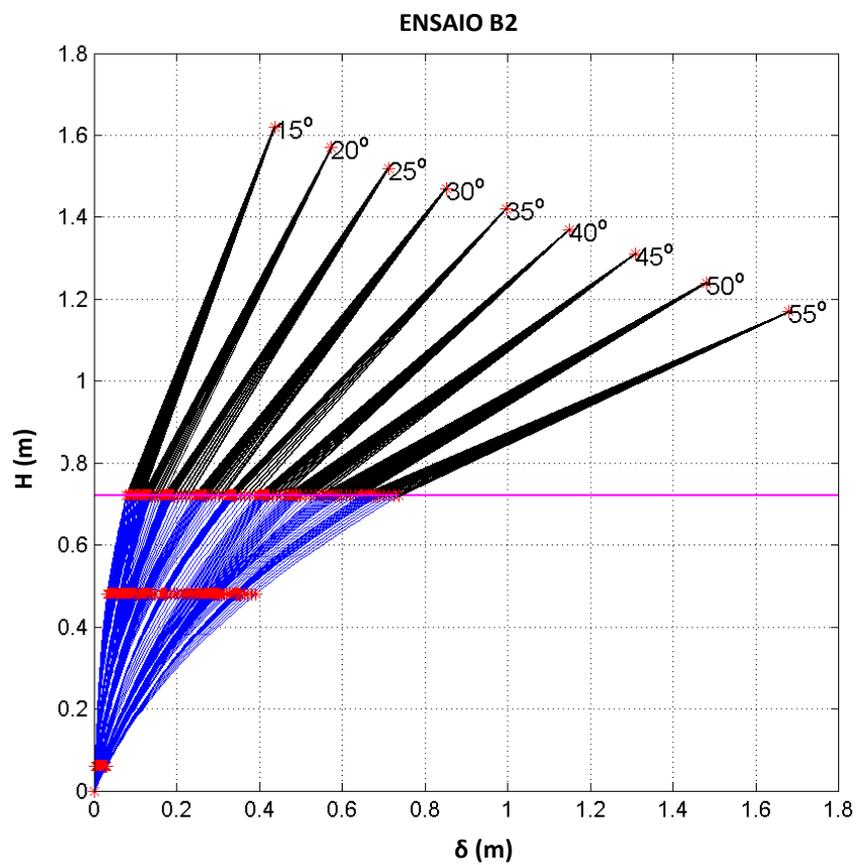
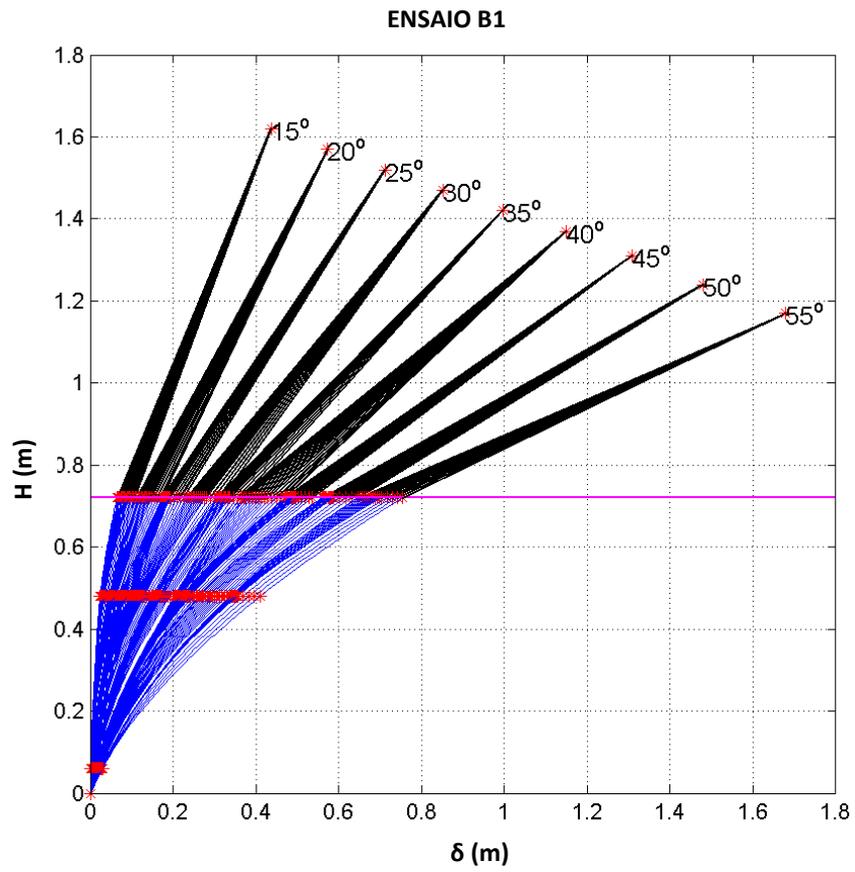
VIVATRAT, V; VALENT P. J., PONTERIO A. A. **The Influence of Chain Friction on Anchor Pile Design**. In: Proceedings of the 14th annual offshore technology conference, OTC, 4178. Houston, USA. 1982.

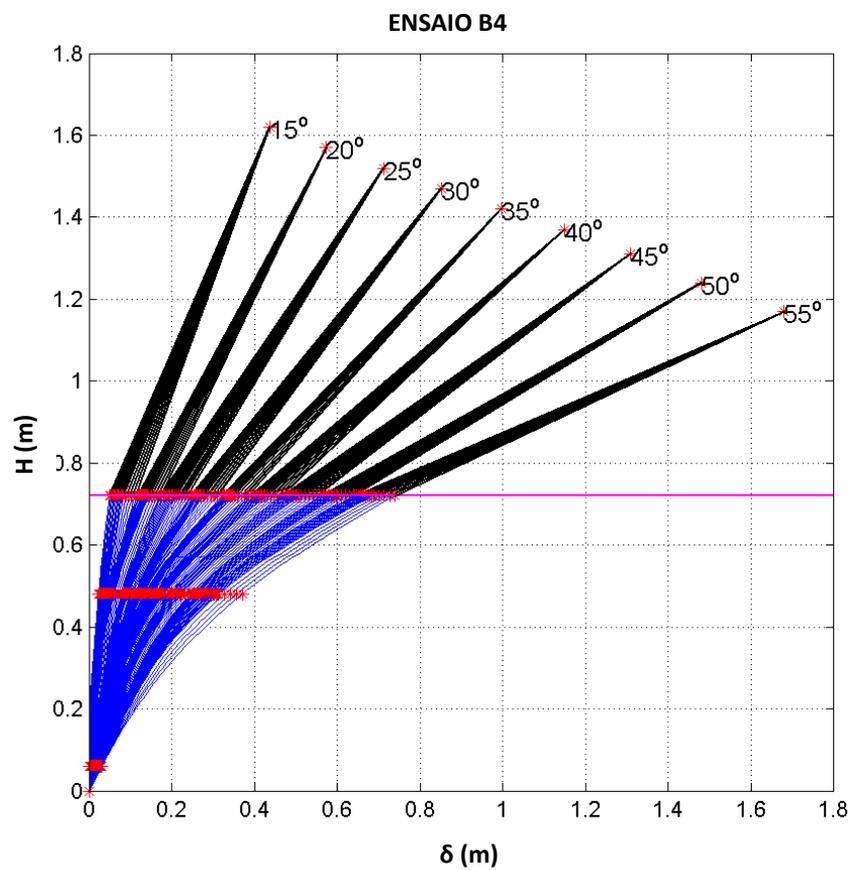
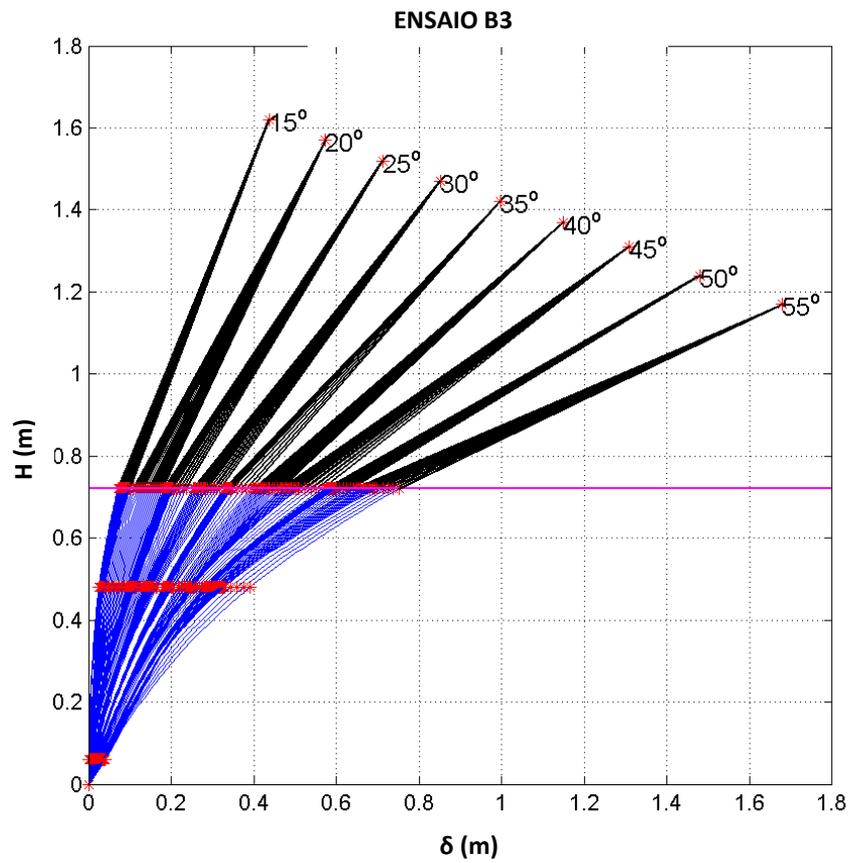
WANG, L. Z., GUO, Z., YUAN, F. **Three-Dimensional Interaction between Anchor Chain and Seabed**. Proceedings of Applied Ocean Research, v. 32, p. 404-413. 2010.

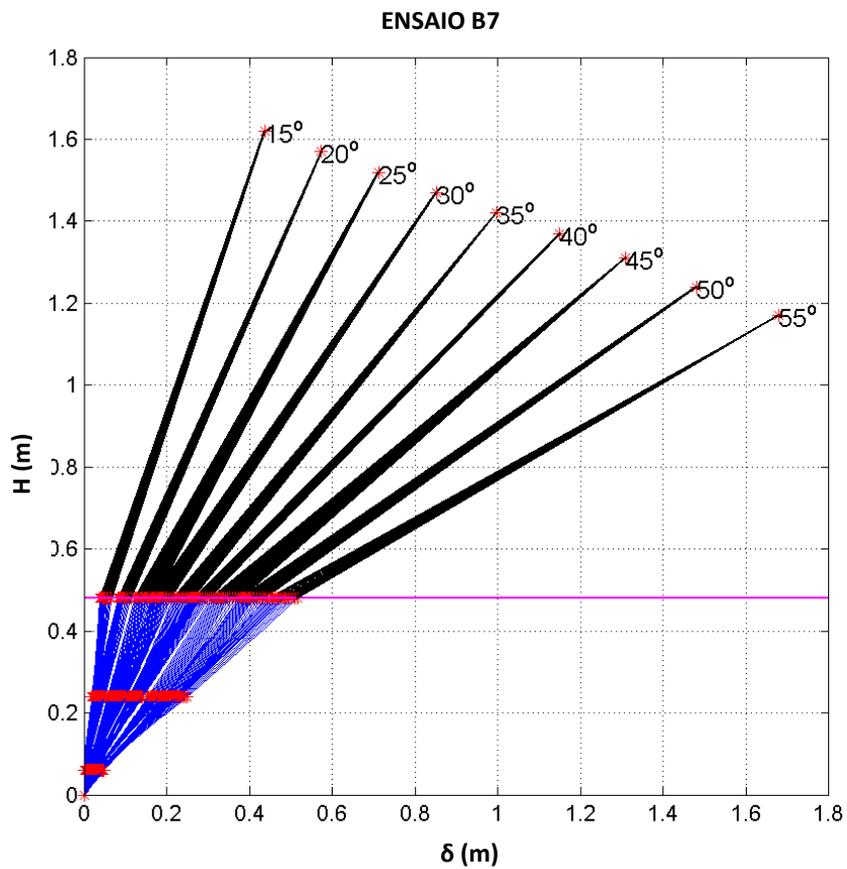
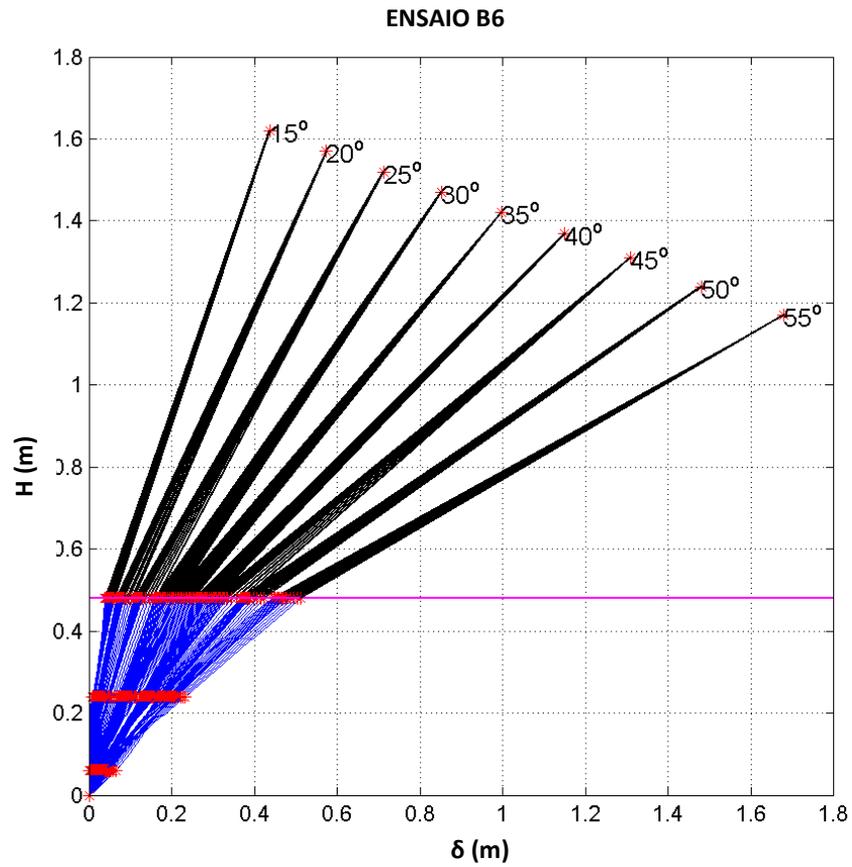
APÊNDICE A -
Geometria das catenárias obtidas experimentalmente

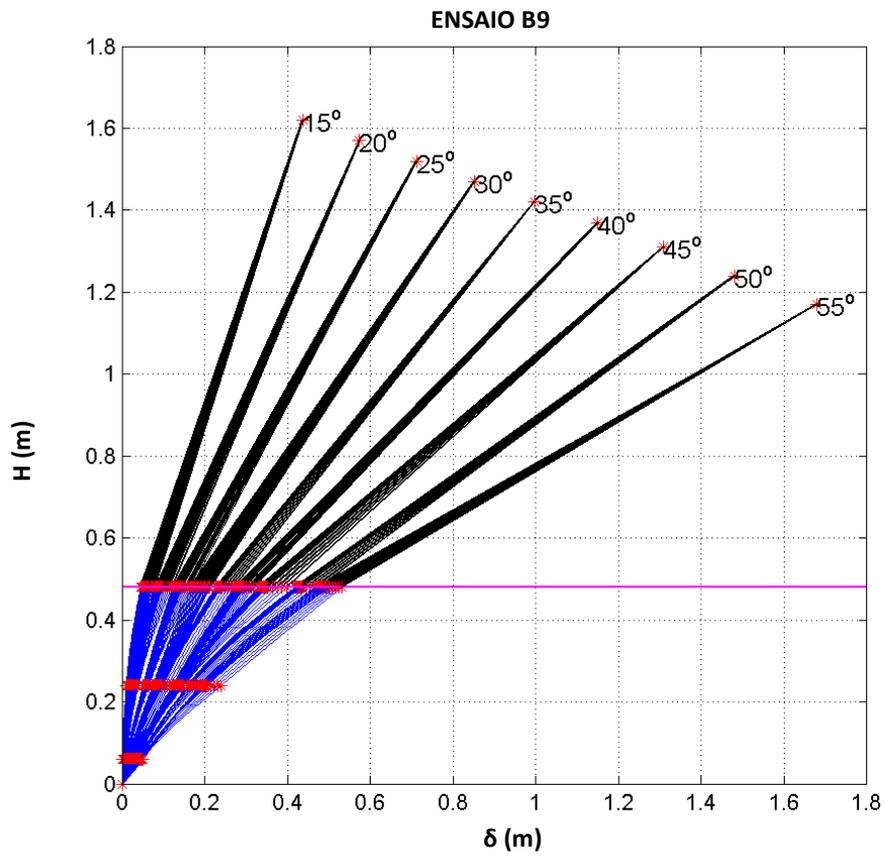
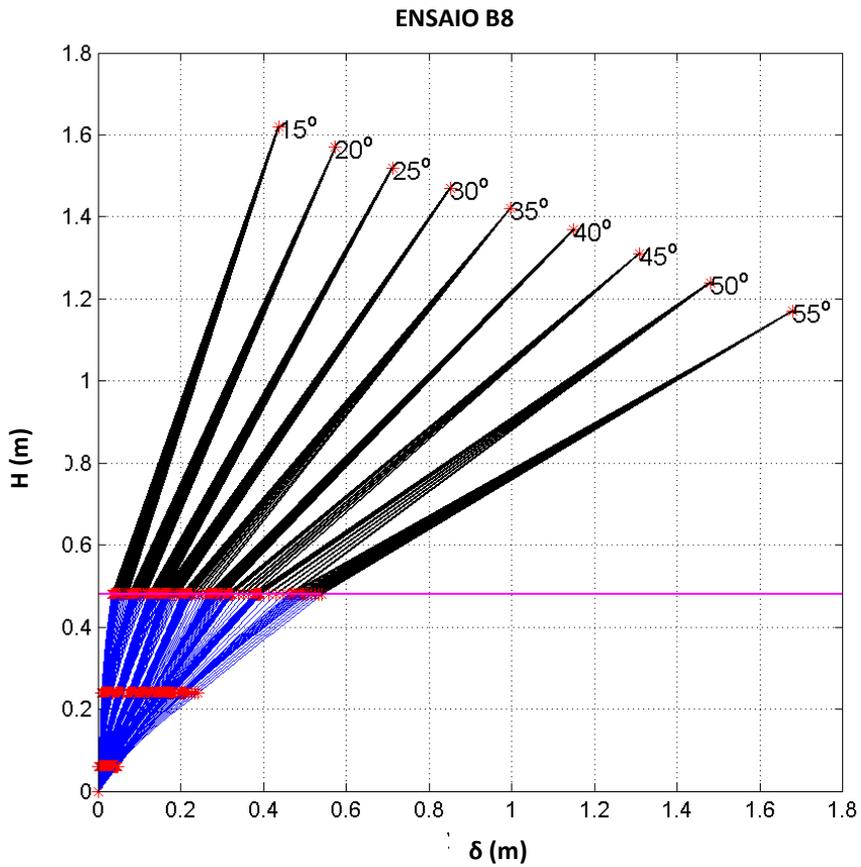


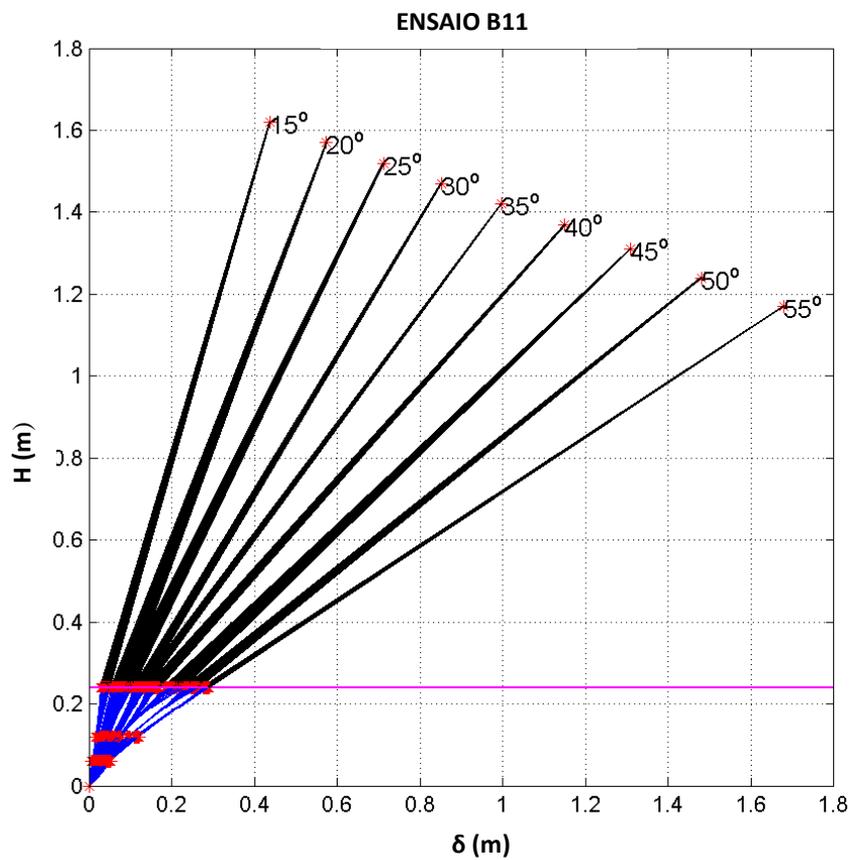
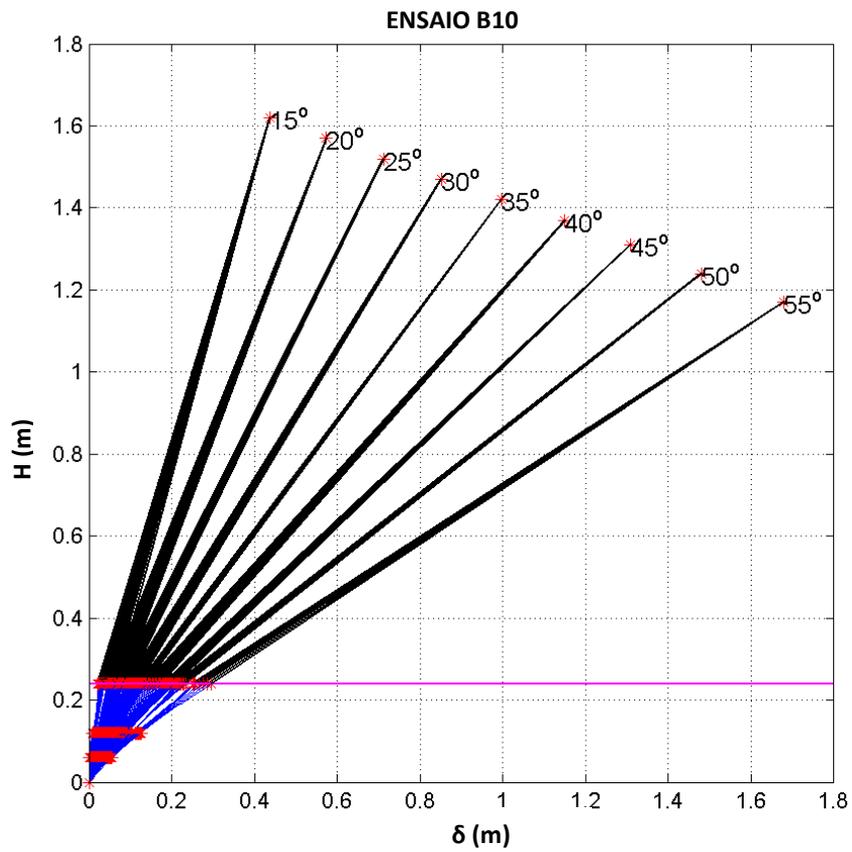


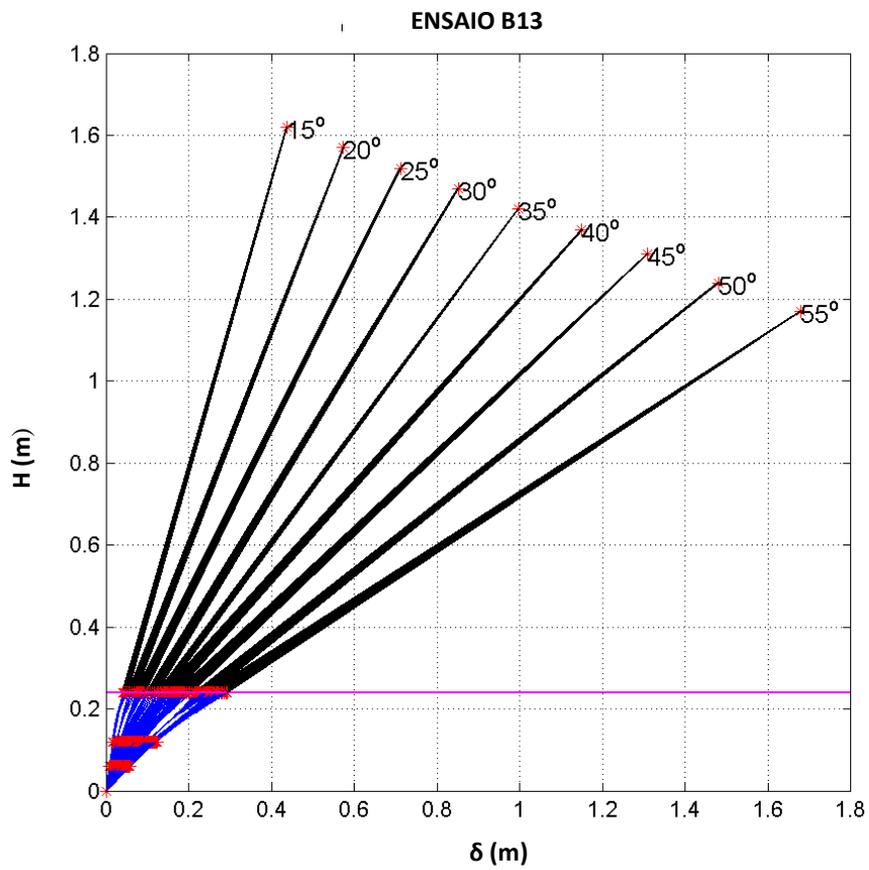
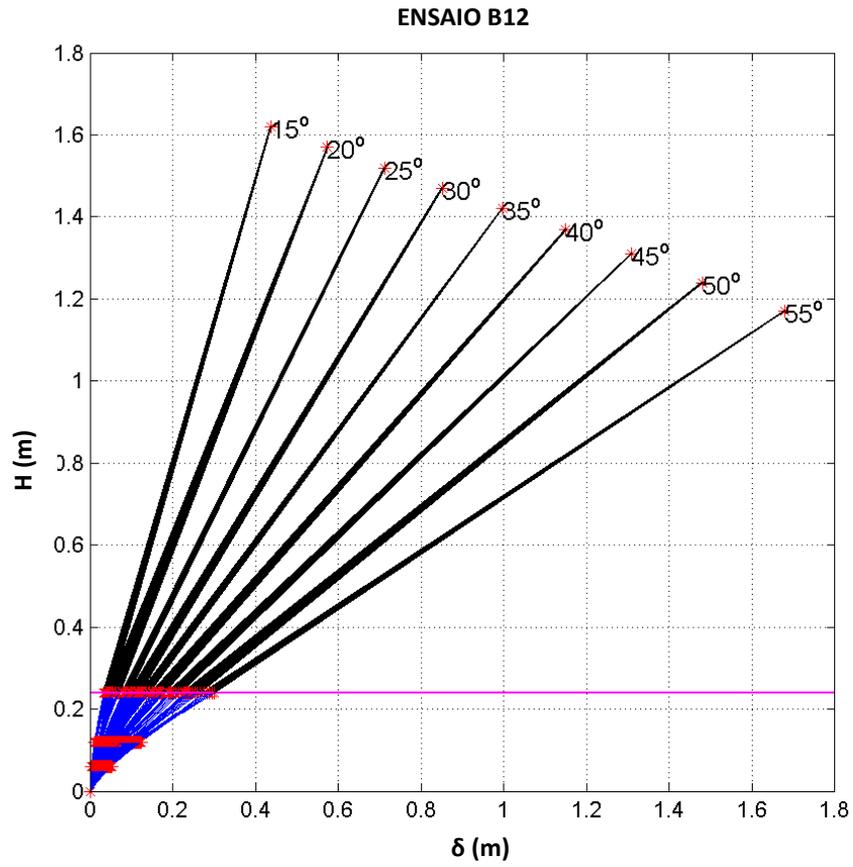




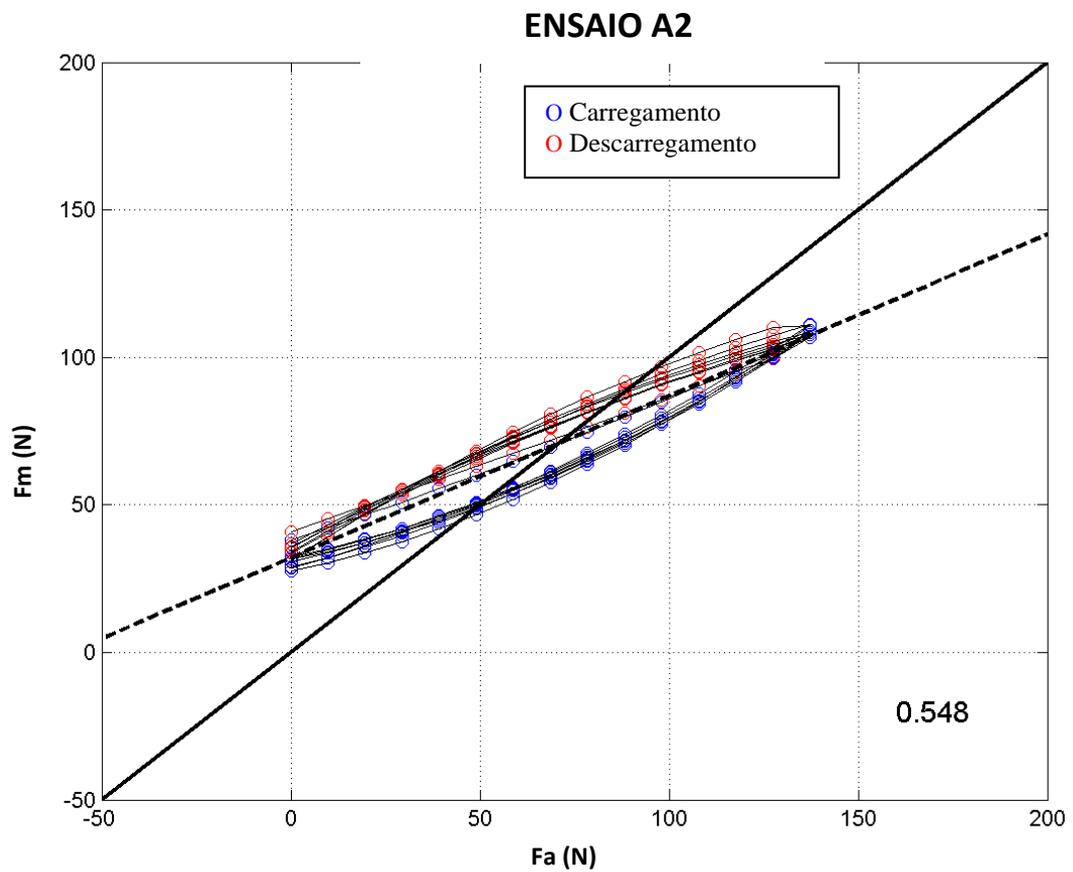
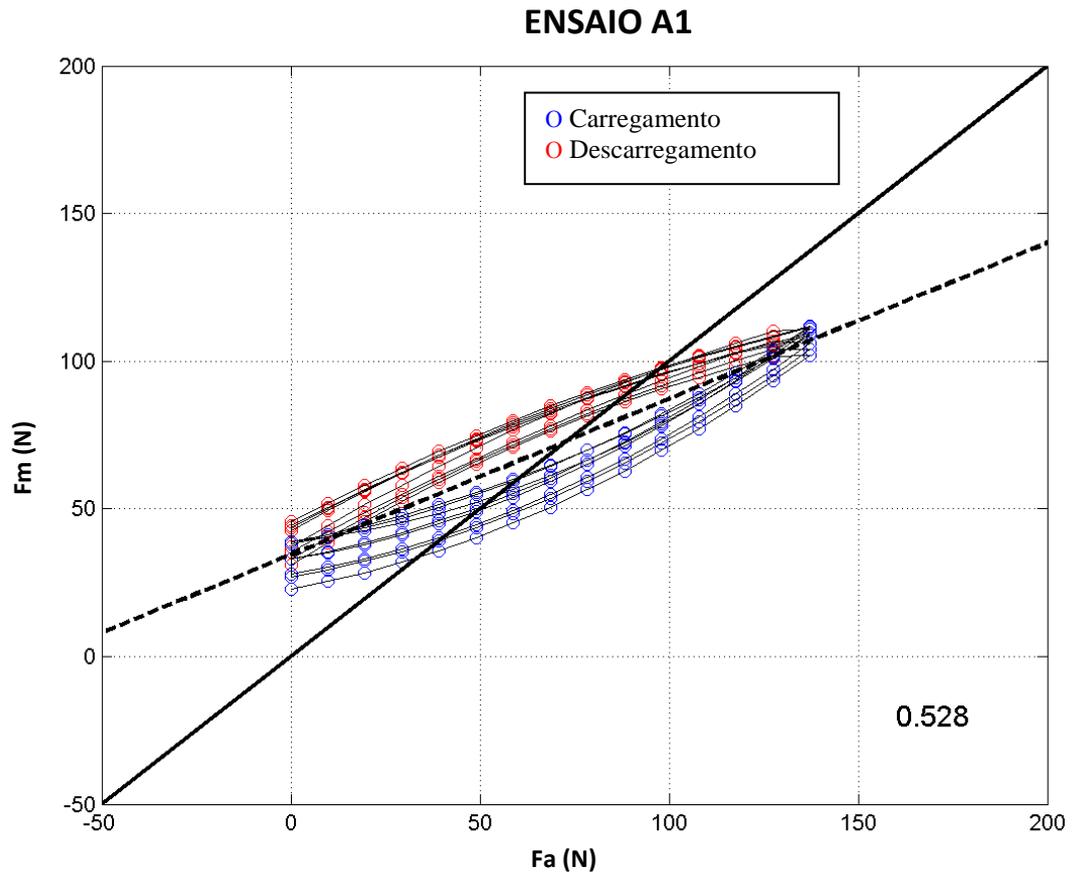


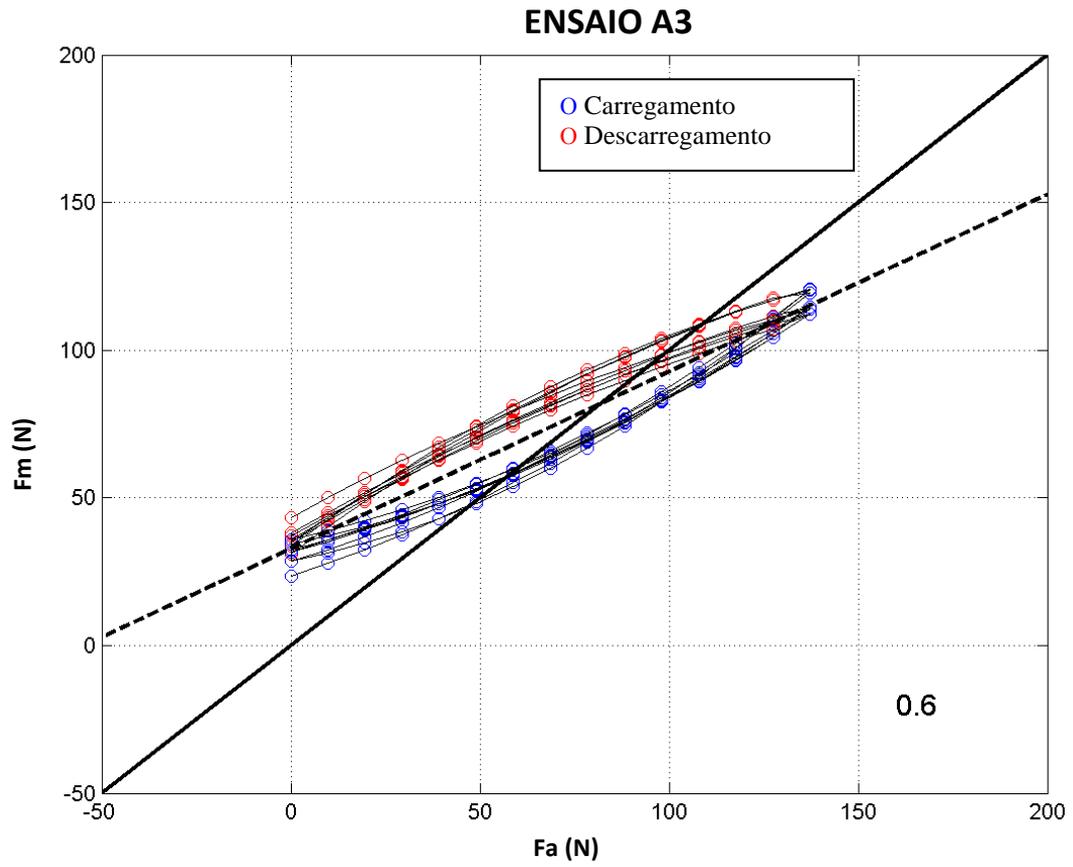


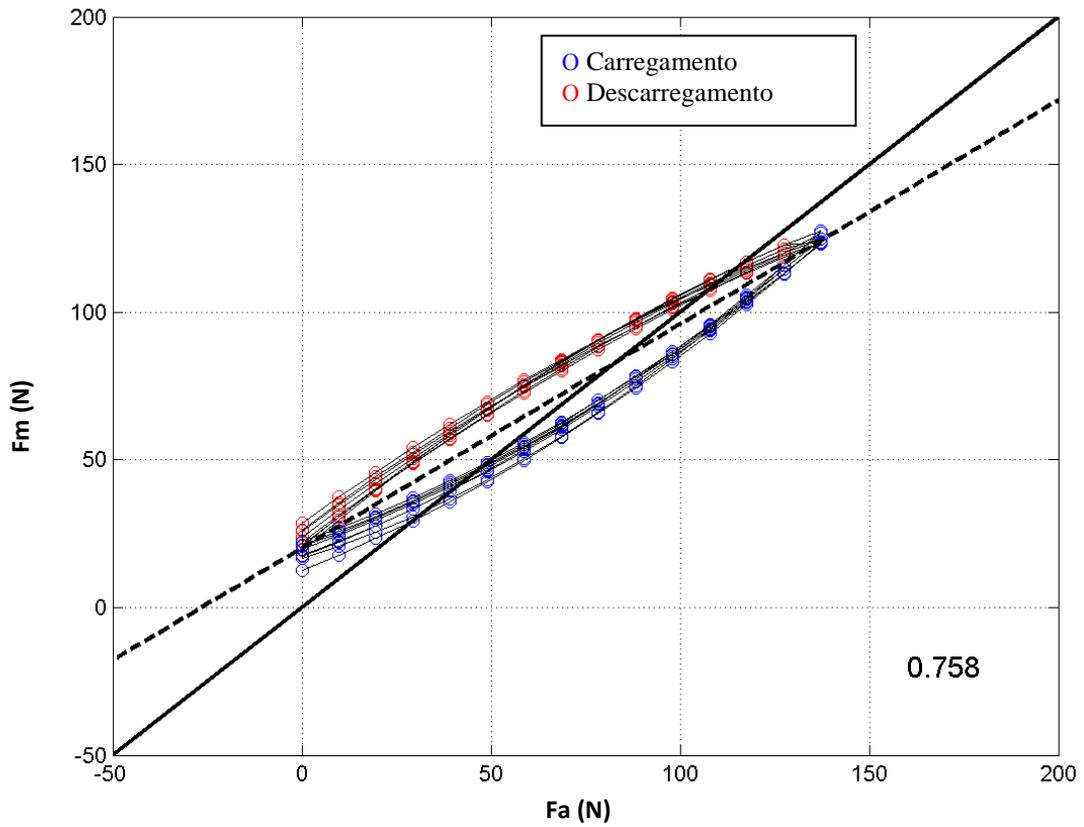




Apêndice B -
Relação entre carga aplicada e atenuação absoluta ao longo dos todos
os ciclos de carga





ENSAIO B1**ENSAIO B2**