

**ENSAIOS DE CARREGAMENTO DE *CLUSTERS* DE ESTACAS EM
CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA**

PRISCILA DE ALMEIDA CARDOSO SANTIAGO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO-UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ

NOVEMBRO-2018

ENSAIOS DE CARREGAMENTO DE *CLUSTERS* DE ESTACAS EM CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA

PRISCILA DE ALMEIDA CARDOSO SANTIAGO

"Tese apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências
para obtenção do título de Doutora em
Engenharia Civil."

Orientador: Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr.

Co-orientador: Prof. Sérgio Tibana

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

NOVEMBRO – 2018

ENSAIOS DE CARREGAMENTO DE *CLUSTERS* DE ESTACAS EM CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA

PRISCILA DE ALMEIDA CARDOSO SANTIAGO

"Tese apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências
para obtenção do título de Doutora em
Engenharia Civil."

Aprovada em 29 de novembro de 2018

Comissão Examinadora:

Prof. Alexandre Duarte Gusmão D.sc – UPE/PE

Prof. Rodrigo Martins Reis, D.sc – UENF/RJ

Prof. Aldo Durand Farfán, D.sc – UENF-RJ

Prof. Sérgio Tibana, D.sc - Co-orientador – UENF/RJ

Prof . Fernando Saboya Albuquerque Jr., D.sc - Orientador – UENF/RJ

*Ao meu marido Raymundo, meu filho Arthur e aos meus pais Nelson e
Jeane*

AGRADECIMENTOS

No campo pessoal:

Agradeço esta vitória primeiramente a Deus e a Nossa Senhora de Fátima e Nossa Senhora Aparecida, que me guardaram na fé sempre guiando meus passos e me blindaram com a Luz de Deus.

Ao meu amado marido Raymundo, que sempre esteve ao meu lado me incentivando a crescer profissionalmente. Obrigada pela sua dedicação como Pai e marido.

Aos meus queridos pais, Nelson e Jeane que em todas as minhas decisões me apoiaram, estando presentes nos momentos de dor e de alegria. Nada eu seria sem a referência de vocês.

A minha irmã Patrícia e sua família que nos momentos de dificuldade também estiveram ao meu lado.

A minha querida Terapeuta Luciane Mina, que num determinado momento dessa caminhada me ensinou a encontrar a Luz que sempre existiu dentro de mim. Você foi peça chave nessa reta final.

Agradeço também todos os meus amigos, em especial a Cássia, Deborah, Esther e Amanda que torceram por mim, choraram comigo e agora comemoram esta vitória.

No campo profissional:

Primeiramente agradeço aos mais que **Mestres**, aos **Amigos** Sérgio Tibana e Fernando Saboya, que acreditaram mais uma vez no meu potencial. Ao meu orientador Fernando Saboya não tenho palavras para agradecer todo o esforço feito para a finalização dessa tese.

Ao professor Rodrigo, que foi muito atencioso em cada ensaio realizado.

A todos os professores e colegas do doutorado que contribuíram para meu crescimento profissional.

Aos técnicos de laboratório André, Walber, Matheus, Lucas, Renato, Eberton e Milton que foram incansáveis na construção de peças, calibração de instrumentos, execução e montagem dos ensaios.

A Petrobras que através do Projeto foi responsável pelo financiamento da pesquisa na aquisição de instrumentos, peças e materiais.

Ao IFF-Quissamã, instituto ao qual sou servidora, que me proporcionou dois anos de afastamento para finalizar o Doutorado.

SUMÁRIO

RESUMO	XIV
1- INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Fundação <i>Offshore</i>	2
1.3 Modelagem Física	8
1.4 Justificativa	12
1.5 Objetivo Geral	16
1.6 Objetivos Específicos	16
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3- MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 Solo	22
3.2 Caixa Teste	23
3.3 Pluviador- Preparação da Amostra de Solo	24
3.4 Estaca (Modelo)	26
3.5 Centrífuga Geotécnica da UENF	32
3.6 Instrumentação e Aquisição de Dados	36
3.7 Descrição dos Ensaios	41
4- RESULTADOS	48
4.1 Ensaios Horizontais	49
4.2 Ensaios Verticais	50
4.3 Ensaios Inclinados	52
4.4 Determinação da Carga de Ruptura de Ensaios Horizontais e Inclinados	54
5- CONCLUSÕES	73
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

ANEXO I	82
ANEXO II	86
ANEXO III	90
ANEXO IV	93
ANEXO V	97
ANEXO VI	101
ANEXO VII	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Tabela 1.1 Leis de Escala (Madabhushi, 2014)

Tabela 3.1 Características Físicas da Areia N50

Tabela 3.2 Tabela de características do protótipo e do modelo

Tabela 4.1 Identificação dos Ensaios Experimentais

Tabela 4.2 Resumo das Cargas Máximas do ensaio $\Theta=0^\circ$

Tabela 4.3 Resumo das Cargas Máximas do ensaio $\Theta=90^\circ$

Tabela 4.4 Resumo das Cargas Máximas do ensaio $\Theta=45^\circ$

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Sistemas marítimos utilizados em águas profundas (Moreno,2005)
- Figura 1.2 Martelo a vapor executando a cravação
- Figura 1.3 Lançamento da estaca torpedo (Boom et al., 2009)
- Figura 1.4 Esquema da instalação de uma estaca de sucção (Sukumaran, 1998)
- Figura 1.5 Exemplos de Âncoras VLA (Randolph et al., 2005)
- Figura 1.6 Esquema de um modelo sujeito à aceleração em centrífuga
- Figura 1. 7 Cenário padrão de produção no Pólo Pré-sal da Bacia de Santos com FPSO
- Figura 1.8 Estaca Torpedo T-120 em sua versão atual a bordo (Fonte RT TEO n°118/2015)
3. 1 Curva granulométrica da areia N50 (Santiago, 2010)
- Figura 3.2 Caixa Teste
- Figura 3.3 Pluviador
- Figura 3.4 Conjunto de discos perfurados
- Figura 3.5 Peça acoplada na cabeça da estaca com rótula e cabo de aço
- Figura 3.6 Configuração do cabo de aço nas estacas passando pelo elo
- Figura 3.7 Haste de aço rosqueada conectada a célula de carga
- Figura 3.8 Ensaio de tração do cabo de aço na prensa
- Figura 3.9 Gabarito em acrílico
- Figura 3.10 Posicionamento das estacas antes da cravação
- Figura 3.11 Nivelamento das estacas cravadas
- Figura 3.12 Distribuição dos diâmetros do modelo em relação ao campo gravitacional
- Figura 3.13 Vista da centrífuga com as plataformas
- Figura 3.14 Unidade HPU-MTS- a) controlador 407 MTS, b) bomba hidráulica, c) *manifold*
- Figura 3.15 Vista da sala de controle da centrífuga
- Figura 3.16 Célula de Carga ELH-TC590
- Figura 3.17 Transdutores lineares potenciométricos modelo GEFTRAN Brasil PZ34-S-250
- Figura 3.18 Transdutores de deslocamentos potenciométricos (19359 e 19994) modelo WPS-750-MK30-P10

Figura 3.19 LVDTs utilizados nos ensaios de carregamento inclinado a 45°

Figura 3.20 Atuador Hidráulico Milwaukke Cylinder modelo H71 na posição horizontal

Figura 3.21 a) Aferição do plug formado após a cravação, b) retirada do plug com aspirador de pó

Figura 3.22 Montagem final do ensaio de carregamento horizontal

Figura 3.23 Montagem final do ensaio de carregamento vertical

Figura 3.24 Montagem final do ensaio de carregamento inclinado

Figura 4.1 Diagrama carga x deslocamento do ensaio horizontal

Figura 4.2 Diagrama carga x deslocamento do ensaio vertical

Figura 4.3 Diagrama carga x deslocamento horizontal do ensaio inclinado

Figura 4.4 Diagrama carga x deslocamento vertical do ensaio inclinado

Figura 4.5 Curva Hiperbólica

Figura 4.6 Ajuste hiperbólico

Figura 4.7 Ajuste Hiperbólico- carregamento horizontal versus deslocamento (estaca isolada e *clusters*)

Figura 4.8 Ajuste Hiperbólico- carregamento inclinado a 45°, componente horizontal versus deslocamento (estaca isolada e *clusters*)

Figura 4.9 Ajuste Hiperbólico- carregamento inclinado a 45°, componente vertical versus deslocamento (estaca isolada e *clusters*)

Figura 4.10 Eficiência dos ensaios horizontal e inclinado em relação aos espaçamentos no *cluster*

Figura 4.11 Superfícies de ruptura do protótipo

Figura 4.12 Diagrama Polar P_{θ}/P_u com dados experimentais

Figura 5.13 Diagrama polar P_{θ}/P_u com dados experimentais e semi-empíricos proposto por Patra *and* Pise (2006)

Figura 4.14 Diagrama $\theta \times P_{\theta}$ comparando os resultados experimentais com os resultados utilizando modelo de Prata *and* Pise (2006)

Figura 4.15 Diagrama polar P_{θ}/P_u com dados experimentais e semi-empíricos proposto por Das et. al (1976)

Figura 4.16 Diagrama $\theta \times P_{\theta}$ comparando os resultados experimentais com os resultados utilizando modelo de Das et al (1976)

Figura 4.17 Diagrama polar P_{θ}/P_u com dados experimentais e semi-empíricos proposto por Chattopadhyay *and* Pise (1986b)

Figura 4.18 Diagrama $\Theta \times P_{\Theta}$ comparando os resultados experimentais com os resultados utilizando modelo de Chattopadyay *and* Pise (1986)

Figura 4.19 Ilustração dos efeitos de sombra e borda no carregamento lateral de um grupo de estacas. Fonte: Elhakim et. al. (2014).

Figura 4.20 Carga Horizontal do protótipo versus espaçamento entre as estacas

Figura 4.21 Carga Vertical do protótipo versus espaçamento entre as estacas

Figura 4.22 Carga Resultante do protótipo versus espaçamento entre as estacas

LISTA DE SÍMBOLOS

a_r - aceleração radial

C_C - coeficiente de curvatura

C_U - coeficiente de uniformidade

D - diâmetro da estaca

D_{10} - diâmetro efetivo do solo

D_{50} - diâmetro médio do solo

D_r - densidade relativa

$e_{máx}$ - índice de vazios máximo

$e_{mín}$ - índice de vazios mínimo

E_m - módulo de elasticidade do modelo

E_p - módulo de elasticidade do protótipo

F_i - força inercial

F_v - Carga vertical

F_h - Carga horizontal

F_{prot} - carga do protótipo

F_{mod} - carga do modelo

G - densidade real dos grãos

g - aceleração gravitacional terrestre

γ_n - densidade natural do solo

h - profundidade de cravação da estaca

I_m - momento de inércia do modelo

I_p - momento de inércia do protótipo

K - fator de escala

L - comprimento da estaca

M - massa do protótipo

m - massa do modelo

N_g - fator que multiplica a gravidade terrestre para a centrífuga

η - eficiência

P_θ - Carregamento oblíquo

P_u - permanência axial líquida

P_L - resistência lateral líquida

r - distância radial

S- distância entre as estacas

W - peso próprio

w - velocidade angular

v_t - velocidade tangencial

Θ - ângulo de inclinação

RESUMO

Com o avanço da exploração, o desenvolvimento tecnológico na área de ancoragens das unidades marítimas localizadas em zonas de grande profundidade, vem crescendo, principalmente por ser um mecanismo de posicionamento das unidades offshore de exploração de petróleo, que estão sujeitos a carregamentos dinâmicos de ondas, correntezas e ventos. Para isso é necessário um sistema de ancoragens que alie boa resposta às solicitações e seja ao mesmo tempo factível em termos de logística de transporte. Assim torna-se mais interessante trabalhar com arranjos de ancoragens em lugar de uma única unidade de grande capacidade de permanência. Dessa maneira, a motivação deste trabalho foi realizar investigações experimentais em centrífuga geotécnica, com o objetivo de identificar e quantificar os efeitos de interação em *clusters* (arranjos) de duas estacas instaladas em areia fofa, submetidas a carregamentos multidirecionais. Neste estudo busca-se avaliar a resistência global do sistema de ancoragem, as resistências individuais de cada ponto fixo, a distribuição de forças e os possíveis modos de ruptura. Os modelos físicos utilizaram uma areia industrial normatizada do IPT (N50), na condição seca e densidade no estado fofo ($D_r=35\%$). As estacas foram feitas de alumínio e posicionadas em três diferentes arranjos em função do espaçamento: 3D, 2D e 1,5D (onde D é o diâmetro da estaca, $D=2,85\text{cm}$). Após a cravação, o modelo foi submetido a uma gravidade modificada de 24xg. Foram realizados um total de doze ensaios variando o ângulo de carregamento (0° , 90° e 45°). Para as três inclinações ensaiadas, obteve-se um ganho significativo na carga de permanência do arranjo do *cluster* em relação à estaca isolada, porém não diretamente proporcional ao número de estacas do arranjo. O ensaio que obteve maior carga relativa de permanência do *cluster* foi o carregamento vertical, onde o arranjo superou 70% da carga da estaca isolada, enquanto que os ensaios de carregamento inclinado e de carregamento horizontal apresentaram 50% e 40% de ganho, respectivamente. Para os três espaçamentos ensaiados, a maior eficiência foi àquele referente a duas vezes o diâmetro da estaca. Isso mostra que estacas que são instaladas muito próximas podem sofrer o efeito de borda diminuindo assim a resistência lateral de cada estaca isolada.

PALAVRAS-CHAVE: *cluster* de estacas, carregamento, centrífuga geotécnica

ABSTRACT

With the advance of exploration, the technological development in anchoring of maritime units has been increasing, mainly because it is a mechanism of positioning of the units of offshore oil exploration that are subject to dynamic loads of waves, currents and winds. For these cases, it is necessary an anchoring system that takes into account not only the great pullout capacity, but at the same time, being light and feasible to be transported to the field. Therefore, The purpose of this work was to perform experimental investigations in geotechnical centrifuge, aiming identifying and quantifying the interaction effects in clusters of two piles installed in loose sand deposit and submitted to multidirectional loads. This study intends to evaluate the global pullout resistance of the anchoring, the individual bear capacity of each fixed point, the load distribution and the possible modes of failure. The tested physical models were assembled using IPT industrial sand (N50) in dry condition and loose state density ($D_r = 35\%$). The pipe piles were made of aluminum and were spaced in three different configurations: 3D, 2D and 1,5D (D is the pile diameter, $D = 2.85\text{cm}$). After installing the piles, the model was subjected to a modified gravity of $24xg$, and they were loaded by means a hydraulic actuator. A total set of twelve cluster were tested by varying the loading angle of the clusters (0° , 90° and 45°). For the three inclinations tested, a significant gain was obtained in the permanence load of the cluster arrangement in relation to the isolated pile but not directly proportional to the number of pile cuttings. The test that obtained the highest relative load of permanence of the cluster was the vertical load, where the arrangement exceeded 70% of the load of the isolated pile, while the tests of inclined loading and horizontal loading presented 50% and 40% of gain, respectively. For the three spacings tested, the greatest efficiency was that referring to twice the diameter of the pile. This shows that piles that are installed too close can suffer the edge effect thereby decreasing the lateral resistance of each insulated pile.

Keyword: cluster of pile, loading, geotechnical centrifuge

1- INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Com a descoberta de novos campos no Brasil e no mundo, a exploração *offshore* de óleo e gás tem buscado perfurações em lâminas d'água cada vez mais profundas, necessitando com isso de novas tecnologias, métodos científicos e mão de obra especializada.

Os sistemas *offshore* são compostos por unidades marítimas de exploração, produção e/ou armazenamento de óleo que podem ser classificadas em Unidades Fixas (Jaquetas, Torres Complacentes, Plataformas de Gravidade e Plataformas Auto-Elevatórias) e Unidades Flutuantes (Plataformas Semi-Submersível, Plataformas de Pernas Tensionadas, Plataformas Spar e Navios Ancorados). Na Figura 1.1 é apresentado um esquema com os principais sistemas utilizados em águas profundas.

Segundo Chakrabarti (1987), as unidades marítimas de produção *offshore* tiveram seu início com as Plataformas Fixas na Venezuela, posteriormente sendo expandidas para o Golfo do México com técnicas mais avançadas, seguindo com o avanço tecnológico para o Mar do Norte até chegar a África do Sul, Brasil e Ásia.

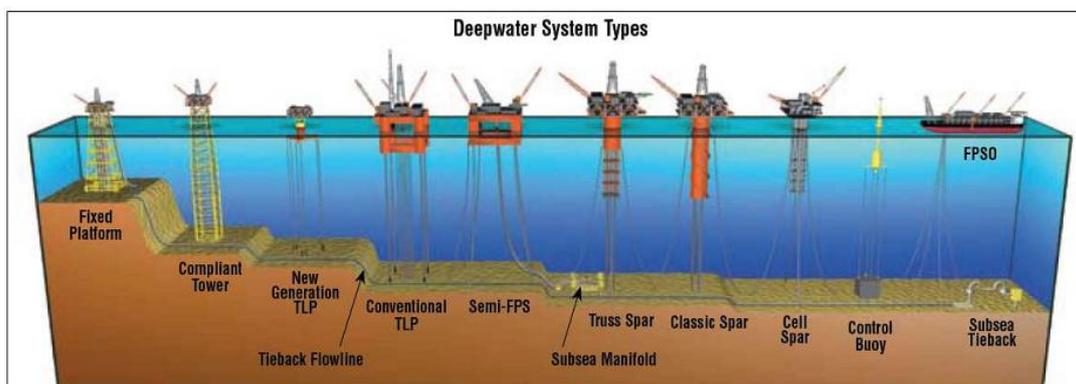


Figura 1.1 Sistemas marítimos utilizados em águas profundas (Moreno,2005)

Com o avanço da exploração para lâminas d'água cada vez mais profundas, o desenvolvimento tecnológico na área de ancoragem das unidades marítimas vem crescendo, principalmente por ser um mecanismo de posicionamento das unidades no campo de exploração que estão sujeitos a carregamentos dinâmicos de ondas, correntezas e vento.

As fundações de estruturas de grande porte, como jaquetas, exigem uma maior atenção no seu dimensionamento, pois qualquer problema de instalação ou dano gerado pode gerar problemas estruturais com custos altíssimos de reparação. Muitos estudos mostram que o dano devido à cravação contribui no cálculo da vida da estaca. Contudo, as normas regulamentadoras de projetos *offshore* não dão a devida importância na escolha dos parâmetros adequados para dimensionamento das estacas.

O sistema de ancoragem utilizado em unidades flutuantes pode ser formado por amarras, cabos de aço, cabos sintéticos (poliéster) ou uma combinação desses. Na extremidade das ancoragens são utilizadas âncoras ou estacas. Dentro desse contexto, a estaca torpedo é um tipo de fundação que foi desenvolvida pela Petrobras e vem sendo amplamente utilizada em ancoragens das unidades *offshore*.

As estacas torpedo foram desenvolvidas pela Petrobras por volta de 1996 e patenteadas em 2003, com o objetivo de reduzir custos na fabricação e instalações de estruturas de ancoragem utilizadas em águas profundas, além de reduzir interferência com estruturas locais e conseguir melhor precisão no lançamento e cravação (Mastrangelo et al., 2003). Segundo Lavieri (2011), as estacas torpedo foram desenvolvidas durante o PROCAP200 (programa plurianual de desafios), com o objetivo de operacionalizar sistemas de produção de petróleo e gás em lâminas d'água de 200m.

1.2 Fundação *Offshore*

A fundação *offshore* é compreendida como o embasamento dado por elementos estruturais que tem a função de transmitir cargas da estrutura ao

terreno onde ela se apoia ou é fixada. Estes elementos permitem as unidades marítimas conservar sua posição e estabilidade no mar, transmitindo confiabilidade e segurança nos processos operacionais.

O conceito de fundação *offshore* foi estendido para também comportar os chamados pontos de fixação ou pontos fixos da ancoragem, onde as linhas de ancoragem são fixas na sua extremidade inferior por meio de estacas de sucção, âncoras com resistência vertical, ou estacas de fundeio. Desse modo, estas fundações podem conter sapatas, âncoras e / ou estacas responsáveis pela fixação das estruturas em solo oceânico.

As fundações *offshore* devem ser projetadas para suportar carregamentos estáticos, cíclicos, periódicos e transientes de forma que a unidade flutuante ou fixa não sofra vibrações e /ou deformações excessivas.

A escolha da fundação mais adequada está ligada ao conhecimento dos esforços atuantes sobre a edificação, as características do solo e dos elementos estruturais que formam as fundações. Assim, analisa-se a possibilidade de utilizar os vários tipos de fundação, em ordem crescente de complexidade e custos, pois ao se projetar uma fundação, a engenharia leva em consideração a capacidade de suportar carregamentos laterais e axiais compatível com as cargas aplicadas e que o fator carga-deslocamento deve relacionar-se diretamente com as condições de trabalho da plataforma, e as tensões deformações do solo, além de certificar-se da viabilização de sua instalação.

A classificação da fundação é realizada de acordo com a profundidade de cravação e sua forma de transmissão de carga. Quanto ao tipo pode-se classificá-las em Fundações Rasas e Fundações Profundas.

- Fundações Profundas

São fundações geralmente compostas por estacas, que são peças tubulares de seção transversal reduzida quando comparadas com o comprimento e amplamente utilizadas para transmitir esforços provenientes das estruturas para as camadas mais profundas do maciço.

As estacas de estruturas *offshore* são comumente de aço e apresentam relação diâmetro/espessura em torno de 30. São muito usadas em plataformas, devido à sua resistência, funcionalidade e transferência de cargas, onde a interface solo-estaca depende diretamente do método de instalação adotado.

Abaixo serão relacionadas as estacas mais utilizadas em unidades marítimas:

- a) Estacas cravadas por percussão (DP): são estacas metálicas de ponta aberta ou fechada (ponteira em aço forjado) cravadas à percussão com auxílio de martelos a vapor, a diesel ou hidráulicos. Possuem grande comprimento e pequeno diâmetro (Figura 1.2).



Figura 1.2 Martelo a vapor executando a cravação

- b) Estacas cravadas e grauteadas (DGP): dependendo do tipo de solo, esta estaca pode até dobrar a sua resistência devido ao atrito lateral. É executada em duas etapas, primeiramente ocorre a cravação em si e em seguida é injetada uma calda de cimento na interface lateral solo-aço.

c) Estacas perfuradas e grauteadas (DGP): Estaca que simula a primeira fase de perfuração de um poço, tendo um trecho de amarras ligado ao meio da seção do revestimento. Tem uma tecnologia bem consolidada e confiável, mas geralmente não é tão amplamente utilizada pelo alto custo da unidade de perfuração (sonda). São adotadas quando estacas cravadas possuem baixa resistência. Podem ser construídas em um (abertura de pré-furo) ou dois estágios, dependendo do método construtivo adotado.

d) Estacas injetadas (IP): é uma solução alternativa para o uso de estacas cravadas, caso esta apresente penetração inferior à mínima requerida em projeto. Possuem trecho inicial cravado e um final, perfurado.

e) Estacas torpedo (TP): Tipo de estaca que apresenta penetração dinâmica, com formato cilíndrico metálico de ponta fechada, dotada ou não de aletas e preenchida internamente com sucata de aço e/ou concreto. É cravada no solo por penetração dinâmica, pela ação do seu peso próprio, caindo por gravidade após o lançamento em queda livre de uma altura calculada. Admite cargas verticais, reduzindo significativamente o raio de ancoragem da UEP (Unidade Estacionária de Produção). Possui olhal (interno ou externo) em seu topo, permitindo assim a aplicação de cargas horizontais. Na Figura 1.3 é apresentado o lançamento de uma estaca torpedo.



Figura 1.3 Lançamento da estaca torpedo (Boom et al., 2009)

As Estacas Torpedo podem alcançar relativamente grandes profundidades de penetração (podendo chegar de cinco a seis vezes seu comprimento) em depósitos de argilas moles normalmente adensadas, este tipo de material é encontrado com relativa frequência na Bacia de Campos, dessa forma aproveita a resistência ao cisalhamento encontrada em camadas de solo mais profundas para aumentar sua capacidade de suporte (O'Loughlin et al., 2004a).

f) Estacas de Sucção: são estacas, com forma de um cilindro oco, apresentando dimensões de 12 a 15 m de altura por cerca de 5 m de diâmetro, com uma extremidade fechada e outra aberta. São cravadas no solo marinho através do vácuo realizado por uma bomba centrífuga de sucção, utilizando assim o conceito de diferencial de pressão hidrostática, constantemente monitorada durante a instalação, juntamente com a verticalidade e a taxa de penetração. Na Figura 1.4 é apresentado um esquema da instalação de uma estaca de sucção.

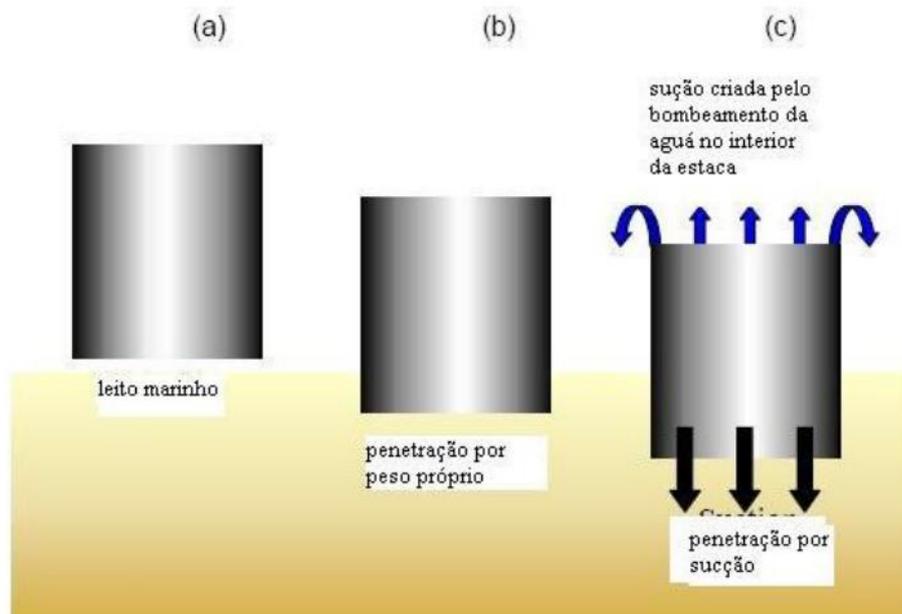


Figura 1.4 Esquema da instalação de uma estaca de sucção (Sukumaran, 1998)

- Fundações Rasas

São fundações geralmente adotadas para transferir cargas oriundas da plataforma de gravidade ao solo marinho. São técnicas utilizadas para elevar a capacidade de carga do solo e aumentar a estabilidade contra o tombamento e o deslizamento da estrutura.

As âncoras resistem, basicamente, a esforços de tração podendo ser usadas tanto em unidades flutuantes como em unidades fixas (em modo auxiliar durante posicionamento, caso de *Jack-ups*). Os esforços suportados pela âncora dependem da trajetória da linha de ancoragem podendo ser horizontais (catenária) ou verticais (*taut-leg*). Devido à diversidade de modelos, as âncoras podem ser divididas em grupos distintos de acordo com sua geometria, capacidade de carga e método de instalação.

a) Âncoras de peso (P): são âncoras de gravidade que possuem baixa eficiência. A sua componente vertical tem reação dada pelo peso submerso utilizado como âncora e pela sucção que ocorre entre o solo e a base do corpo. Já a componente horizontal, conhecida como força de arrasto, é resistida pela adesão na interface solo-superfície (fricção) e pelo empuxo passivo localizado na área da parte enterrada no solo marinho.

b) Âncoras convencionais (DEA): modelos tradicionais que foram evoluídos a partir das âncoras usadas em navios. São cravadas com o auxílio de uma embarcação através do arraste no solo marinho logo abaixo da superfície, sem penetração profunda. Em princípio, as cargas que chegam à âncora devem ser horizontais, pois este tipo de âncora não resiste a carregamentos verticais.

c) Âncoras verticais (VLA – Vertical Load Anchor): amplamente utilizadas em ancoragens tipo *taut-leg*, por suportarem carregamentos verticais devido a seu formato. Possuem boa capacidade de carga e confiabilidade no processo de instalação. São cravadas através de arraste no maciço marinho e apresentam uma forma parecida com a de uma arraia ou de uma enxada (Figura 1.5).



Figura 1.5 Exemplos de Âncoras VLA (Randolph et al., 2005)

Este trabalho faz parte do projeto firmado entre a Petrobras e a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), através de ensaios em gravidade modificada utilizando modelos reduzidos no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV-Centrífuga). Este projeto denomina-se como Planejamento Inicial de Experimentos de Modelagem Centrífuga de Grupos de Estacas e visa o desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias para sistemas de ancoragem em unidades *off-shore*.

1.3 Modelagem Física

A modelagem física simula um evento real sob condições controladas, sendo uma ferramenta muito utilizada para avaliar hipóteses de modelos reduzidos e observar fenômenos que ocorrem nos protótipos. Se dois processos físicos são semelhantes, é possível prever o comportamento de um deles quando se é conhecido o comportamento do outro. Em trabalhos experimentais os dois processos físicos são o protótipo e o seu modelo. Em laboratório é usual utilizar o modelo em escala geométrica reduzida, pela facilidade de ensaiá-lo.

Segundo Carneiro (1993), a primeira condição de semelhança física é a geométrica, porém esta não é suficiente. Existem processos em que semelhança física implicará em escalas de tempos diferentes. Em experimentos com modelos, define-se como fator de escala a magnitude da grandeza no modelo e no protótipo.

Com respeito a ensaios em modelos reduzidos, Langhaar, 1951 (*apud* Carneiro, 1993) descreve que os resultados da análise dimensional indicam que, se o mesmo solo é usado por ambos, modelo e protótipo, uma variação em tamanho de modelo pelo fator de escala de k , não causa variação de tensão, enquanto que deslocamentos, forças e torques são alterados por fatores k , k_2 e k_3 , respectivamente.

A centrífuga geotécnica é uma ferramenta de modelagem física disponível na engenharia que viabiliza o estudo e a análise de problemas reais, utilizando como material, o próprio solo. Segundo Taylor (1995), os primeiros ensaios em centrífuga foram realizados por Bucky, em 1931 na Universidade de Colúmbia, com aplicações à estabilidade de minas em rocha. Em 1936, Pokrovskil *and* Fiodorov publicaram um artigo sobre centrífuga geotécnica na Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações em Harvard.

Em experimentos em centrífuga, o modelo é uma escala reduzida do protótipo e, portanto, os eventos no protótipo e no modelo devem ser semelhantes. Esta semelhança precisa seguir leis de escala apropriadas. O princípio básico dos ensaios em centrífuga, consiste em submeter o modelo a uma força inercial de magnitude igual à força gravitacional experimentada pelo protótipo (Schofield, 1980). Para entendimento deste princípio, faz-se necessário conhecer as componentes que atuam em um modelo sujeito à aceleração em centrífuga (Figura 1.6).

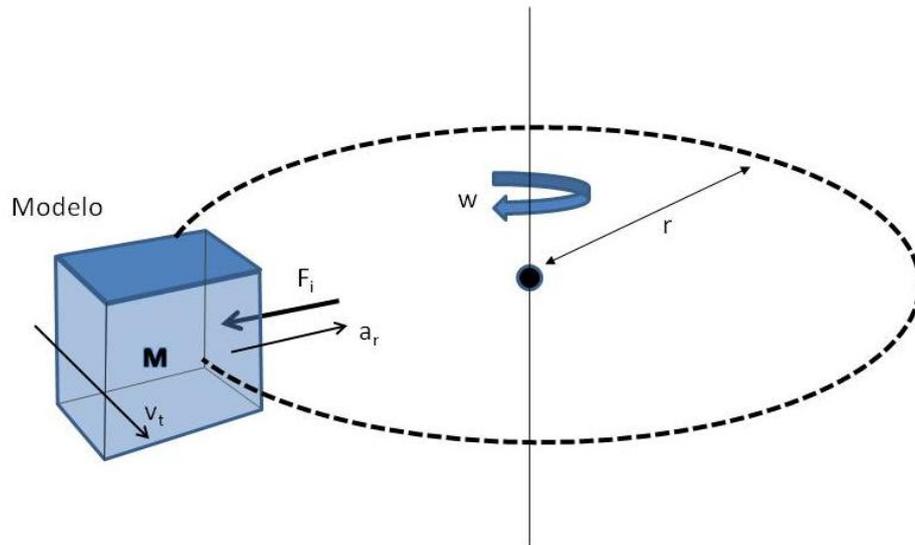


Figura 1.6 Esquema de um modelo sujeito à aceleração em centrífuga

Onde,

m - massa do modelo

w - velocidade angular

$v_t = rw$ (velocidade tangencial)

$a_r = rw^2$ (aceleração radial)

$F_i = ma_r$ (força inercial que age no modelo)

A força gravitacional (representada pelo peso próprio W) atua sobre o corpo (protótipo) que está sobre a superfície terrestre. Para que o modelo represente o protótipo, é necessário que:

$$F_i = W \quad (1.1)$$

Então:

$$mrw^2 = Mg \quad (1.2)$$

Sendo,

M - massa do protótipo

r - distância radial entre o centro da centrífuga e o centro de massa do modelo

Se $m = NM$, onde N é o fator de escala,

$$r\omega^2 = g/N \quad (1.3)$$

Pela Equação 1.3, é mostrado que em modelos acelerados dentro da centrífuga e, portanto, submetidos a um campo inercial de aceleração radial, a gravidade é aumentada em N vezes a gravidade terrestre (Schofield, 1980 e Taylor, 1995). As principais relações de escala entre o modelo e o protótipo são apresentadas na Tabela 1.1.

O efeito do tamanho das partículas é um fator que deve ser levado em consideração, pois na maioria dos estudos estas não são reduzidas no mesmo fator de escala. Para o comportamento do modelo isso pode ou não ser significativo dependendo também do tamanho das partículas, do modelo e dos vazios encontrados no solo. Se o tamanho das partículas e os vazios do modelo do solo são muito menores do que a grandeza da fundação ou estrutura a ser analisada, a diferença no comportamento é muito pequena e não interfere no comportamento do modelo. No entanto, não é apropriado utilizar modelos reduzidos para analisar superfícies de ruptura que são influenciadas pelas partículas do solo. Os resultados de um estudo realizado pela Oversen (1979) indicam que, onde a relação entre o diâmetro do grão é inferior a 15, indica que desvios do comportamento do modelo podem ocorrer. Tatsuoka et al. (1993) sugerem que uma constante limitando a razão entre o tamanho das partículas pode ser excessivamente simplista e uma comparação do cisalhamento dos grãos é mais adequado para se fazer estimativas do efeito do tamanho de partículas. Ensaios em modelos foram realizados para fornecer informações sobre o efeito de tamanho das partículas em fundações (Murff 1996; Taylor, 1995), mas não garantem que a extrapolação para o protótipo vai ser exata.

Tabela 1.1 Leis de Escala (Madabhushi, 2014)

	Parâmetro	Lei de Escala modelo/protótipo	Unidades
Lei de Escala Generalizada (eventos estáticos)	Comprimento	$1/N_g$	m
	Área	$1/N_g^2$	m^2
	Volume	$1/N_g^3$	m^3
	Massa	$1/N_g^3$	$Nm^{-1}s^2$
	Tensão	1	Nm^{-2}
	Deformação	1	-
	Força	$1/N_g^2$	N
	Momento	$1/N_g^3$	Nm
	Trabalho	$1/N_g^3$	Nm
	Energia	$1/N_g^3$	J
	Velocidade de Infiltração	N_g	ms^{-1}
	Tempo (consolidação)	$1/N_g^2$	s
	Eventos Dinâmicos	Tempo (dinâmico)	$1/N_g$
Frequência		N_g	s^{-1}
Deslocamento		$1/N_g$	m
Velocidade		1	ms^{-1}
Aceleração/aceleração devido a gravidade (g)		N_g	ms^{-2}

1.4 Justificativa

Segundo Aguiar (2007), Costa (2008) e Lavieri (2011), a estaca torpedo inicialmente era utilizada em linhas de ancoragens flexíveis, mas atualmente tem sido usada em larga escala pela Petrobras como sistema de ancoragem em unidades flutuantes, as quais são capazes de suportar cargas verticais,

possibilitando a instalação em águas profundas (superior a 2000m), podendo ser dispostas como uma linha de instalação temporária ou permanente.

Estacas torpedo utilizadas em fundação *offshore* são normalmente e favoravelmente usadas para transferir cargas axiais. Entretanto, as mesmas podem também ser usadas expostas à cargas laterais agindo simultaneamente. Devido à esse carregamento combinado, efeitos de interação são esperados, isto é, a carga horizontal afeta a capacidade de carga vertical e vice-versa. Na prática de Engenharia atual, os efeitos de interação em estacas torpedo carregadas combinadamente, e mesmo de uma única estaca, não são levados em conta. As deformações nas direções axial e lateral são calculadas separadamente apenas para as cargas agindo na direção correspondente.

A capacidade lateral e rigidez das estacas têm interferência direta das características de camadas superficiais do solo, presente dentro de poucos metros de profundidades, geralmente argila mole ou areia fofa que demonstram um comportamento não linear. Além das cargas estáticas, as estacas também estão sujeitas a carregamentos de natureza dinâmica e atuam predominantemente na direção lateral.

Em projetos recentes observa-se um aumento no número de linhas de ancoragem de unidades flutuantes (Figura 1.7), já que na região do Pólo Pré-Sal da Bacia de Santos onde a lâmina d'água varia entre 1.800 e 2.500 m, a resistência ao cisalhamento dos solos é em geral inferior do que na Bacia de Campos (RT TEO n°118/2015).

É importante considerar que cargas mais elevadas são transmitidas aos pontos fixos, decorrentes das condições ambientais mais severas na Bacia de Santos do que em Campos, com alturas de ondas mais significativas. Houve então a necessidade de desenvolver soluções com maior capacidade de carga que as estacas Torpedo T-98 (Figura 1.8) e T-115, como a âncora VLA Vryhof de 28 m² x 30 ton, e a estaca Torpedo T-120 (com peso de 120 ton), cujos testes *offshore* ocorreram em 2009.

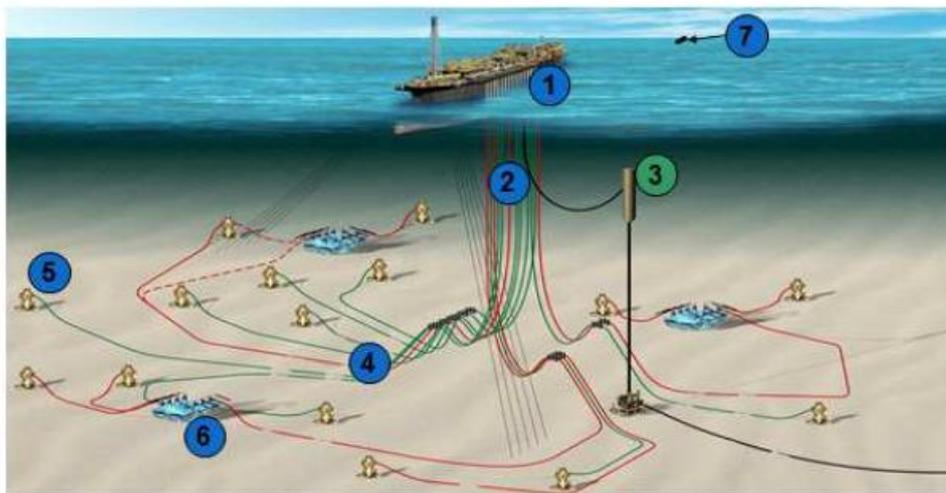


Figura 1. 7 Cenário padrão de produção no Pólo Pré-sal da Bacia de Santos com FPSO

- (1) FPSO Spread Moored com Riser Balcony a Bombordo
- (2) Risers flexíveis acoplados em lazy wave
- (3) RHAS de exportação de gás e pigagem do gasoduto
- (4) Flowlines flexíveis
- (5) ANM Padrao Pré-sal para Produção e Injeção
- (6) Manifold MSIAG-2 ou MSIA-4
- (7) Exportação de óleo via navios aliviadores DP.



Figura 1.8 Estaca Torpedo T-120 em sua versão atual a bordo (Fonte RT TEO n°118/2015)

Nos últimos anos tem havido um interesse crescente para que os raios de ancoragem sejam reduzidos, conseqüentemente diminuindo o comprimento total das linhas de ancoragem. A redução das linhas de ancoragem traz enormes benefícios tanto no ponto de vista ambiental e econômico quanto na logística de transporte e lançamento das enormes estruturas de ancoragem.

Diversos estudos para se obter um aumento na capacidade de carga de fundações offshore estão em andamento como:

- Aumento dimensional das soluções convencionais e sua otimização;
- Estudo de novas concepções de pontos fixos de ancoragem;
- A reavaliação dos critérios de dimensionamento (carregamento e propriedades de resistência);
- Aplicação de novas metodologias de instalação;
- Uso de técnicas de melhoramento de solos e de grupos de estacas nos *clusters* mais carregados.

As estacas torpedo são lançadas em queda livre e sua trajetória até o leito marinho sofre grande influência das correntes marinhas. Essa influência torna a cravação um tanto quanto imprecisa no que se diz respeito ao posicionamento e distância entre as estacas lançadas.

Estacas torpedo trabalham de forma isolada, por isso possuem grandes dimensões e peso para suportarem os carregamentos impostos pela movimentação da plataforma. O comportamento de grupos de estacas sob cargas aplicadas é geralmente diferente daquele de uma estaca isolada, devido à contribuição das estacas vizinhas na eficiência e capacidade de carga delas atuando em conjunto. A implantação do *cluster* de estacas implica na redução das dimensões e conseqüentemente no peso das estacas, facilita a logística de transporte (possibilidade de transportar mais de uma estaca por viagem), adoção sistemas com raios de ancoragens mais curtos gerando redução de custos nas linhas de ancoragem e redução de custos na instalação.

1.5 Objetivo Geral

O *cluster* de estacas trabalham em grupo sem *cap*, ou seja, as estacas não se comportam como bloco rígido. No cluster cada estaca tem liberdade nos seus movimentos, mas sofrem interferência das estacas vizinhas.

A proposta deste trabalho é realizar investigações experimentais em centrífuga geotécnica, com o objetivo de identificar e quantificar os efeitos de interação em *cluster* de estacas instaladas em areia fofa submetidas ao carregamento vertical, horizontal e inclinado.

1.6 Objetivos Específicos

Neste estudo busca-se avaliar a resistência global do sistema de ancoragem, as resistências individuais de cada ponto fixo, a distribuição de forças e os possíveis modos de ruptura.

Verificar parâmetros que influenciam na capacidade de carga dos modelos como: distância (S) entre as estacas do grupo e ângulo (Θ) de carregamento.

As investigações procurarão mostrar as interações significativas que podem resultar do carregamento combinado de estacas em solo na condição fofa, aumentando a capacidade de carga da estrutura, trabalhando com estacas de menores dimensões contribuindo assim para a melhor logística de transporte e lançamento das estacas torpedo.

2 -REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ambiente dinâmico em águas profundas, faz com que as estacas que suportam estruturas *offshore* sejam projetadas contra carregamentos combinados (axial, lateral e inclinado), decorrentes das ações das ondas do mar. Este carregamento induz a degradação da resistência e rigidez do sistema solo-estaca, bem como progressiva redução da capacidade de carga da fundação. Para o melhor entendimento do efeito da carga inclinada em estacas, alguns estudos relevantes serão relatados nesse capítulo.

Ismael (1989), executou um programa de testes de campo com estacas de 101 mm de diâmetro e 1,5 m de comprimento, enterradas em areia de média densidade. Os testes incluíam ensaios de carregamento axial, lateral e inclinado a 30° com o eixo da estaca. Este trabalho apresenta e analisa os resultados de campo e compara-os com os procedimentos analíticos propostos por Broms (1965). O objetivo do trabalho é melhorar os métodos de projetos existentes e obter uma compreensão clara do comportamento da estaca carregada sob tração oblíqua. Para os testes de campo, a resistência lateral influenciou a resistência oblíqua, que foi de 74% da capacidade de carregamento axial. As curvas carga versus deslocamento das estacas sujeitas a tração oblíqua são não linear, particularmente quando o ângulo de inclinação de carga aumenta. Para o carregamento lateral ($\Theta = 90^\circ$), a resposta de deslocamento da carga é não linear desde o início.

Patra *and* Krishna (2006), realizaram testes em laboratório com estacas de aço enterradas em areia. O objetivo é estudar os efeitos da carga compressiva quando as estacas são carregadas com um determinado ângulo. As inclinações usadas nos ensaios foram de 0°, 30°, 60° e 90° com o eixo vertical. Os resultados experimentais indicam que a capacidade de carregamento inclinado das estacas diminui com o aumento da carga compressiva. Métodos semiempíricos, baseados em resultados experimentais, têm sido sugeridos para determinar a resistência oblíqua e o carregamento de estacas submetidas a cargas estáticas.

Patra *and* Pise (2006), realizaram investigações experimentais com modelos reduzidos em grupos de estacas. Neste trabalho as estacas de alumínio foram enterradas em areia seca de média compactidade ($D_r=55\%$). A configuração dos ensaios se deu com estaca isolada, grupos de 3 x 1 e 2 x 2. Os grupos foram submetidos ao carregamento com ângulos de $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ e 90° com o eixo vertical central dos grupos. As estacas usadas para esta pesquisa tinha a relação $L/D=38$, o espaçamento entre as estacas foi de 3D, 4,5D e 6D. Para representar a resistência oblíqua das estacas os autores utilizaram diagramas polares e compararam seus resultados experimentais com os resultados encontrados por Ismael (1989) em testes de campo.

Basack (2007), desenvolveu um estudo com um grupo de estacas em camadas de areia fofa sobre uma camada de argila mole. Nesse trabalho foi realizada uma série de ensaios de laboratório onde o pesquisador desenvolveu o equipamento necessário para os ensaios de carregamento lateral cíclico. Os ensaios foram realizados em grupos estacas 2x2, sendo cada estaca com 20 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento. Durante os ensaios, observou-se que próximo a superfície do solo uma bacia de depressão foi formada em torno do grupo de estacas. Isto pode ser devido à mudança gradual das partículas do solo para fora da superfície da estaca, simultaneamente, devido à compactação da massa de areia em torno do grupo de estacas. O efeito de cargas cíclicas laterais no grupo de estacas diminui a capacidade de carga.

Chandrasekaran et. al. (2010), apresentam em seu trabalho resultados de carregamentos laterais cíclicos em um grupo de estacas enterradas em argila marinha obtida na região de Chennai (India) Os ensaios foram realizados em grupos de estacas de 1x2, 2x2 e 3x3 tendo a relação comprimento por diâmetro (L/D) de 15, 30 e 40. Para as estacas estudadas, a Lei de Similitude foi respeitada e a proposta de Wood et al. (2002) foi adotada nesse estudo:

$$\frac{E_m I_m}{E_p I_p} = \frac{1}{N_g^5} \quad (2.1)$$

Onde E_m é o módulo de elasticidade do modelo da estaca, E_p é o módulo de elasticidade do protótipo da estaca, I_m é momento de inércia do modelo da estaca, I_p é momento de inércia do protótipo da estaca e $1/N_g$ é o fator de escala para o comprimento. A estaca usada como modelo foi confeccionada em alumínio com diâmetro de 25,6 mm, o que representa um protótipo com diâmetro de 550 mm para um fator de escala 1/10. O comportamento observado é altamente não linear e o grau de não-linearidade aumenta com o número de ciclos de carga e isto é atribuído ao desenvolvimento do *gap* localizado entre a estaca e o solo, interface onde ocorre a concentração de tensões. O efeito acumulativo de repetidos carregamentos, leva a um aumento no excesso de poro pressão em argila, o que resulta em e uma drástica redução na resistência lateral. A quantidade de estacas no grupo também indicou uma redução na resistência devido ao efeito acumulativo da interação estaca-solo-estaca. Frequentemente muitas estruturas sofrem carregamentos laterais devido à pressão da terra, vento, terremotos, ação das ondas e impacto do navio. As previsões precisas da resposta do deslocamento de grupos de estaca, bem como as ações de esforço são necessárias para um projeto seguro e econômico. A maioria das pesquisas foca no comportamento de estacas simples carregadas lateralmente, embora as estacas sejam mais frequentes em grupos. Elhakim et al. (2014), usaram em seu estudo um modelo numérico tridimensional com resultados de modelagem centrífuga de estacas instaladas em areia e carregadas lateralmente. Este estudo utiliza a modelagem tridimensional de elementos finitos para entender melhor os principais parâmetros que afetam a resposta de grupos de estacas carregadas lateralmente (configurações de estacas 2x2 e 3x3) incluindo densidade relativa da areia (fofa e densa), espaçamento entre as estacas ($S=2,5D$, $5D$ e $8D$) e localização da estaca dentro do grupo. Concluíram nesse estudo que grupos de estacas com pouco espaçamento entre elas, sofrem maior deflexão do que uma única estaca sujeita à mesma carga lateral devido a efeito de grupo. A curva de carga versus deflexão das estacas nos grupos é mais suave em comparação com a curva da estaca isolada. A diferença torna-se menos significativa com o aumento do espaçamento das estacas devido à diminuição do efeito de sombreamento.

Hajjalilue-Bonab et al. (2015), desenvolveram um trabalho descrevendo um procedimento experimental em centrífuga geotécnica. Nesse trabalho são executados testes em estacas em escala reduzida cravadas em areia, submetidas a carregamentos dinâmicos laterais. Nos últimos anos, a modelagem em centrífuga é cada vez mais vista como uma alternativa aos testes de campo, por algumas razões como o melhoramento da modelagem do solo, solução para realização de estudos paramétricos, diversidade de ensaios com custo reduzido, etc. A estaca usada como modelo nos ensaios foi fabricada em alumínio com uma relação de 1/60 e 1/40 na escala em relação ao protótipo. A caixa teste utilizada nos ensaios permitiu a instalação de seis estacas, levando em consideração a distância entre elas de dez vezes o diâmetro da estaca, para impedir o efeito de turbulência gerado durante o carregamento dinâmico. O solo utilizado foi uma areia preparada através de um pluviador automatizado. A densidade obtida dependeu da altura de queda dos grãos e da velocidade horizontal de deslocamento do equipamento. A densidade relativa mínima foi de 1% e a máxima foi de 85,3%, sendo uma areia fofa e densa respectivamente. Os dois fatores mais importantes que foram analisados neste trabalho são o efeito escala e o efeito de reflexão de ondas das paredes da caixa. A resposta do efeito escala no sistema solo/estaca submetido a carregamento lateral cíclico e a reflexão das ondas nas paredes da caixa teste não teve efeito significativo nos diversos ensaios realizados e repetidos. Foi então possível estabelecer um programa de testes em que diferentes estudos paramétricos foram realizados para estudar fatores tais como: efeito da massa na estrutura, e efeito da amplitude do impacto.

Atualmente, estruturas flutuantes *offshore* exigem um aumento da capacidade de ancoragem porque se tornaram maiores para apoiar o desenvolvimento de infra-estruturas *offshore*, por exemplo, grandes complexos de energia flutuante, armazenamento de gás natural liquefeito (GNL), ilhas flutuantes entre outros. Assim, existe uma necessidade para o desenvolvimento de sistemas de ancoragem de alta capacidade. Teoricamente, a âncora de sucção não sofre quaisquer limitações no projeto, pois as âncoras de sucção de grande porte que fornecem uma alta capacidade de arrancamento. No entanto, grandes âncoras de sucção são difíceis de implementar devido à

fabricação, transporte e instalação. Choo et al. (2015), apresentam um estudo de uma configuração de grupo de pequenas âncoras de sucção que consiste em duas ou três âncoras rigidamente conectadas umas as outras em uma linha, para melhorar a resistência ao arrancamento. Este estudo investiga o desempenho de grupos de âncoras de sucção instaladas em areia compactada e submetidas ao carregamento horizontal. Estudou-se o desempenho do grupo de âncoras usando testes em modelo reduzido na centrífuga geotécnica a 70g e modelagem numérica. O objetivo desse trabalho é quantificar a melhoria na eficiência de uma âncora de grupo comparada a com a âncora isolada. A eficiência do grupo (η), é definido pela Equação 2.2.

$$\eta = \frac{P_{gr}}{N_a \cdot P_s} \quad 2.2$$

Onde:

η : eficiência;

N_a : número de âncoras no grupo;

P_s : resistência de uma âncora;

P_{gr} : resistência do grupo de âncoras.

Os resultados de Choo et al. (2015) mostram que a eficiência do grupo aumenta para grupos com espaçamentos maiores entre as estacas, porém as estacas do grupo começam a ter comportamento de estaca isolada quando este espaçamento supera três vezes o diâmetro.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo destina-se à apresentação dos materiais, equipamentos e métodos utilizados para o desenvolvimento das atividades do programa experimental desta tese de doutorado.

Foi realizada uma bateria de doze ensaios em gravidade modificada a 24xg, na Centrífuga Geotécnica do Laboratório de Engenharia Civil da UENF. As estacas foram carregadas (tracionadas) numa velocidade constante de 0,5 mm/s. Trabalhou-se em modelos reduzidos, utilizando tubos de alumínio para simular estacas torpedo, sem aletas, seguindo a Teoria da Similitude. Apresentam-se os materiais, a preparação da amostra e os equipamentos utilizados nos ensaios.

3.1 Solo

Os modelos físicos foram confeccionados utilizando uma areia industrial normatizada do IPT (N50) como material que representará o solo, simulando as condições de campo durante a cravação da estaca e seu carregamento. Foi utilizado um total de 106,893 kg de areia em cada ensaio, considerando que houve reutilização do material após o final de cada ensaio.

A areia industrial utilizada era seca ao ar e ficava acondicionada em latões para apresentar-se limpa. De granulometria uniforme (Figura 3.1), esta areia apresenta um ângulo de atrito no estado crítico de 33°, conforme ensaio de cisalhamento realizado por Santiago (2010). A caixa teste foi preenchida com areia no estado fofo com densidade relativa (D_r) de 35%, através do método de pluviação. Na Tabela 3.1 são apresentadas as características físicas do solo.

Tabela 3.1 Características Físicas da Areia N50

Diâmetro efetivo D_{10} (mm)	0,27
Diâmetro médio D_{50} (mm)	0,3923
Índice de Vazios Mínimo e_{\min}	0,72
Índice de Vazios Máximo e_{\max}	1,06
Coeficiente de Curvatura C_c	1,0
Coeficiente de Uniformidade C_u	1,52
Peso Específico dos Grãos	2,67
Ângulo de Atrito ϕ	33°
Peso Específico Natural γ_n (kN/m ³)	14

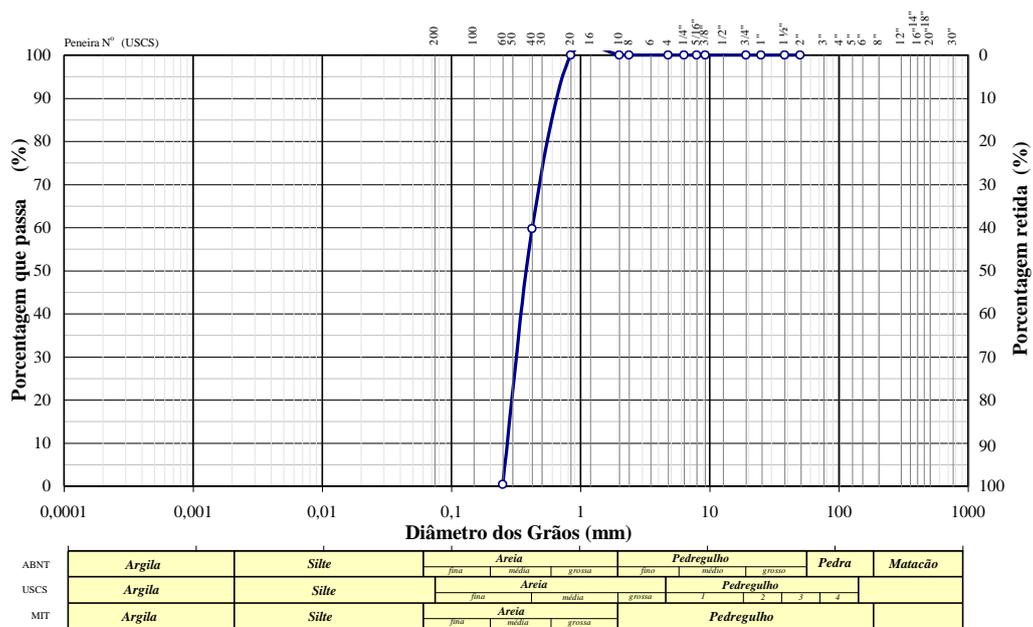


Figura 3. 1 Curva granulométrica da areia N50 (Santiago, 2010)

3.2 Caixa Teste

A caixa de teste (Figura 3.2) para ensaiar modelos físicos é confeccionada em aço tendo como dimensões, 465 mm de diâmetro interno e 480mm de altura interna. As paredes internas e o fundo foram forrados com folha de acetato, a fim de reduzir o atrito dos materiais depositados no interior

da caixa com as suas paredes. Para melhor distribuição do solo na caixa teste, a folha de acetato foi marcada com linhas espaçadas de 5 cm em todo seu diâmetro. Com essa marcação foi possível a deposição do solo na caixa teste em camadas iguais e uniformes.



Figura 3.2 Caixa Teste

3.3 Pluviador- Preparação da Amostra de Solo

O procedimento de lançamento do solo foi o mesmo para todos os ensaios de carregamento. O preenchimento da caixa teste foi realizado através de uma chuva de areia feita por um pluviador desenvolvido no Laboratório da Centrífuga/UENF (Figura 3.3) que direciona e controla a velocidade de deposição do material. A densidade do solo depende da altura de queda e da velocidade de deposição, onde as maiores alturas de queda resultam em maiores energias de deposição e conseqüentemente em solos mais densos. Segundo Ratton (1993), a pluviação no ar permite uma adequada reconstituição de depósitos naturais formados pelo vento que normalmente se constituem de areias ou siltes.

O pluviador (Figura 3.3) é composto por um funil de alumínio com capacidade de 10 Kg de material, nele é conectada uma mangueira flexível por onde o material escoar por gravidade até uma válvula de passagem. Conectado a mangueira flexível está um tubo de PVC (D= 60mm) rígido. A mangueira flexível facilita a movimentação do tubo rígido na preparação da amostra. No interior deste tubo foram instalados uma seqüência de 5 discos perfurados

feitos em acrílico (Figura 3.4). Os discos estão espaçados de 10 cm e rotacionados em 45° numa haste rosquada de aço. A colocação dos discos rotacionados, quebra a energia potencial da areia no interior do tubo e garante uma distribuição uniforme na saída do pluviador. A chuva de areia é distribuída uniformemente a uma altura de queda de 40mm em camadas de 50mm dentro da caixa teste. No interior da caixa teste, foi posicionada uma folha de acetato marcada com 9 camadas de 50mm e 1 camada de 30mm, facilitando a visualização do preenchimento por camadas. Com esta altura de queda constante durante a pluviação, a densidade relativa alcançada foi $D_r=35\%$ em todos os ensaios. A curva de calibração do pluviador encontra-se no ANEXO I.

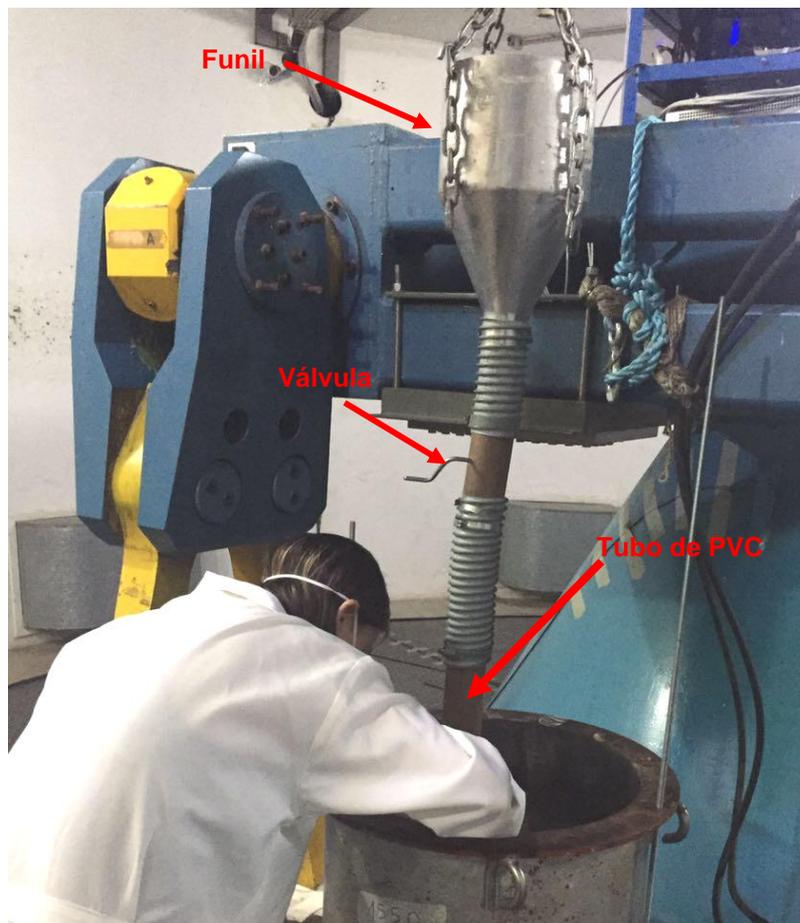


Figura 3.3 Pluviador

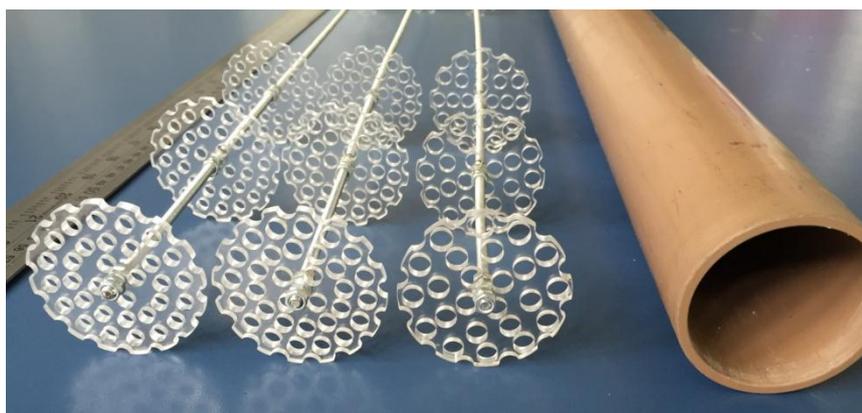


Figura 3.4 Conjunto de discos perfurados

3.4 Estaca (Modelo)

As estacas foram confeccionadas em tubos de alumínio, com diâmetro de 28,57mm e comprimento de 285,7mm. A estaca usada como modelo corresponde a um protótipo de uma estaca em aço com diâmetro de 0,6m e 6m de comprimento. Em cada estaca, foi acoplada em seu topo uma peça de latão com uma rótula central (Figura 3.5), de onde sai um cabo de aço. Esta rótula tem como objetivo evitar transferência de carga lateral que não seja aquela aplicada exclusivamente pelo atuador. O cabo de aço utilizado no ensaio do *cluster* de duas estacas é único para ambas. A escolha dessa composição se dá pelo fato que as estacas podem trabalhar de forma independente uma da outra durante o carregamento, inclusive compensando a carga da estaca vizinha ou sendo aliviada quando o carregamento não ocorre no eixo entre as duas estacas. O cabo é fixado por uma peça (parafuso Allen sextavado interno) (Figura 3.5) e atravessa a rótula da estaca 1, passa pelo elo e segue até a peça de fixação (parafuso Allen sextavado interno) da estaca 3 (Figura 3.6). Do elo sai um cabo de aço que se conecta a célula de carga através de uma haste de aço rosqueada (Figura 3.7) e a mesma está conectada ao atuador hidráulico responsável pelo carregamento das estacas durante o vóo da centrífuga. O elo utilizado nos ensaios é o mesmo usado em corrente de motocicleta, essa escolha se deu pelo fato de ser um material pequeno, leve e de resistência a tração superior ao do cabo de aço utilizado. A utilização do elo

garante que a distribuição das cargas sejam simétricas, já que a aplicação do carregamento se dá no eixo entre as duas estacas.

Os cabos de aço utilizados nos ensaios de carregamento das estacas são os mesmos utilizados em marcha de bicicleta. Os cabos foram ensaiados na prensa do laboratório e sua carga máxima de tração atingiu 1400N. Na Figura 3.8 é apresentada a prensa após um ensaio de tração no cabo de aço.



Figura 3.5 Peça acoplada na cabeça da estaca com rótula e cabo de aço

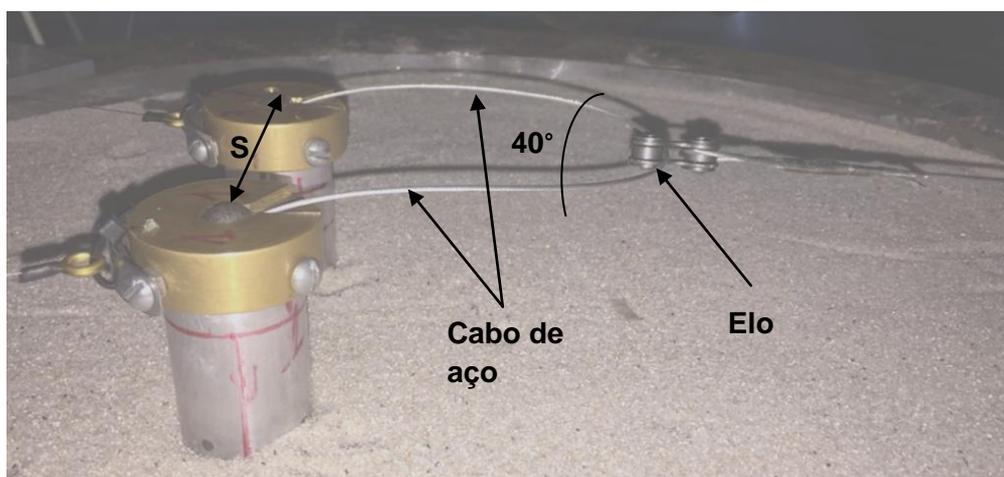


Figura 3.6 Configuração do cabo de aço nas estacas passando pelo elo

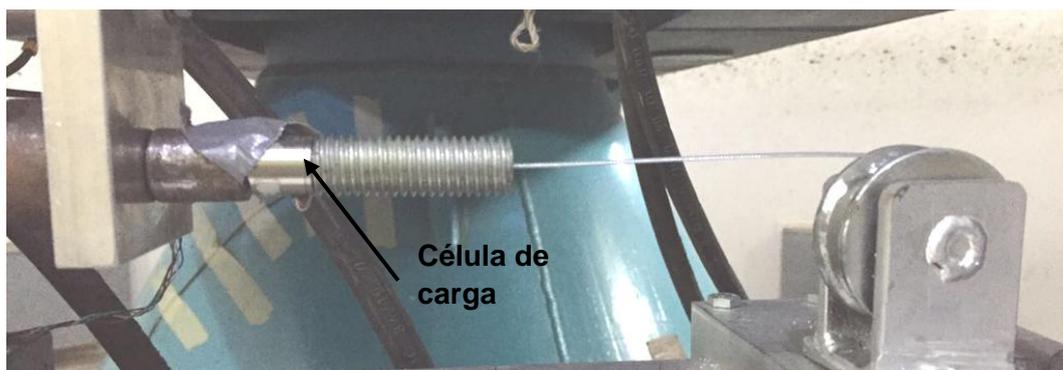


Figura 3.7 Haste de aço rosqueada conectada a célula de carga



Figura 3.8 Ensaio de tração do cabo de aço na prensa

Para a cravação das estacas a 1g no solo foi utilizado um macaco hidráulico, que permitiu a transferência de pressão na cabeça das estacas de forma controlada. O macaco foi posicionado sobre uma viga de aço acima da caixa teste. O posicionamento do macaco foi feito com mira laser para garantir que a pressão sobre as estacas fosse perfeitamente centralizada. A cravação

das estacas no solo se deu de forma simultânea no caso do *cluster* de duas estacas.

No processo de cravação foi utilizado um gabarito confeccionado em acrílico. Nesse gabarito há diversos círculos em posições diferentes (Figura 3.9). Cada círculo representa a posição de uma estaca em um determinado ensaio.

Antes de se iniciar a cravação, as estacas eram posicionadas dentro de uma peça de *chempoxy* vazada, que servia de guia para garantir a verticalidade durante a cravação (Figura 3.10). Sobre as estacas posicionou-se uma peça de *chempoxy* trapezoidal, onde o pistão do macaco distribuiu uniformemente a pressão. A cada 5cm de cravação era posicionado um nível bolha, verificando o nivelamento das estacas (Figura 3.11). Em todos os ensaios, as estacas do grupo mantiveram-se niveladas até o final da cravação.



Figura 3.9 Gabarito em acrílico

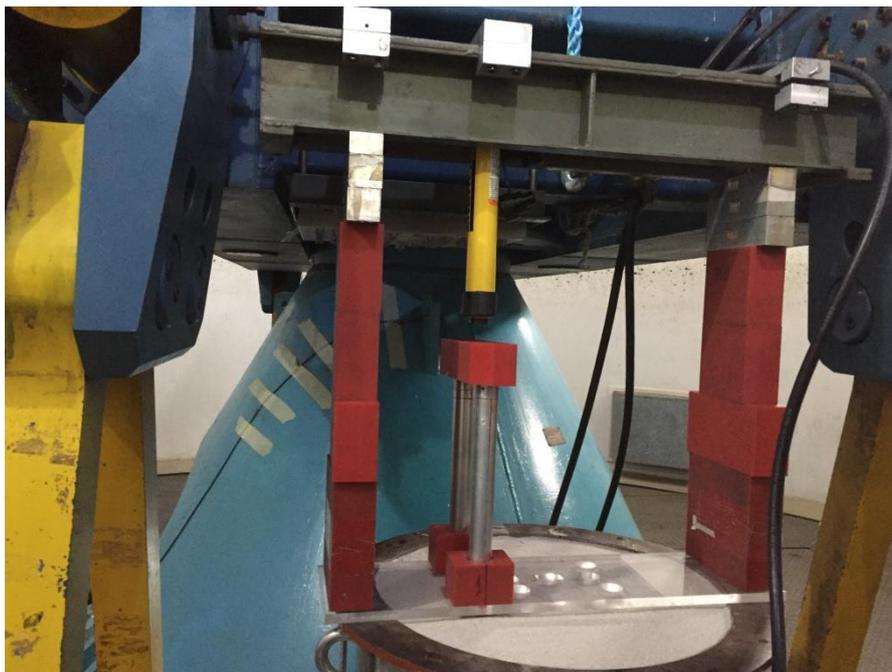


Figura 3.10 Posicionamento das estacas antes da cravação

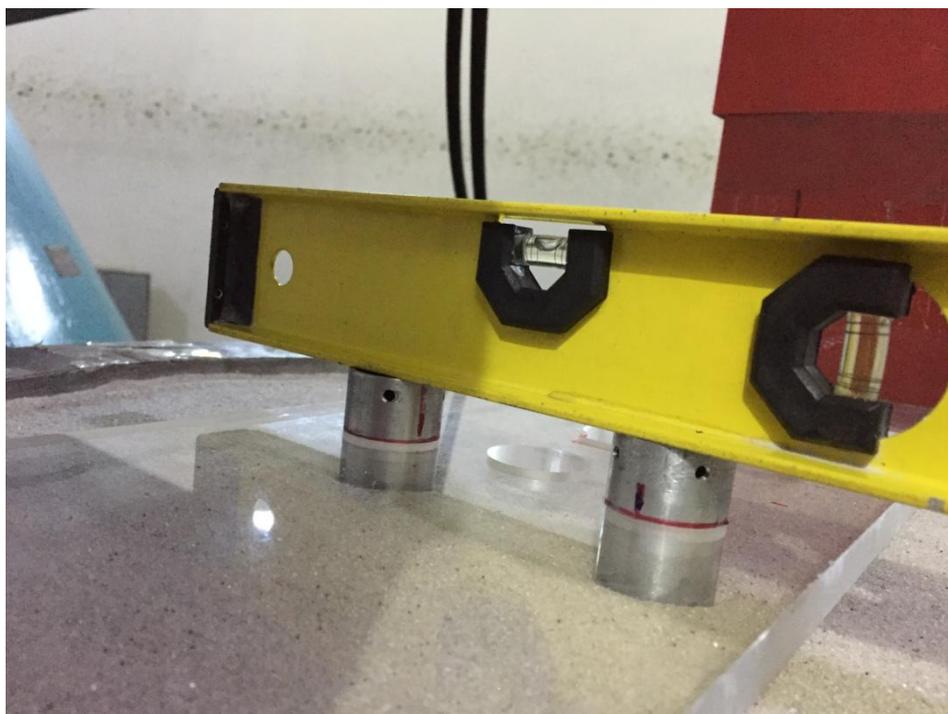


Figura 3.11 Nivelamento das estacas cravadas

Em todos os ensaios o comprimento da estaca e a profundidade de penetração se mantiveram constante e a variável se deu na distância (S) entre

as estacas no *cluster*. O ângulo entre as estacas foi escolhido 40° devido a limitação nas dimensões da caixa teste e se manteve constante em todos os ensaios.

O gráfico apresentado na Figura 3.12 mostra a distribuição dos diâmetros do modelo em relação ao campo gravitacional que foram previamente estudados. Considerando o espaço útil na caixa teste para ensaiar mais de uma estaca ao mesmo tempo, optou-se pela estaca modelo com diâmetro comercial de 28,57mm. Fazendo os cálculos de similitude utilizando a Equação 3.1 onde a estaca modelo é de alumínio e a estaca protótipo é de aço, foi possível encontrar o campo gravitacional correspondente, que para esta situação é de 24xg. A Tabela 3.2 apresenta as características do protótipo do modelo estudado neste trabalho.

$$\frac{E_m I_m}{E_p I_p} = \frac{1}{N_g^4} \quad (3.1)$$

Onde:

E_m - módulo de elasticidade do modelo

I_m - momento de inércia do modelo

E_p - módulo de elasticidade do protótipo

I_p - momento de inércia do protótipo

N_g - fator de escala (gravidade)

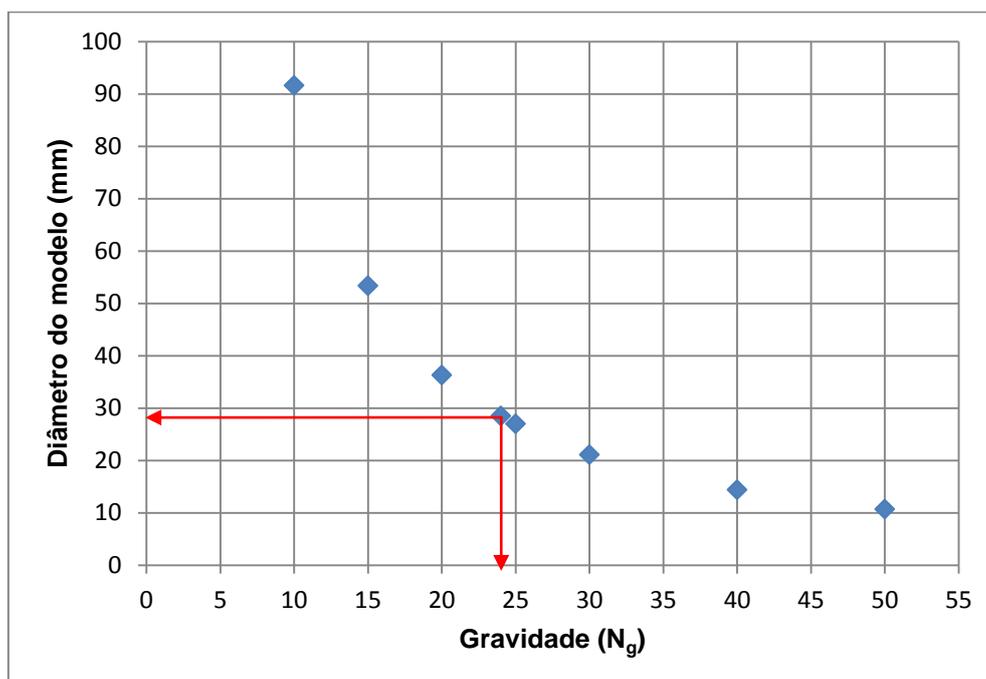


Figura 3.12 Distribuição dos diâmetros do modelo em relação ao campo gravitacional

Tabela 3.2 Tabela de características do protótipo e do modelo

Características	Protótipo	Modelo
Diâmetro (mm)	606	28,57
Comprimento (mm)	6060	285,7
Espessura da Parede (mm)	19	1,6
Módulo de Elasticidade (GPa)	210	72

3.5 Centrífuga Geotécnica da UENF

A centrífuga da UENF modelo WGC - 100-2 do fabricante *Wyle laboratories*, apresentada na Figura 3.13, é constituída de um braço de alavanca de 3,8 m de comprimento, tendo no centro um acoplamento em um eixo girante. Nas extremidades deste braço existem duas plataformas basculantes para acomodar caixas testes, uma para cada lado do braço, possibilitando ensaiar simultaneamente dois protótipos. As plataformas basculantes, onde ficam as caixas testes têm a dimensão de 0,9 m (largura), 0,9 m (comprimento) e 1 m (altura) cada uma, tamanho suficiente para que protótipos de estruturas geotécnicas possam ser modelados com uma maior representatividade. O braço de alavanca da centrífuga é apoiado sobre uma

estrutura cônica (chamada de pedestal cônico), que é uma interface entre o motor e o eixo principal de movimentação do braço da centrífuga. Além de apoiar o braço, o pedestal também oferece suporte ao eixo de transmissão. Sendo este conectado ao pedestal através de um mancal, que confere os esforços induzidos a fundação.

A caixa teste para ensaiar modelos físicos tem a capacidade máxima de 1T A 100xg considerando o peso do solo, da água, dos dispositivos como sensores e atuadores, acessórios além do contra-peso.

As estacas foram submetidas a carregamentos axial, inclinado e lateral durante o voo da centrífuga geotécnica, e a aquisição de dados advindos da instrumentação dos ensaios foi feita em tempo real através de conexões sem fio (*wireless*) e enviadas para um computador onde está instalado um programa de gerenciamento da plataforma *LabVIEW*. Com a finalidade de fornecer pressão hidráulica do sistema para permitir o uso de atuadores hidráulicos, uma unidade hidráulica HPU- MTS foi instalada em uma sala fora da câmara de centrifugação (Figura 3.14). Esta HPU controlada por um computador, é ligada a um controlador 407 MTS que funciona a uma pressão máxima de 3500 Psi e tem a capacidade de executar um grande número de carregamentos. Na Figura 3.15 é apresentada a sala de controle da centrífuga onde se encontra o computador com o software instalado.



Figura 3.13 Vista da centrífuga com as plataformas

a)



b)

c)



Figura 3.14 Unidade HPU-MTS- a) controlador 407 MTS, b) bomba hidráulica, c) manifold



Figura 3.15 Vista da sala de controle da centrífuga

3.6 Instrumentação e Aquisição de Dados

A carga devido ao carregamento do *cluster* de estacas e da estaca isolada foi aquiritada por uma célula de carga, acoplada ao atuador hidráulico. A célula de carga modelo ELH-TC590 (Figura 3.16) utilizada nos ensaios, tem capacidade de 1000lb e seus dados são enviados pelo PXI até a sala de controle durante o ensaio. Os dados da calibração encontram-se no ANEXO II.

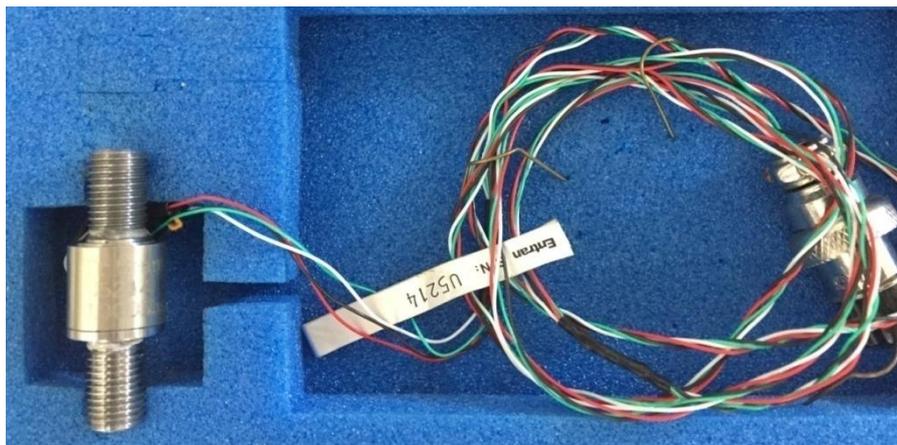


Figura 3.16 Célula de Carga ELH-TC590

Para os ensaios deste estudo foi utilizado um total de seis transdutores de deslocamentos. Nos ensaios horizontais e verticais utilizou-se quatro transdutores potenciométricos, sendo um em cada cabeça da estaca e dois ligados ao atuador hidráulico. Nos ensaios inclinados ($\Theta=45^\circ$) foram utilizados um transdutor potenciométrico e um LVDT em cada cabeça da estaca e dois transdutores potenciométricos ligados ao atuador hidráulico.

Os transdutores lineares potenciométricos modelo GEFRA Brasil PZ34-S-250 (Figura 3.17) de curso útil de 250mm ligados ao atuador, foram utilizados de forma independente. O transdutor potenciométrico 1, foi utilizado para definir a posição do atuador durante o ensaio. O transdutor potenciométrico 2 conectado ao PXI, foi utilizado para adquirir os dados de deslocamento do sistema global (estacas, cabos de aço e roldanas). Os dados da calibração estão no ANEXO III.

Os transdutores de deslocamentos potenciométricos (19359 e 19994) modelo WPS-750-MK30-P10 (Figura 3.18) com curso de trabalho de 750mm, foram fixados na caixa teste e conectados na cabeça de cada estaca, seguindo o alinhamento do cabo de aço. Cada estaca teve seu deslocamento registrado de forma individual. Os dados de cada transdutor foram enviados através do PXI até a sala de controle em tempo real. Esses modelos foram usados nos ensaios de carregamento horizontal ($\Theta=0^\circ$), vertical ($\Theta=90^\circ$) e inclinado ($\Theta=45^\circ$). Os dados da calibração estão no ANEXO IV.

Os transdutores de deslocamentos LVDT modelo 1000-MHR com curso de trabalho de 50,8mm, foram usados nos ensaios de carregamento inclinado ($\Theta=45^\circ$). Os instrumentos foram fixados em uma base de acrílico e a haste móvel se apoiou na cabeça de cada estaca (Figura 3.19). Os dados da calibração estão no ANEXO V.



Figura 3.17 Transdutores lineares potenciométricos modelo GEFran Brasil PZ34-S-



Figura 3.18 Transdutores de deslocamentos potenciométricos (19359 e 19994) modelo WPS-750-MK30-P10

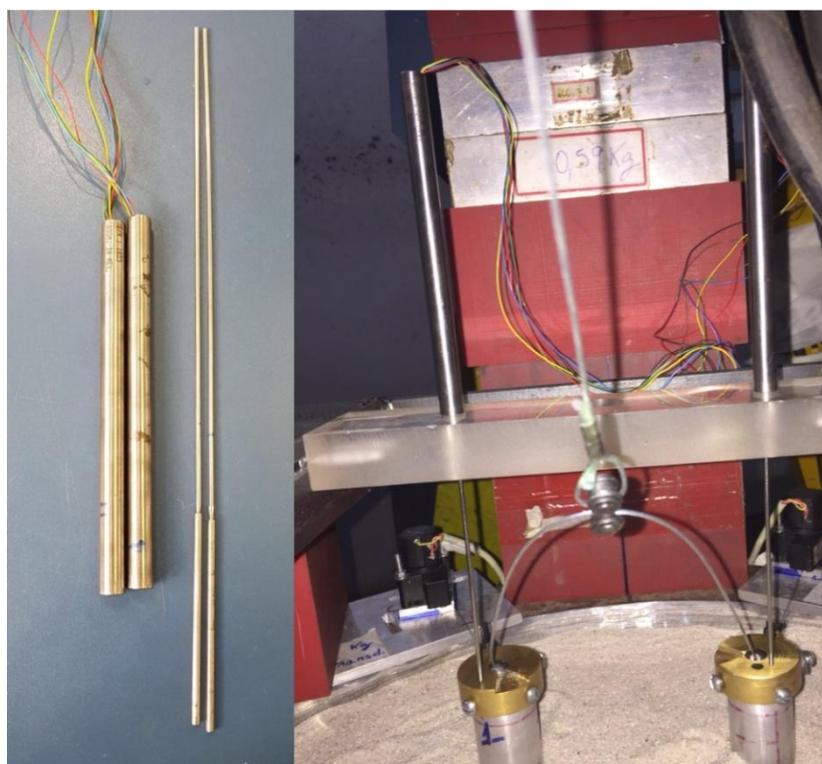


Figura 3.19 LVDTs utilizados nos ensaios de carregamento inclinado a 45°

O atuador hidráulico da marca Milwaukee Cylinder, modelo H71 (Figura 3.20) foi responsável por desenvolver o carregamento durante o voo da centrífuga geotécnica na velocidade de 0,5mms. Esse atuador possui um curso máximo do pistão de 63,5 mm e pode aplicar carregamentos estáticos e dinâmicos de até 10675 N (2400 lbf). O atuador pode ser posicionado em diferentes ângulos para aplicar os carregamentos requeridos. Ele é fixado sobre uma viga de alumínio, a qual é apoiada em suportes de chempoxy que ficam sobre a caixa teste. A célula de carga é acoplada na parte inferior do pistão.

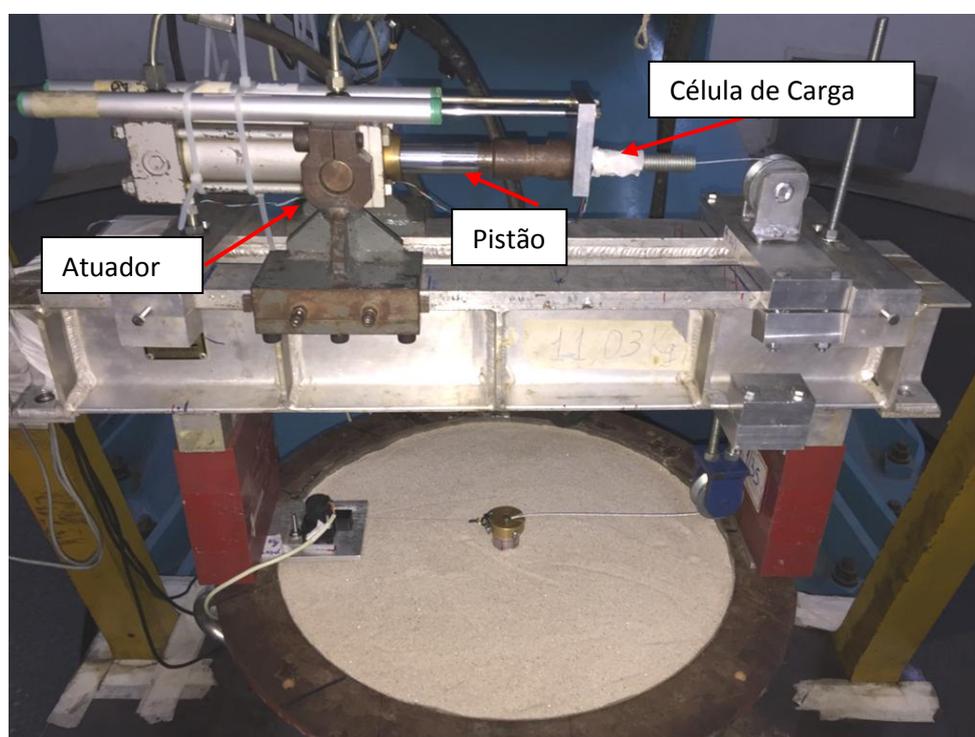


Figura 3.20 Atuador Hidráulico Milwaukee Cylinder modelo H71 na posição horizontal

Para os ensaios na centrífuga geotécnica, o sistema de medição utilizado consiste de um condicionador de sinais (Rittal), um conversor de sinais A/D da *National Instruments* (NI-USB 6255), uma unidade de pressurização e um controlador da MTS para acionar o atuador hidráulico. Além do Rittal também foi utilizado um sistema de aquisição de dados da

National Instruments (NI PXI 1052), nesse sistema estavam instalados os seguintes módulos:

- NI SCXI 1121 (entrada universal de sinais de tensão);
- NI PXI 6221 (conversor analógico/digital);
- NI SCB 68 (bloco conector para aquisição de dados de tensão).

3.7 Descrição dos Ensaios

Foram realizados 12 ensaios de carregamento em estacas, sendo um grupo de 4 ensaios horizontais ($\Theta=0^\circ$), 4 ensaios verticais ($\Theta=90^\circ$) e 4 grupos de ensaios inclinados ($\Theta=45^\circ$). Para cada inclinação (Θ) de carregamento, executou-se 1 ensaio com uma estaca isolada para efeito de comparação e 3 ensaios com o *cluster* de duas estacas variando a distância (S) entre elas ($S=3D$, $2D$ e $1,5D$). Onde D é o diâmetro da estaca.

Todos os ensaios foram realizados utilizando o mesmo método de preparação do solo, cravação das estaca e carregamento do modelo. As variáveis controladas foram o diâmetro interno ($d_i=26,97\text{mm}$) e o diâmetro externo ($D=28,57\text{mm}$) das estacas, peso da estaca modelo ($W=107\text{g}$), profundidade de cravação ($h=270\text{mm}$), densidade relativa inicial da areia ($D_r=35\%$), gravidade modificada ($24xg$) e dimensões da caixa teste.

Os parâmetros medidos durante o vôo foram a carga durante o carregamento da estaca isolada ou do *cluster* e os deslocamentos de cada estaca.

Os ensaios de carregamento horizontal ($\Theta=0^\circ$) foram os primeiros a serem realizados e serviram para validar a metodologia proposta para a tese, verificação do procedimento de cravação e validação do sistema de carregamento utilizando o cabo de aço de marcha de bicicleta e o elo de corrente de motocicleta.

Através dos primeiros ensaios de carregamento horizontal, constatou-se a limitação do cabo de aço para cargas superiores a 1200N durante o vôo. Em todos os ensaios houve ruptura do cabo para pequenos deslocamentos, aproximadamente 4mm .

Em todos os ensaios a caixa teste foi preenchida com uma chuva de areia (método de pluviação) e após o preenchimento da caixa teste, as estacas

foram cravadas. Uma vez cravadas, por serem de ponta aberta, foi necessário retirar o *plug* de areia formado no interior das estacas. Os *plugs* foram medidos e retirados utilizando um aspirador de pó (Figura 3.21).

Com as estacas cravadas e sem *plug*, instalou-se o sistema de carregamento composto por uma cabeça de latão rotulada para cada estaca, um cabo de aço ligando as duas estacas, um elo e um cabo de aço que passava pelo elo e se conectava a célula de carga. O cabo responsável pelo carregamento passava por duas roldanas que serviam de alinhamento do mesmo.

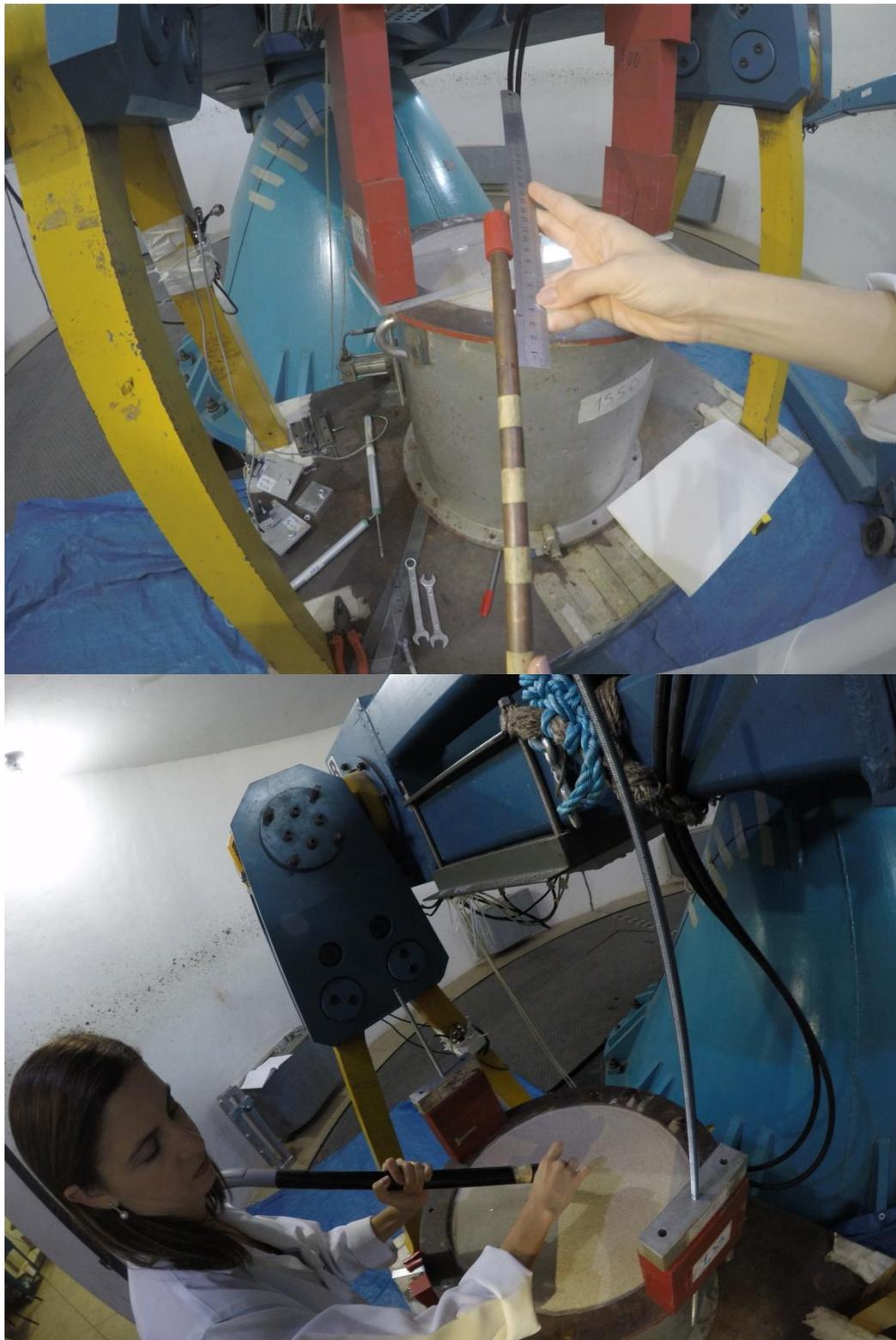


Figura 3.21 a) Aferição do plug formado após a cravação, b) retirada do plug com aspirador de pó

Nos ensaios com $\Theta = 0^\circ$ foi utilizado um transdutor de deslocamento conectado a cabeça de cada estaca, na posição horizontal alinhado ao cabo de aço. Esses transdutores forneceram dados de deslocamento individual para cada estaca durante o carregamento (tração).

Para o carregamento, foi utilizado o atuador hidráulico com seu pistão posicionado horizontalmente. Na extremidade do pistão, foi conectada a célula de carga e nela uma haste rosqueada com o cabo de aço. Na Figura 3.22 é apresentado a montagem final para um carregamento horizontal.

Foram realizados um total de quatro ensaios de carregamento horizontal, o primeiro com espaçamento de $3D$ entre as estacas, o segundo com espaçamento $2D$ entre as estacas, o terceiro com espaçamento $1,5D$ entre as estacas e o quarto com a estaca isolada.

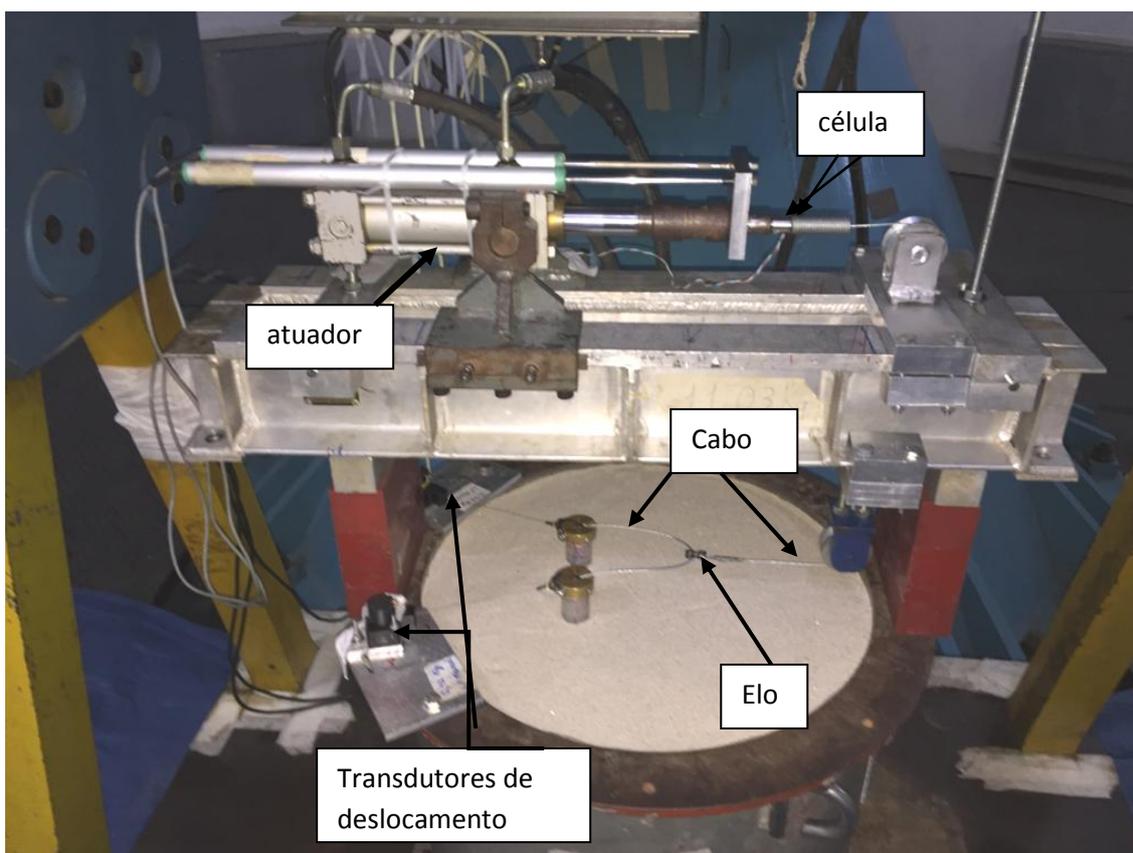


Figura 3.22 Montagem final do ensaio de carregamento horizontal

Os ensaios de carregamento vertical ($\Theta=90$) seguiram a mesma metodologia dos ensaios horizontais para o processo de pluviação do solo na caixa teste, procedimento de cravação das estacas e utilização do sistema de carregamento com cabo de aço.

Nesses ensaios foi utilizado um transdutor de deslocamento conectado na cabeça de cada estaca, na posição vertical. Esses transdutores foram conectados a uma estrutura de aço instalada sobre a caixa teste, onde a mesma permitia a fixação dos transdutores em diferentes posições para cada ensaio do *cluster* de estacas. Os transdutores forneceram dados de deslocamento vertical individual das estacas durante o carregamento.

Para o carregamento, foi utilizado o atuador hidráulico com seu pistão posicionado na vertical, onde na ponta do pistão, foi conectada a célula de carga e nela uma peça de latão com o cabo de aço fixado por dois parafusos. Na Figura 3.23 é apresentado a montagem final para um ensaio de carregamento vertical.

Foram realizados um total de quatro ensaios de carregamento vertical, o primeiro com espaçamento de 3D entre as estacas, o segundo com espaçamento 2D entre as estacas, o terceiro com espaçamento 1,5D entre as estacas e o quarto da estaca isolada.

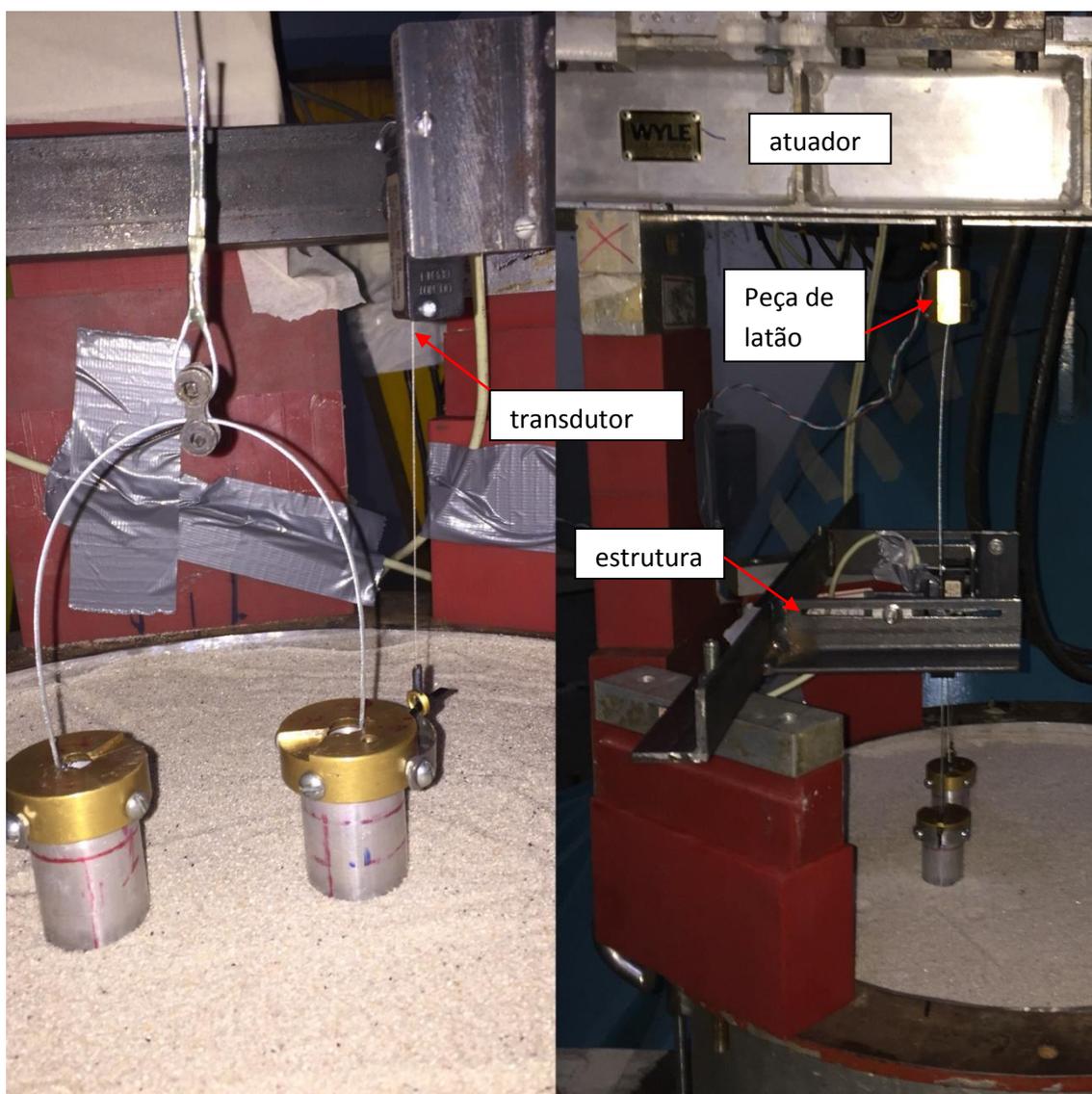


Figura 3.23 Montagem final do ensaio de carregamento vertical

Os ensaios de carregamento inclinado ($\Theta=45^\circ$) seguiram a mesma metodologia dos ensaios horizontais e verticais, para o processo de pluviação do solo na caixa teste, procedimento de cravação das estacas e utilização do sistema de carregamento com cabo de aço.

Nesses ensaios foi utilizado um transdutor de deslocamento conectado na cabeça de cada estaca, na direção do carregamento e outros dois na posição vertical com isso foi possível adquirir dados de deslocamento inclinado e vertical individual das estacas durante o carregamento.

Para o carregamento inclinado, foi utilizado o atuador hidráulico com seu pistão posicionado na horizontal com mesma montagem utilizada no

carregamento horizontal. Na Figura 3.24 é apresentado a montagem final para um carregamento inclinado.

Foram realizados um total de quatro ensaios de carregamento inclinado, o primeiro com espaçamento de $3D$ entre as estacas, o segundo com espaçamento $2D$ entre as estacas, o terceiro com espaçamento $1,5D$ entre as estacas e o quarto da estaca isolada.

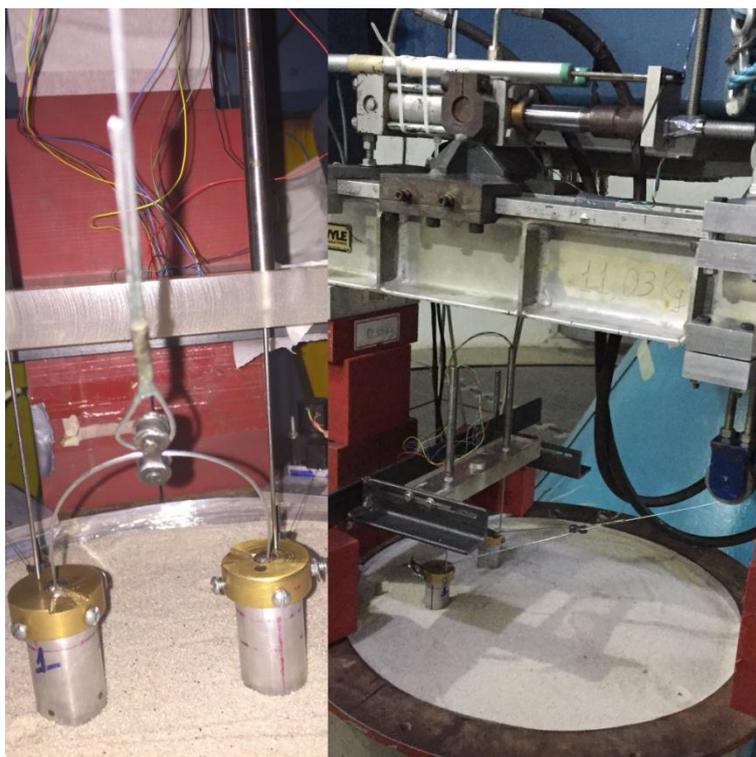


Figura 3.24 Montagem final do ensaio de carregamento inclinado

4- RESULTADOS

Os ensaios de carregamento de *clusters* foram realizados em estacas com relação L/D de 10, variando o espaçamento (S) entre elas em 3D, 2D e 1,5D. Nos *clusters* as estacas foram nomeadas de estaca 1 e estaca 3 (segundo identificação do laboratório), em todos os ensaios as estacas foram reutilizadas e mantidas na mesma posição, obtendo assim uma coerência nos resultados. Os ensaios em estacas isoladas foram executados nas três inclinações citadas neste trabalho como ponto referência. Os carregamentos foram realizados com 3 inclinações diferentes ($\Theta=0^\circ$, $\Theta=45^\circ$ e $\Theta=90^\circ$), em areia fofa e submetidos ao campo gravitacional de 24xg na centrífuga geotécnica. Na Tabela 4.1 encontra-se a identificação dos ensaios realizados e valores de carga máxima para cada ensaio..

Tabela 4.1 Identificação dos Ensaio Experimentais

Inclinação com a horizontal (Θ)	Espaçamento
0°	3D
	2D
	1,5D
45°	3D
	2D
	1,5D
90°	3D
	2D
	1,5D

As estacas do *cluster* ensaiadas nesse trabalho estão sujeitas a comportamentos próprios, visto que por não terem um *cap* que as une não se comportam como um bloco durante o carregamento. Nesse item serão apresentados os resultados dos 12 ensaios realizados e comparação com outros autores. Para fins de interpretação as comparações são feitas entre a estaca isolada e as estacas do *cluster* de maneira individual, isto é, cada estaca individual é metade da resistência do *cluster* ensaiado.

4.1 Ensaios Horizontais

Os ensaios de carregamento horizontal não foram levados a ruptura para evitar avaria nos instrumentos e nas estacas por flexão, devido ao valor elevado de carga. Conforme apresentado no item 4.4, a carga máxima suportada pelo cabo de aço foi de aproximadamente 1400N. O critério de parada utilizado nos ensaios de $\Theta=0^\circ$ e $\Theta=45^\circ$ foi limitar os deslocamentos horizontais a no máximo 15% do diâmetro da estaca, excetuando-se a estaca isolada que foi submetida a uma carga próxima ao limite de escoamento do cabo de aço.

Na Tabela 4.2 é apresentado um resumo das cargas máximas encontradas e na Figura 4.1 apresentam-se as curvas de carregamento x deslocamento horizontal para uma estaca isolada e três *clusters* obtidos nos ensaios com $\Theta=0^\circ$. É importante mencionar que os valores apresentados para os *clusters* são referentes às estacas isoladas de cada conjunto.

Tabela 4.2 Resumo das Cargas Máximas do ensaio $\Theta=0^\circ$

Inclinação com a horizontal (Θ)	Espaçamento	Força Máxima (N)
0°	3D	607,42
	2D	581,51
	1,5D	519,55
	isolada	1140,87

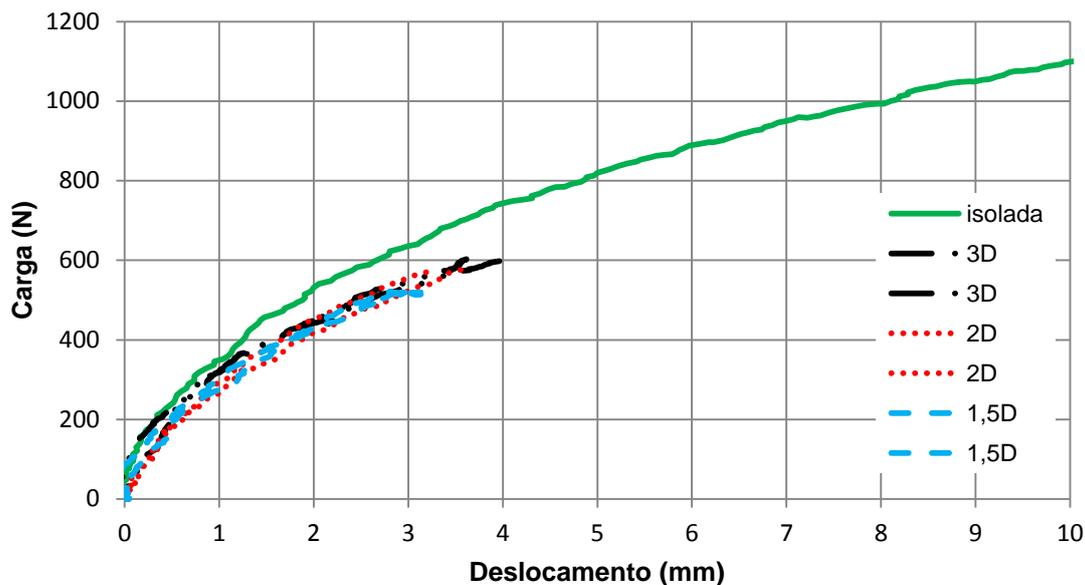


Figura 4.1 Diagrama carga x deslocamento do ensaio horizontal

No carregamento horizontal do *cluster*, o valor da carga total foi de aproximadamente 1200 N, superando cerca de 10% a carga total na estaca isolada para o deslocamento apresentado (4mm). Observa-se também que o comportamento das curvas do *cluster* se assemelha aquelas da estaca isolada no início do carregamento, mas à medida que há um aumento da mobilização do deslocamento a carga individual de cada estaca do *cluster* se mantém inferior a carga da estaca que foi ensaiada de forma isolada.

Outra observação importante na Figura 4.1 diz respeito a rigidez inicial (tangente inicial) da estaca isolada e dos arranjos em *cluster*, que não apresentam diferença significativa entre elas.

4.2 Ensaio Verticais

Os ensaios de carregamento vertical foram levados a ruptura, visto que a carga máxima sempre se manteve abaixo da resistência ao escoamento do cabo de aço.

Na Tabela 4.3 é apresentado um resumo das cargas máximas e na Figura 4.2 segue o diagrama de carregamento x deslocamento vertical para uma estaca isolada e três *clusters* obtidos nos ensaios com $\Theta=90^\circ$.

Tabela 4.3 Resumo das Cargas Máximas do ensaio $\Theta=90^\circ$

Inclinação com a horizontal (Θ)	Espaçamento	Força Máxima (N)
90°	3D	269,80
	2D	265,88
	1,5D	265,58
	isolada	313,86

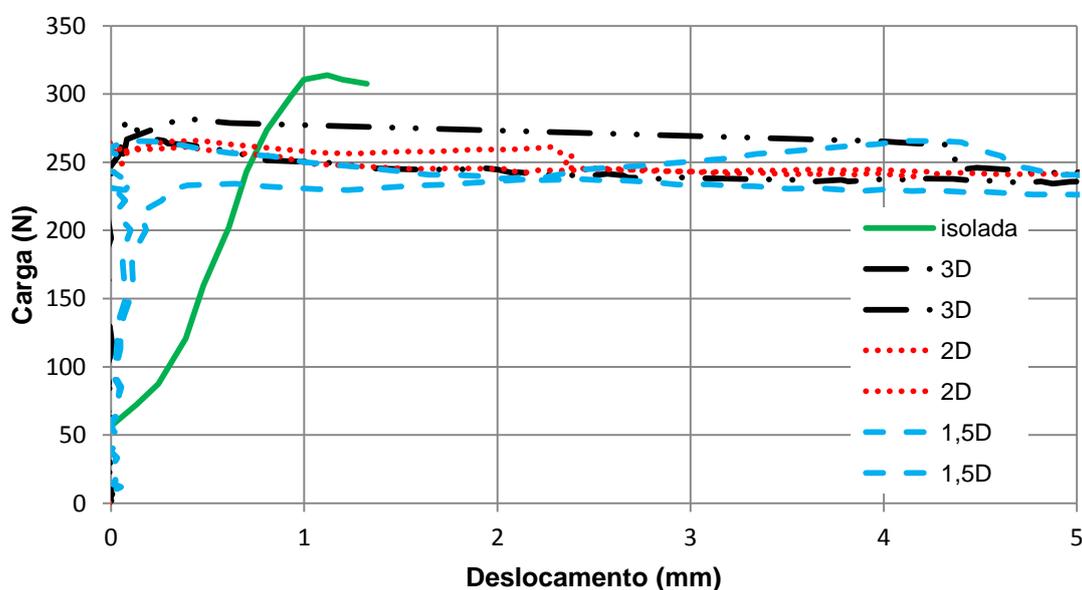


Figura 4.2 Diagrama carga x deslocamento do ensaio vertical

Os resultados apresentados na Figura 4.2 mostram que a carga total do *cluster* supera cerca de 70% a carga da estaca isolada. Este comportamento está ligado diretamente ao atrito solo/estaca e a interação entre elas de maneira mais evidente do que as cargas horizontais. O fato do *cluster* ser formado por duas estacas, além da interação entre elas o atrito no grupo parece superar o atrito da estaca isolada.

Nos ensaios com as estacas do *cluster* as curvas apresentam um mesmo pico para uma determinada mobilização no início do carregamento, ou seja, a rigidez inicial é aparentemente a mesma, o que não acontece para o

ensaio da estaca isolada que necessita de uma maior mobilização para atingir a carga de pico.

Os resultados das estacas do *cluster* medidos nesse carregamento mostram que a distância entre as estacas não interfere na carga alcançada no ensaio considerando o solo fofo, pois o ganho de resistência relacionado ao espaçamento não é significativo para o carregamento vertical onde todos os *clusters* tiveram praticamente o mesmo ganho.

4.3 Ensaio Inclinados

Os ensaios de carregamento inclinado ($\Theta=45^\circ$) assim como os ensaios horizontais não foram levados a ruptura conforme citado no item 5.1.

Na Tabela 4.4 é apresentado um resumo das cargas máximas e as Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os diagramas de carregamento x deslocamento para uma estaca isolada e três *clusters* obtidos nos ensaios com $\Theta=45^\circ$. Para melhor visualização os gráficos apresentados foram divididos em carregamento vertical versus deslocamento vertical e carregamento horizontal versus deslocamento horizontal.

Tabela 4.4 Resumo das Cargas Máximas do ensaio $\Theta=45^\circ$

Inclinação com a horizontal (Θ)	Espaçamento	Força Máxima (N)
45°	3D	498,26
	2D	522,84
	1,5D	533,09
	isolada	595,37

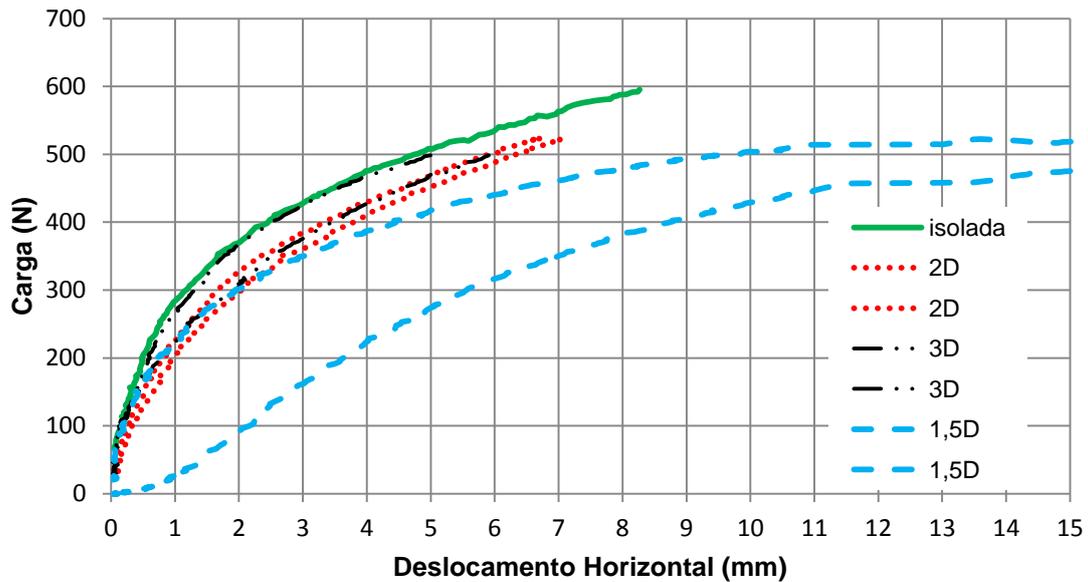


Figura 4.3 Diagrama carga x deslocamento horizontal do ensaio inclinado

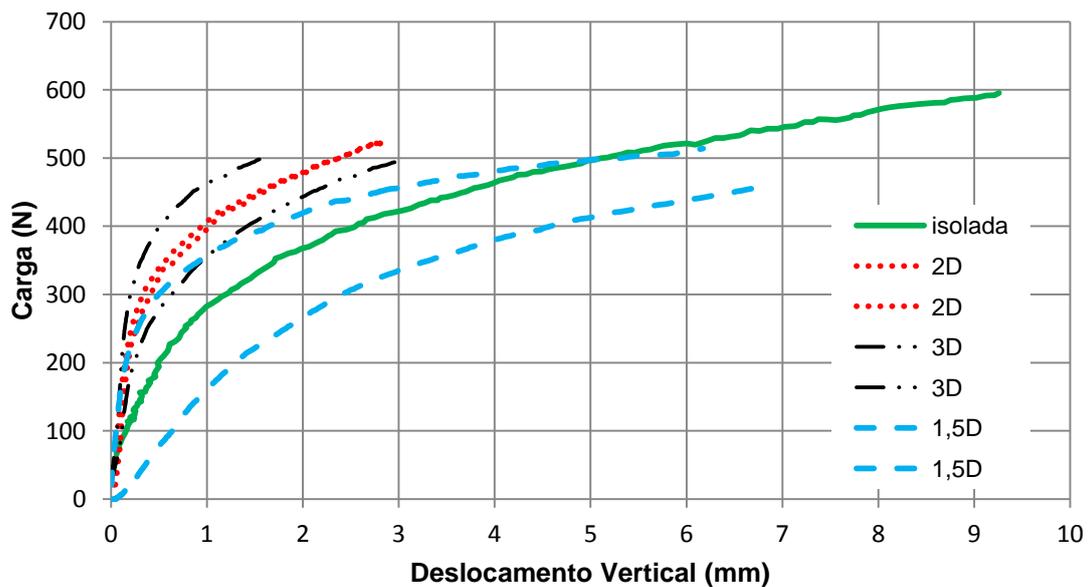


Figura 4.4 Diagrama carga x deslocamento vertical do ensaio inclinado

Os resultados apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4 mostram o desenvolvimento dos ensaios inclinados para a componente horizontal e vertical respectivamente. Para as duas componentes a estaca isolada obteve uma carga total medida que ficou entre 70 e 80% inferior a carga total do *cluster*.

Na Figura 4.3 é apresentado o comportamento das estacas pela componente horizontal medida. Observa-se que no início do carregamento as estacas do *cluster* e a estaca isolada têm o mesmo comportamento, tal como ocorre nos ensaios puramente horizontais mostrados anteriormente. Nessas curvas é possível notar que a resistência do cluster não é proporcional a distância entre as estacas que compõe o arranjo, sugerindo desta maneira a existência de uma distância ótima entre as estacas, que será investigada mais adiante. Ainda nessa figura observa-se que as estacas referentes a distância 1,5D apresentaram comportamento diferente nos estágios iniciais de carregamento em virtude de dificuldade operacional. No entanto, o aspecto mais importante que é a resistência final apresentou valores próximos.

Na Figura 4.4 é apresentado o comportamento das estacas pela componente vertical medida. Diferente da relação carga x deslocamento horizontal a estaca isolada difere das demais estacas dos *clusters* no que tange a rigidez inicial desconsiderando a curva referente à estaca 1 da distância 1,5D. O pico alcançado pelas estacas do *cluster* individualmente é superior ao da estaca isolada, sugerindo que além do atrito solo/estaca presente no deslocamento vertical, o espaçamento entre as estacas também está influenciando significativamente este carregamento.

4.4 Determinação da Carga de Ruptura de Ensaios Horizontais e Inclinados

Considerando que os ensaios de carregamento horizontal e inclinado apresentados não foram levados à ruptura, optou-se por utilizar um ajuste de curva hiperbólico para melhor interpretação dos resultados até a ruptura.

O ajuste de curva hiperbólico pode ser aproximado razoavelmente por hipérbolos como mostrado na Figura 4.5.

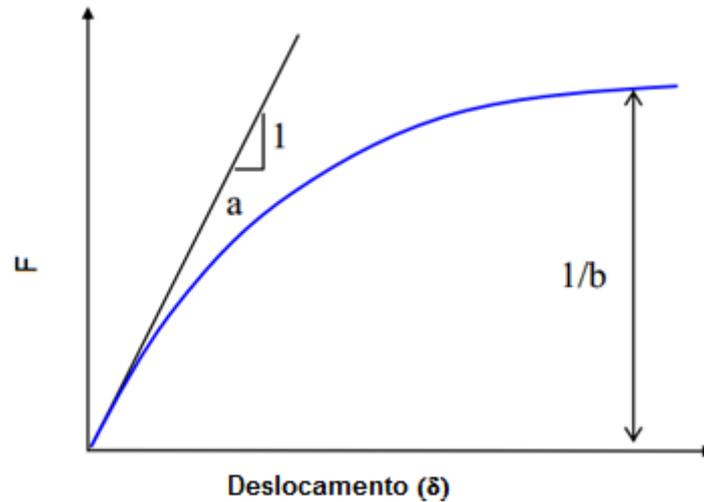


Figura 4.5 Curva Hiperbólica

Onde:

$$F = \frac{\delta}{a+b\delta} \quad (4.1)$$

F: carga

a: inclinação inicial

b: valor assintótico

δ : deslocamento

Derivando a Equação da hipérbole chegando a:

$$\frac{F}{d\delta} = \frac{1}{a+\delta} - \frac{b\delta}{(a+\delta)^2} \quad (4.2)$$

Para $\delta=0$ tem-se:

$$\left[d \left(\frac{F}{d\delta} \right) \right]_{\delta=0} = \frac{1}{a} = E_i \quad (4.3)$$

Por outro lado, para $\delta= \infty$, considerando nesse caso $a \approx 0$

$$\lim_{\delta \rightarrow \infty} F = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\delta}{a+b\delta} = \frac{1}{b} \quad (4.4)$$

A hipérbole da Figura 5.6a pode ser descrita pela Equação:

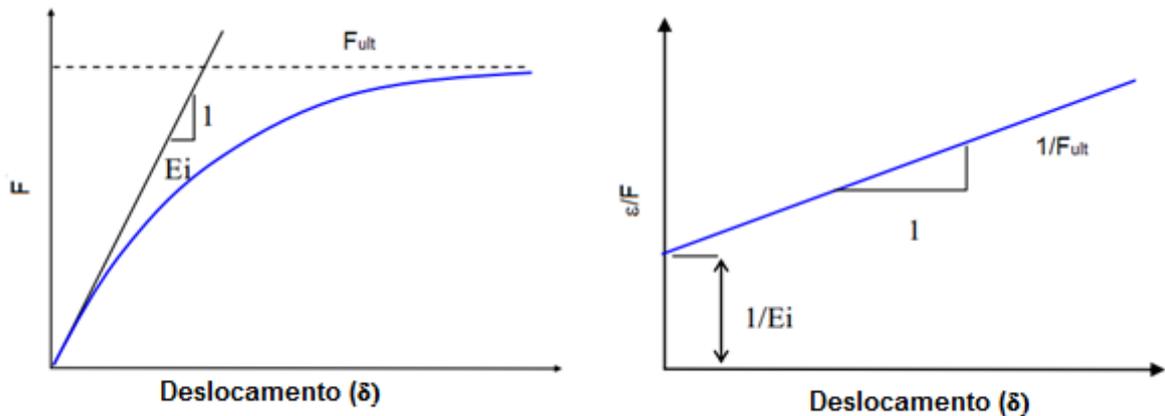
$$F = \frac{\delta}{a+b\delta} = \frac{\delta}{\frac{1}{E_i} + \frac{\delta}{F_{ult}}} \quad (4.5)$$

Onde E_i é a tangente inicial da curva e F_{ult} a assíntota da curva. Se a equação da hipérbole é transformada, obtém-se uma relação linear (Figura 4.6 b).

Rearranjando a Equação 4.5 obtém-se a equação de uma reta:

$$\frac{\delta}{F} = \frac{1}{E_i} + \frac{1}{F_{ult}} \delta \quad (4.6)$$

A partir da curva transformada (Figura 4.6 b) encontram-se os valores dos parâmetros a e b.



a) Curva real

b) curva transformada

Figura 4.6 Ajuste hiperbólico

Para os ensaios de carregamento horizontal e inclinado foram construídas transformadas (ANEXO VI) e delas foram obtidos os parâmetros “a” e “b”. A partir da Equação 4.5 foi possível obter valores de carga para

incrementos de deslocamentos dados. Os deslocamentos utilizados na equação para se obter os valores das cargas se limitaram em até aproximadamente 30% do diâmetro da estaca.

Nas Figuras 4.7 a 4.8 são apresentados os diagramas carga versus deslocamento de cada ensaio utilizando o ajuste de curva hiperbólico apresentado neste item. Nos diagramas referentes ao *cluster* foram apresentadas curvas de uma estaca do grupo (carga média) para melhor visualização, visto que as estacas de cada *cluster* tiveram comportamentos muito próximos, mostrando o bom funcionamento do elo.

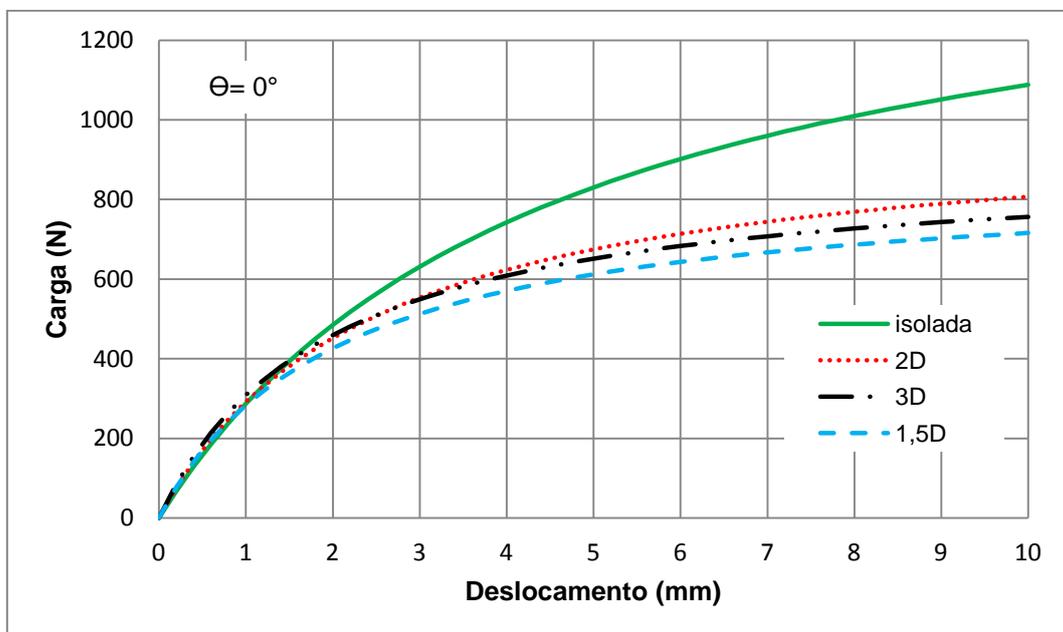


Figura 4.7 Ajuste Hiperbólico- carregamento horizontal versus deslocamento (estaca isolada e clusters)

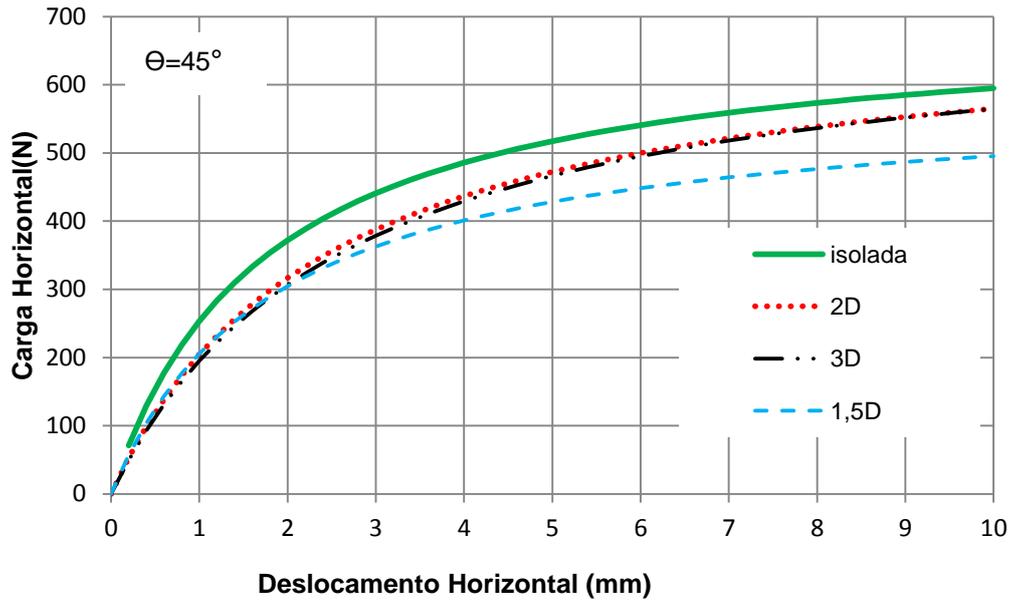


Figura 4.8 Ajuste Hiperbólico- carregamento inclinado a 45° , componente horizontal versus deslocamento (estaca isolada e *clusters*)

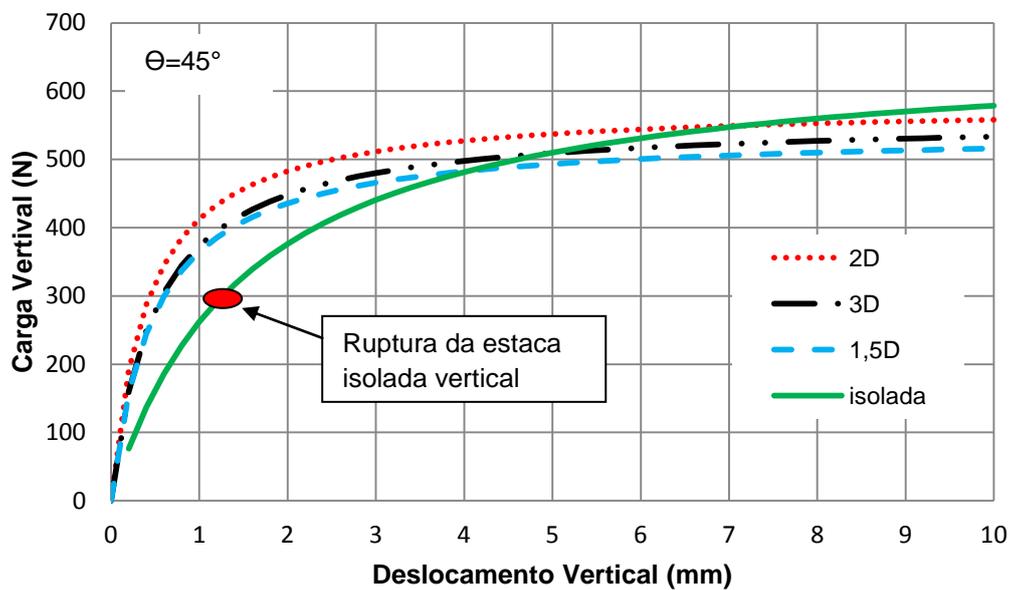


Figura 4.9 Ajuste Hiperbólico- carregamento inclinado a 45° , componente vertical versus deslocamento (estaca isolada e *clusters*)

No ajuste de curva dos ensaios de carregamento horizontal (Figura 4.7) conforme foi observado nos valores medidos, a carga de ruptura do *cluster*

superou 40% carga de ruptura da estaca isolada. Com relação a variação no espaçamento entre as estacas do *cluster*, nota-se um melhor desempenho para o espaçamento 2D. Esses resultados serão discutidos em detalhes mais adiante.

No ajuste de curvas dos ensaios de carregamento inclinado (Figuras 4.8 e 4.9) a carga de ruptura do *cluster* supera 50% a carga de ruptura da estaca isolada. Na variação do espaçamento entre as estacas do *cluster*, para este ensaio também é observado um ganho de resistência principalmente para o espaçamento 2D. É importante destacar que o carregamento inclinado da estaca isolada, apresenta uma resistência vertical de aproximadamente o dobro da resistência observada no ensaio puramente vertical, como indicado na Figura 4.9. A mesma tendência se observa ao deslocamento até a ruptura.

Nos ensaios com $\Theta=0^\circ$ e $\Theta=45^\circ$, o *cluster* com espaçamento de 2D obteve melhor eficiência em relação aos outros (Figura 4.10). A eficiência calculada é a relação da carga do grupo pela carga da estaca isolada para cada espaçamento ensaiado. Fazendo uma comparação entre os dois ensaios apresentados nesta figura, observa-se que as estacas utilizadas no *cluster* submetidas ao carregamento de $\Theta=45^\circ$ apresentaram um ganho de resistência em relação às estacas submetidas ao carregamento horizontal.

Na apresentação dos ensaios com $\Theta=90^\circ$, observa-se que o espaçamento entre as estacas do *cluster* não teve influência significativa, visto que as cargas foram muito próximas, entre 260 e 280N. Esse resultado demonstra que quanto mais verticalizado é o carregamento, menor a influência dos espaçamentos entre as estacas do *cluster*.

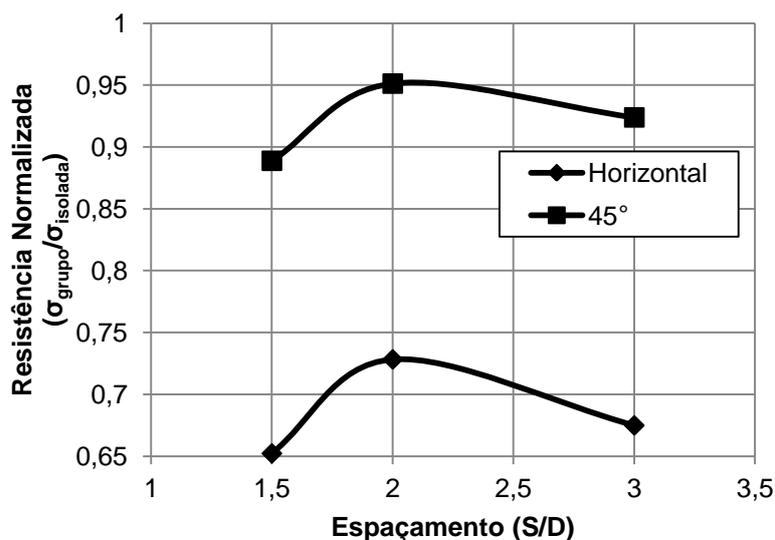


Figura 4.10 Eficiência dos ensaios horizontal e inclinado em relação aos espaçamentos no *cluster*

Objetivando trabalhar com valores mais realistas é conveniente transformar as grandezas do modelo para a escala do protótipo. De acordo com a Tabela 1.1 a transformação dos deslocamentos é dada diretamente pelo valor da escala usada, enquanto as forças são dadas pelo quadrado da escala.

Considerando que $F_{Prot} = N_g^2 F_{mod}$ foram calculados os valores de carga do protótipo utilizando os valores do modelo apresentado. As planilhas de cálculo estão no ANEXO VII.

Com os valores de carga do protótipo calculados para todos os ensaios, foi possível definir superfícies de ruptura dos modelos dos *clusters* e da estaca isolada, plotando-se carga vertical versus carga horizontal para cada arranjo. (Figura 4.11). Utilizando este diagrama foi possível prever os valores das cargas verticais e horizontais para outros ângulos de carregamento considerando uma continuidade plausível das curvas.

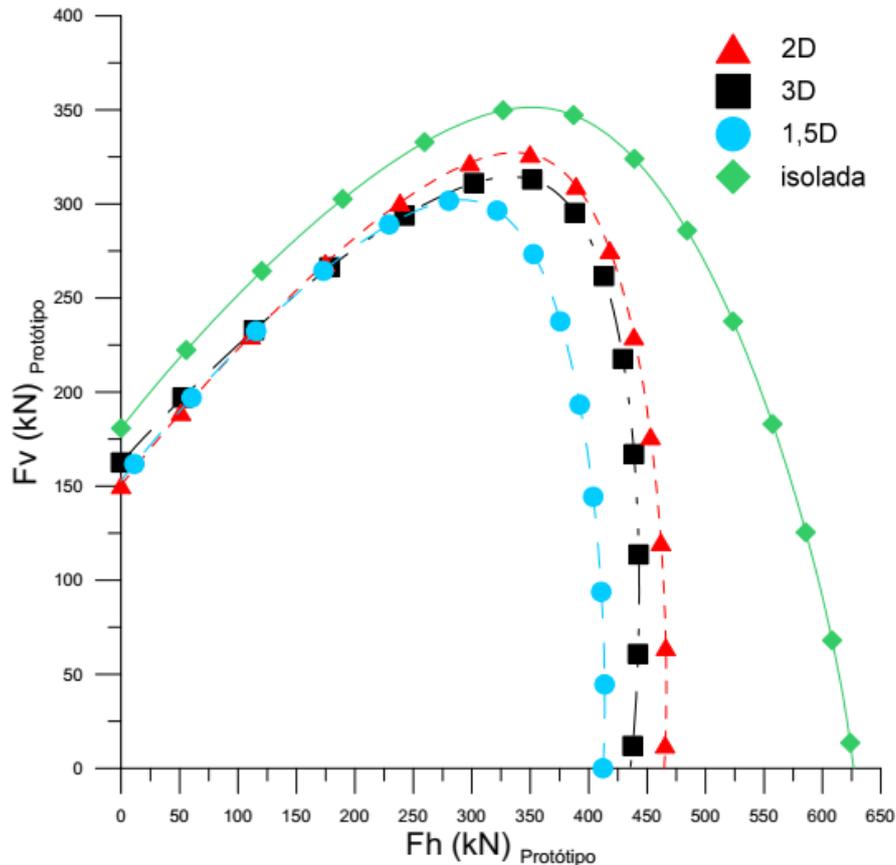


Figura 4.11 Superfícies de ruptura do protótipo

Quando o valor de uma função varia com a direção, a função pode ser convenientemente representada através de um diagrama polar. A representação da resistência última de estacas carregadas na direção oblíqua, foi apresentado através de diagramas polar por Meyerhof (1973 a,b), Meyerhof e Ranjan (1973), Meyerhof et al. (1981b) e Chattopadhyay e Pise(1986 c).

Geralmente, a vantagem do diagrama polar para a carga oblíqua é conhecer o efeito da carga inclinada. Diagramas polares em forma adimensional dão uma idéia quantitativa e qualitativa para previsão da resistência final de estacas sob cargas oblíquas.

A resistência final sob carregamento oblíquo, P_{θ} , de um grupo de estacas foi expressa em uma forma adimensional, $P_{\theta} = P_u$, em termos de capacidade de permanência axial líquida, P_u , e resistência lateral final, P_L , e o ângulo de inclinação " θ ". Na Figura 4.12 é apresentado o diagrama polar com os dados experimentais.

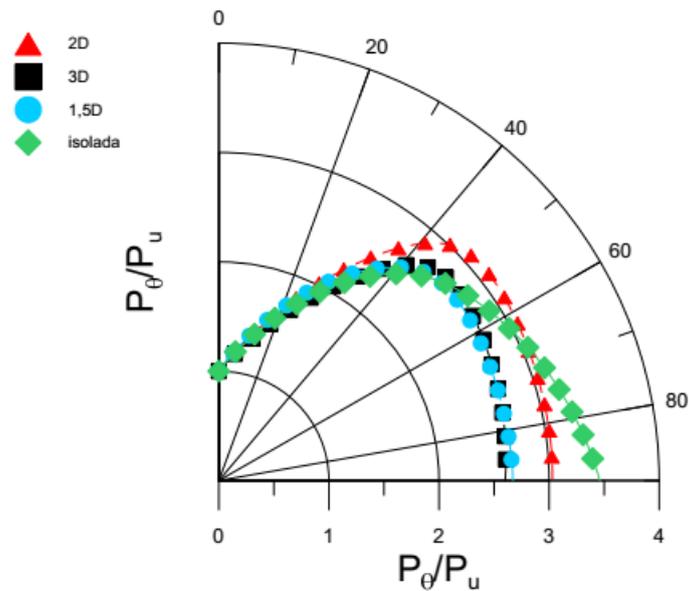


Figura 4.12 Diagrama Polar P_θ/P_u com dados experimentais

No diagrama polar apresentado na Figura 4.12, é observado que P_θ é mais dependente da componente horizontal P_L do que da componente vertical P_u em todos os ensaios realizados, independente da distância entre as estacas.

Quando:

- $\theta = 0^\circ$, $P_\theta/P_u = 1 \rightarrow P_\theta = P_u$

- $\theta = 90^\circ$, $P_\theta = P_L$

O valor de P_θ/P_u para diferentes valores de θ foram plotados no diagrama polar acima para todos os *clusters* onde $P_L/P_u \leq 1$, $P_u/P_L \geq 1$.

Métodos simplificados para estimar a resistência oblíqua última em termos da capacidade de carga axial P_u e resistência lateral última P_L , para estacas foram propostos por Poulos *and* Davis (1980). Os resultados experimentais em estacas isoladas por Meyerhof (1973), Chattopadhyay *and* Pise (1986c) indicam que a resistência ao carregamento oblíquo é uma função contínua de θ . A partir das investigações experimentais atuais, conclui-se que a resistência oblíqua final de um grupo de estacas é uma função de θ e depende de sua capacidade de carregamento axial e lateral. Descrita em

termos de diagramas polares Chattopadhyay *and* Pise (1986c) propuseram uma abordagem semi-empírica para uma estaca isolada. Portanto, o método semi-empírico proposto por Chattopadhyay *and* Pise (1986c) é estendido para um grupo de estacas para prever a resistência última, P_{Θ} em termos de α : P_u/P_L e Θ descrito por Patra *and* Pise (2006).

$$\frac{P_{\Theta}}{P_u} = \cos^2 \theta \times \exp \left[- \left(\left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) \frac{\theta}{90^\circ} \right) \right] + \frac{\sin \theta}{\alpha} \times \exp \left[- \left(\left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) \frac{\theta}{90^\circ} \right) \right] \quad 4.6$$

Onde:

P_{Θ} : é a resistência última no carregamento oblíquo de um grupo de estacas;

P_u : é a resistência última no carregamento axial de um grupo de estacas;

P_L : é a resistência última no carregamento lateral de um grupo de estacas;

α : P_u/P_L .

Empregando a proposta de Patra *and* Pise (2006) com seu método semi-empírico para um grupo de estacas, valores encontrados nos ensaios executados neste trabalho para os *clusters* ensaiados foram usados na Equação 4.6 e os valores obtidos foram plotados no diagrama polar apresentado na Figura 4.13. Verificou-se uma tendência clara de variação qualitativa na resistência final dos grupos de estacas. Comparando os resultados experimentais com a previsão semi-empírica, observa-se uma semelhança onde os valores experimentais aproximam-se muito das previsões do método semi-empírico.

Tanto nos valores experimentais quanto na previsão semi-empírica, a resistência final do *cluster* diminui quando o carregamento se aproxima da verticalidade ($\Theta=90^\circ$), como esperado. A Figura 4.14 é um diagrama $\Theta \times P_{\Theta}$ onde foram plotados os resultados experimentais e os valores calculados pela Equação 4.6. A curva da estaca isolada com os valores experimentais tem a mesma tendência da curva com os valores da Equação 6. No entanto para ângulos compreendidos entre 20° e 60° , o modelo subestima a resistência. As curvas referentes ao *cluster* se apresentam de forma coerente, porém com a mesma tendência observada para a estaca isolada, isto é, não há interação entre as cargas para ângulos entre 20° e 60° , sendo esta diferença bem mais

evidente do que para estaca isolada. É importante ressaltar que o modelo desenvolvido por Patra *and* Pise (2006), foi baseado em grupos de estacas com bloco.

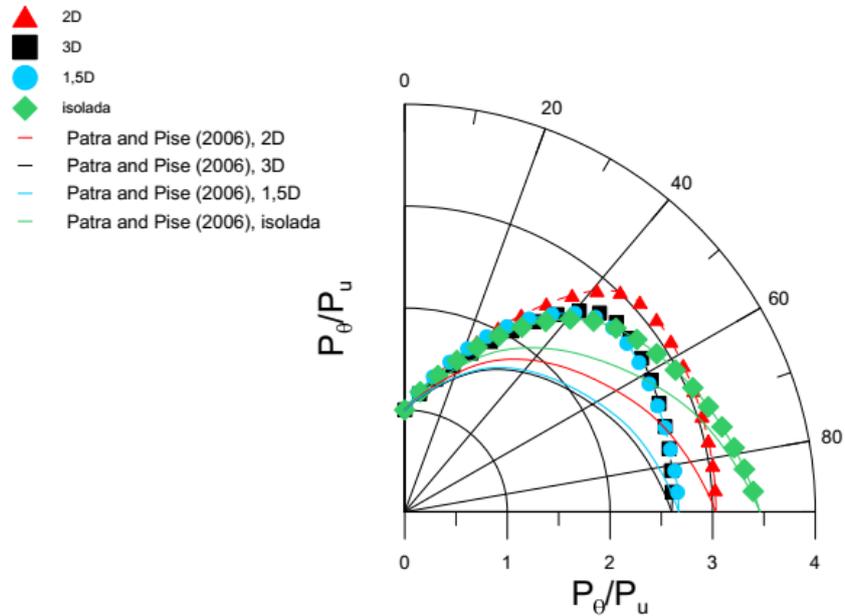


Figura 4.13 Diagrama polar P_θ/P_u com dados experimentais e semi-empíricos proposto por Patra *and* Pise (2006)

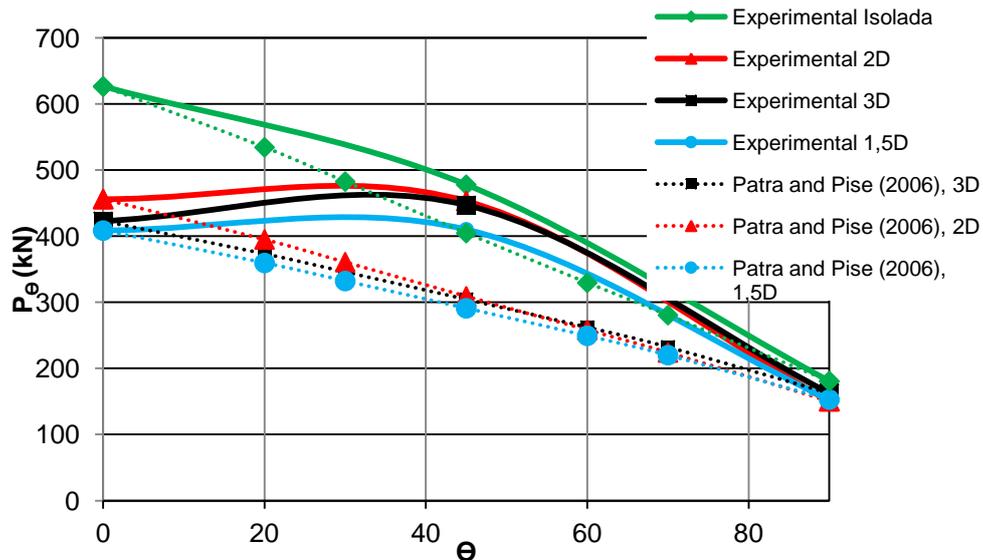


Figura 4.14 Diagrama $\Theta \times P_\theta$ comparando os resultados experimentais com os resultados utilizando modelo de Patra *and* Pise (2006)

Outro trabalho utilizando equações semi-empíricas para analisar a resistência final em carregamento oblíquo de estacas, foi proposto por Das et al. (1976). Neste trabalho a equação proposta se divide em duas parcelas, a primeira relacionada ao carregamento vertical e a segunda ao carregamento lateral.

Empregando os valores experimentais na equação semi-empírica proposta por Das et al. (1976), foi possível traçar um diagrama polar com os valores obtidos nos ensaios e valores utilizando a Equação 4.7.

$$\frac{P_{\theta} \operatorname{sen} \theta}{P_u} + \left(\frac{P_{\theta} \operatorname{cos} \theta}{P_L} \right)^2 = 1 \quad 4.7$$

Onde:

P_{θ} : capacidade de carga da estaca com inclinação Θ ,

P_L : capacidade de carga lateral,

P_u : capacidade de carga vertical.

Diferente do que foi observado no diagrama da Figura 4.13, os valores obtidos utilizando a Equação 4.7 não mostram uma tendência da iteração do ângulo de carregamento com a resistência final dos grupos de estacas. Os valores experimentais plotados no diagrama polar da Figura 4.15 não se aproximam dos encontrados no método semi-empírico, mostrando assim, que a proposta de Das et al. (1976) não se ajusta bem a previsão de resistência sob carregamento oblíquo, onde pouca interação entre valores de carga inclinada e os valores de referência P_L e P_u é observada.

A fim de confirmar a tendência encontrada na Figura 4.13 curvas utilizando valores experimentais e obtidos na Equação 4.7 foram plotadas na Figura 5.16. Através dessas curvas observa-se que os valores experimentais utilizados geram curvas inversas (diminuição de resistência com Θ) quando utiliza-se a equação Proposta por Das et al. (1976), confirmando que para esse tipo de ensaio a proposta desses autores não é validada, principalmente na inclinação de $\Theta=45^\circ$, que utilizando o método mostra o menor valor de carga.

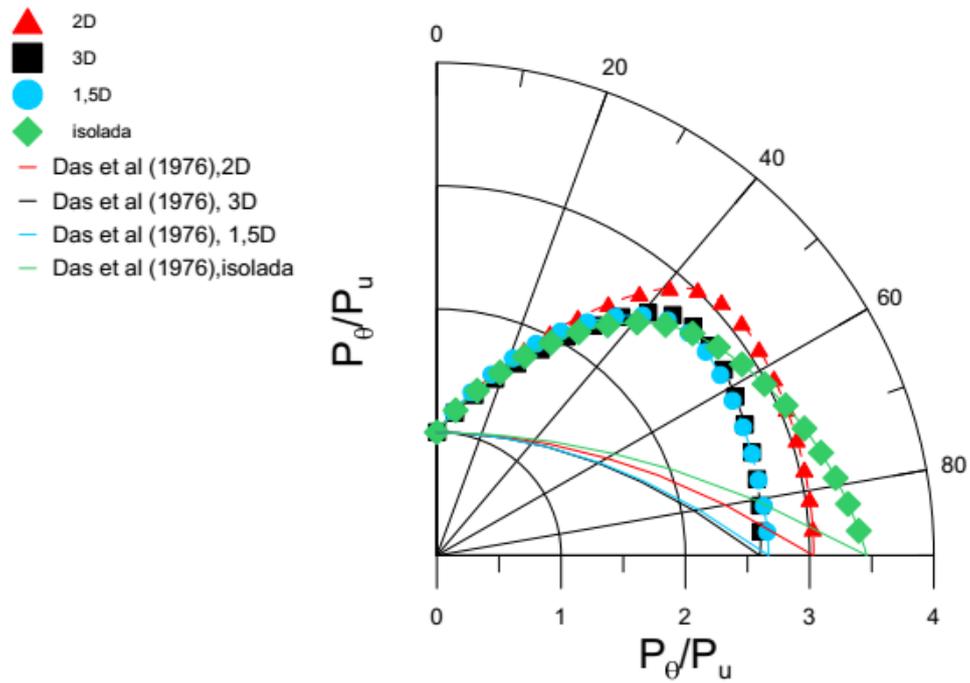


Figura 4.15 Diagrama polar P_e/P_u com dados experimentais e semi-empíricos proposto por Das et al. (1976)

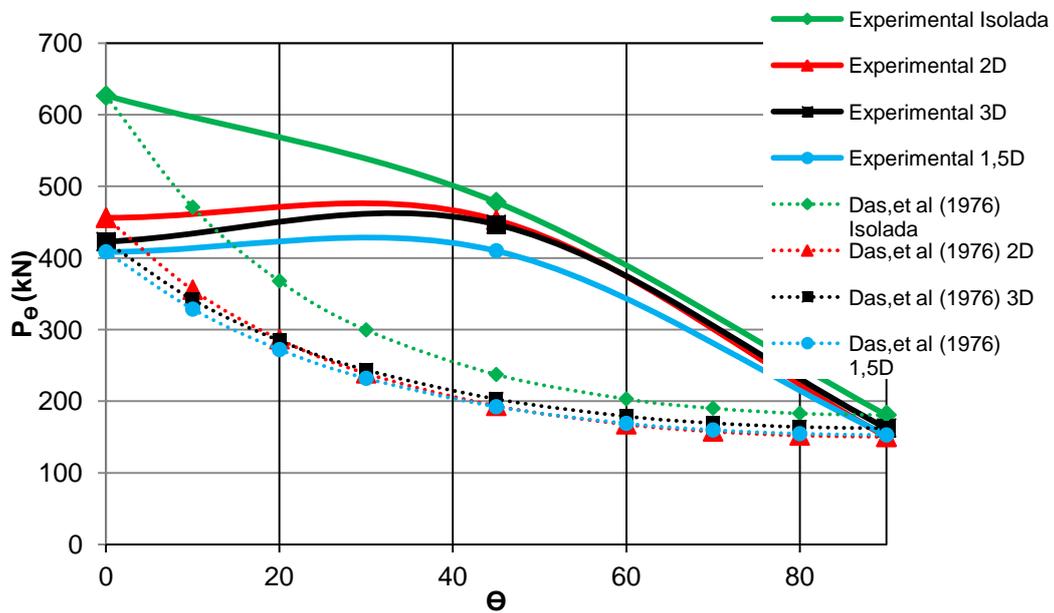


Figura 4.16 Diagrama $\theta \times P_e$ comparando os resultados experimentais com os resultados utilizando modelo de Das et al. (1976)

Os métodos semi-empíricos apresentados acima foram baseados em trabalhos de diversos autores que buscam estudar a resistência oblíqua de

estacas em função do ângulo de carregamento. A proposta do trabalho Chattopadhyay *and* Pise (1986b) para previsão de resistência última no carregamento oblíquo, utiliza a Equação 4.8 onde a resistência última oblíqua está em função do ângulo de carregamento, da componente vertical e componente horizontal.

$$P_{\alpha} = P_u \cos^2 \alpha \times \exp \left[- \left(\left(\frac{1-m}{1+m} \right) \frac{\alpha^\circ}{90^\circ} \right) \right] + P_L \operatorname{sen} \alpha \times \exp \left[- \left(\left(\frac{1-m}{1+m} \right) \frac{90^\circ - \alpha^\circ}{45^\circ} \right) \right] \quad 4.8$$

Onde:

α : ângulo de carregamento com a horizontal,

P_L : carga última horizontal,

P_u : carga última vertical,

$$m = P_u / P_L$$

Na Figura 4.17 é apresentado o diagrama polar com os valores experimentais e os valores obtidos usando a Equação 4.8. Conforme observado no método de Patra *and* Pise (2006), para este método também existe uma semelhança entre os valores experimentais e a previsão teórica. Uma observação importante é que nas previsões teóricas os valores de resistência relacionados ao ângulo de 45° não mostram um acréscimo de resistência como apresentado nas curvas experimentais.

De acordo com a Figura 4.18 torna-se mais evidente o comportamento das curvas no que se diz respeito principalmente a carga inclinada P_{Θ} . O método de Chattopadhyay *and* Pise (1986) para as estacas do *cluster* apresenta um ajuste semelhante ao encontrado nos resultados experimentais. No entanto, para a estaca isolada, a curva da proposta dos autores difere daquelas encontradas nos ensaios experimentais para ângulo entre 20° e 60°, indicando que, para o modelo proposto, a resistência ao arrancamento vertical é predominante para os referidos ângulos. Isto é, as curvas apresentam um tendência de queda de resistência com o ângulo Θ .

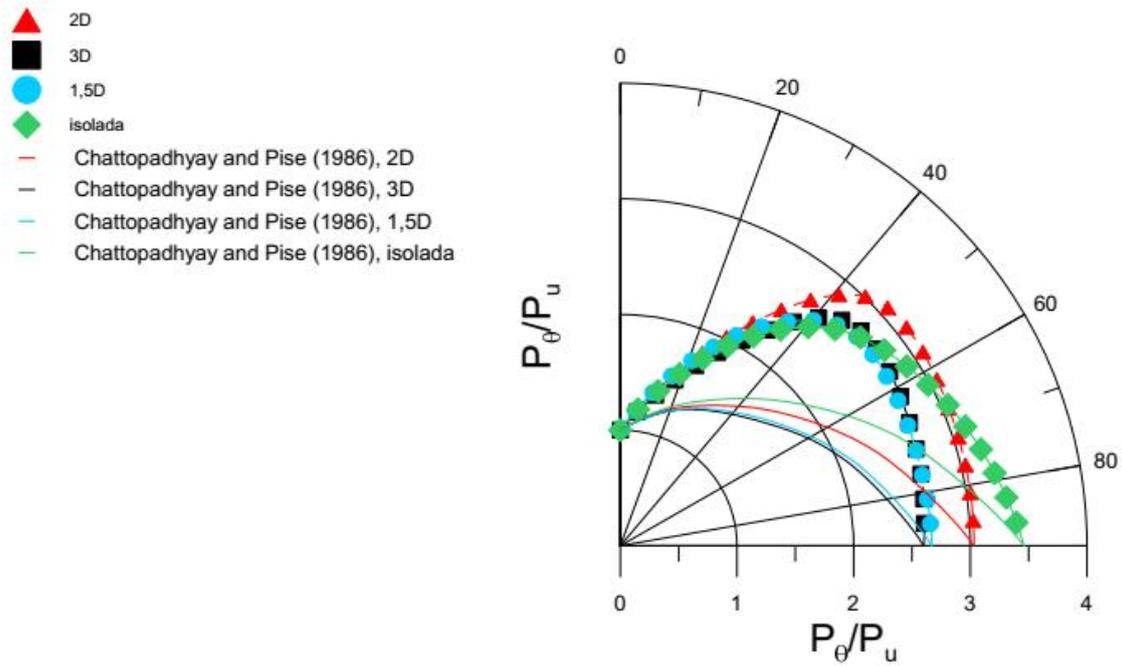


Figura 4.17 Diagrama polar P_{θ}/P_u com dados experimentais e semi-empíricos proposto por Chattopadhyay and Pise (1986b)

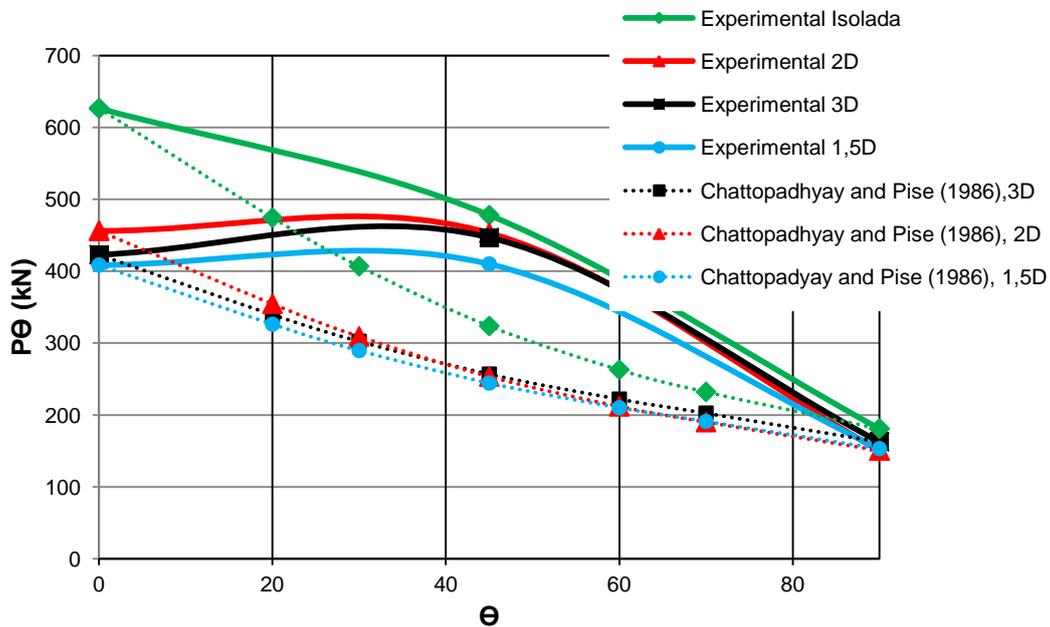


Figura 4.18 Diagrama $\Theta \times P_{\theta}$ comparando os resultados experimentais com os resultados utilizando modelo de Chattopadhyay and Pise (1986)

A idéia da utilização do *cluster* é instalar um grupo de estacas que trabalhem de forma isolada, porém aumentem a capacidade da carga do

conjunto. Mesmo considerando que cada estaca do *cluster* é independente, diferente da situação com o carregamento de uma estaca isolada, neste caso o deslocamento de uma estaca contribui para o deslocamento da outra, assim acontece o fenômeno de interação entre estacas. Com o progresso do deslocamento, cada estaca cria uma zona de influência representada geometricamente por um cone, que pode se sobrepor a zona de influência gerada pela estaca adjacente. Esta sobreposição depende basicamente do espaçamento entre as estacas que compõem o *cluster*.

De acordo com Elhakim et al. (2014), o efeito de uma sobreposição que ocorre entre estacas alinhadas é chamada de efeito de borda, enquanto que uma sobreposição que ocorre entre estacas em diferentes linhas é chamado de efeito de sombreamento. Esta sobreposição nas zonas de cisalhamento resulta numa menor resistência lateral por estaca. A sobreposição nas zonas de cisalhamento que ocorre dentro de um grupo de estacas é ilustrado na Figura 4.19.

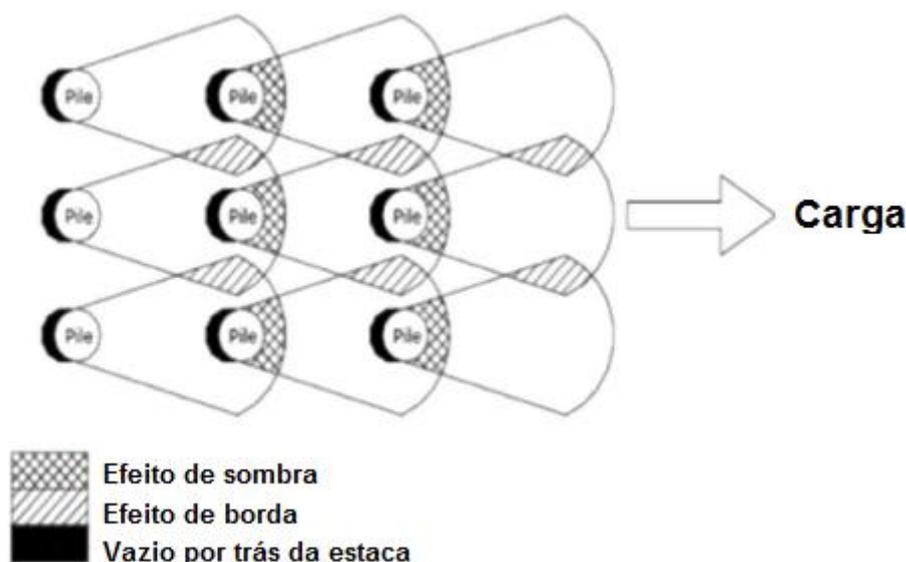


Figura 4.19 Ilustração dos efeitos de sombra e borda no carregamento lateral de um grupo de estacas. Fonte: Elhakim et. al. (2014).

Os gráficos apresentados nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 mostram a carga de carregamento versus o espaçamento entre as estacas ensaiadas. Na Figura 4.20 são apresentados os valores da componente horizontal versus o espaçamento entre as estacas. Nota-se que no caso das estacas isoladas há uma perda de resistência à medida que o carregamento vai se verticalizando, ou seja, quando Θ tende a 90° . Para as estacas do *cluster*, observa-se que a distância entre elas influencia na resistência, onde o espaçamento $1,5D$ mostra a menor resistência em relação aos demais ensaiados. Essa diminuição da resistência para todos os carregamentos confirma que o efeito de sobreposição na zona do cisalhamento, influencia diretamente na capacidade de permanência das estacas. Nos ensaios próximos da horizontal ($\Theta=0^\circ$), o *cluster* com espaçamento $2D$ apresentou melhor resistência em relação aos outros espaçamentos principalmente para ângulos menores que 45° .

Na Figura 4.21 são apresentadas as curvas relacionadas à componente vertical versus espaçamento. Observa-se que as resistências se dividem em dois grupos diretamente relacionados aos ângulos de carregamento. O primeiro grupo está ligado aos carregamentos entre 20° e 45° e o segundo grupo de 60° a 90° . Nota-se que tanto para a estaca isolada quanto para o *cluster* não houve variação significativa na carga de permanência das estacas, mostrando que o espaçamento entre as estacas para carregamentos verticais não gera influência, ao menos para densidade ensaiada. Nesse carregamento o que vai predominar é o atrito solo/estaca e não a zona de influência entre uma estaca e outra no *cluster*.

As curvas apresentadas na Figura 4.22 confirmam que no carregamento inclinado a parcela que mais contribui para o aumento da resistência está relacionada à componente horizontal. Para as cargas entre 60° e 90° a resistência final é praticamente constante tanto para a estaca isolada quanto para os *clusters* ensaiados, mostrando que a capacidade de permanência para esses casos independe da interação entre as estacas. O que não é observado para carregamentos com inclinação de 0° a 45° , que apresentam cargas muito próximas nas estacas do *cluster* e influência significativa das estacas vizinhas. Esta figura deixa evidente que existe um espaçamento ideal para uma melhor eficiência na utilização do *cluster* e que para estacas instaladas muito próximas

existe a perda dessa eficiência como aconteceu com o *cluster* de espaçamento 1,5D.

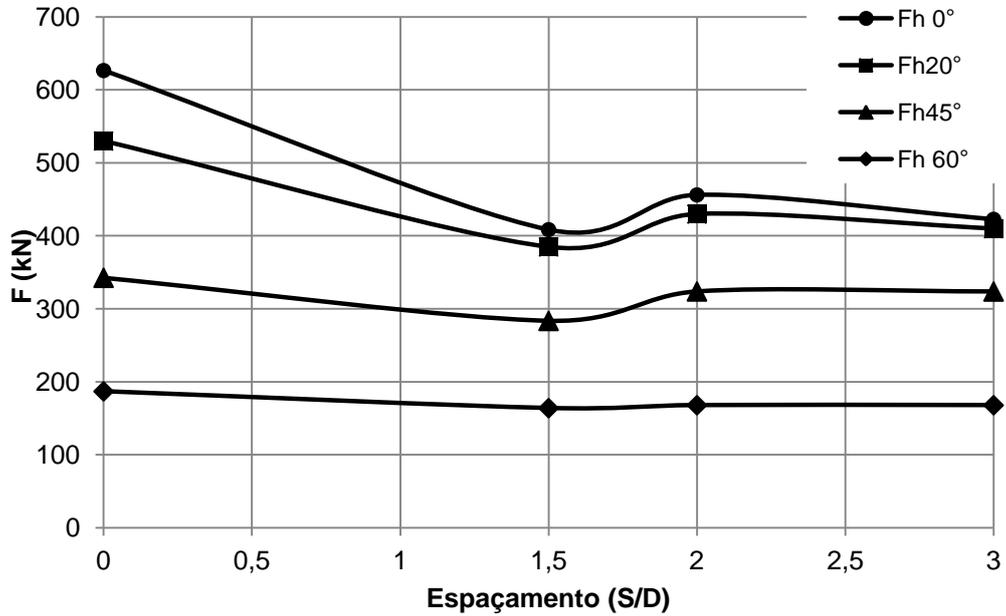


Figura 4.20 Carga Horizontal do protótipo versus espaçamento entre as estacas

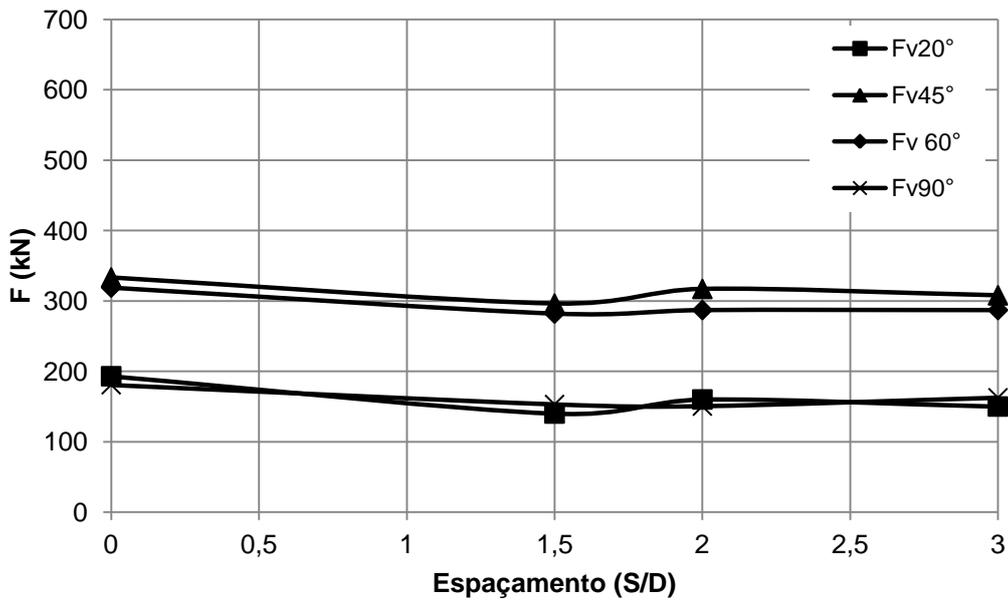


Figura 4.21 Carga Vertical do protótipo versus espaçamento entre as estacas

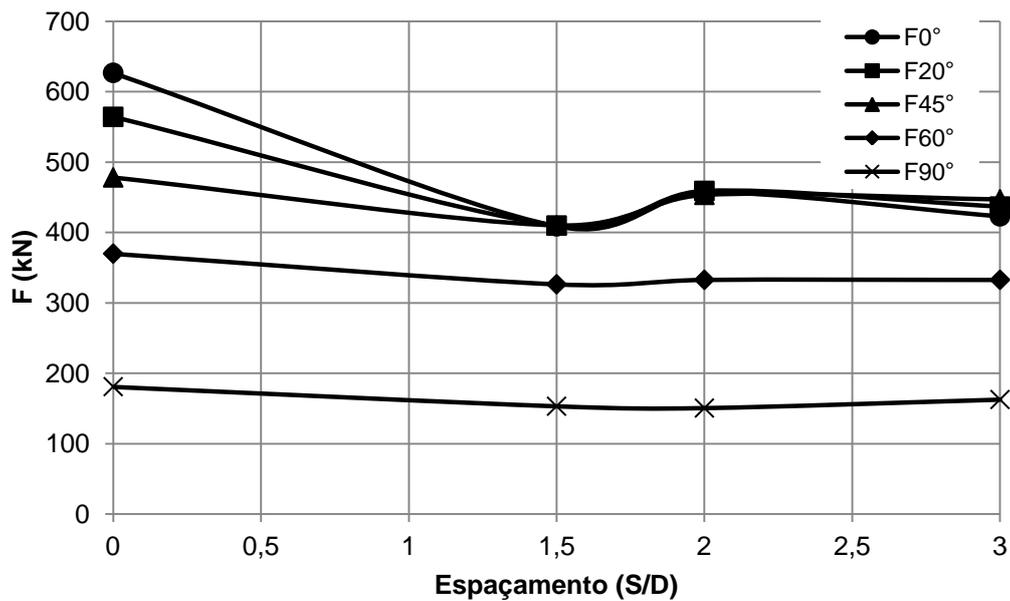


Figura 4.22 Carga Resultante do protótipo versus espaçamento entre as estacas

5- CONCLUSÕES

Este trabalho buscou estudar através da modelagem reduzida em gravidade modificada a eficiência do uso de *cluster* de estacas, usando estacas de menor dimensão objetivando diminuir a quantidade de linhas de ancoragem por estaca. Foram realizados doze ensaios em centrífuga geotécnica a 24xg, com *cluster* de duas estacas e estacas isoladas instaladas em areia fofa. Os dados apresentados mostram importantes resultados.

Os ensaios realizados em centrífuga foram capazes de representar as características do modelo/protótipo, no que se diz respeito à interação dos *clusters* de estacas nos carregamentos horizontal, vertical e inclinado, sendo possível individualizar o comportamento das estacas no arranjo do *cluster* e compará-las com a estaca instalada individualmente.

As investigações experimentais realizadas mostram que as estacas que compõem o *cluster* apresentam comportamentos bem distintos em cada carregamento realizado e que o espaçamento entre elas tem influência significativa na eficiência de cada *cluster*. Para as três inclinações ensaiadas, obteve-se um ganho significativo na carga de permanência do arranjo do *cluster* em relação à estaca isolada porém não diretamente proporcional ao número de estacas do arranjo. O ensaio que obteve maior carga relativa de permanência do *cluster* foi o carregamento vertical, onde o arranjo superou 70% da carga da estaca isolada, enquanto que os ensaios de carregamento inclinado e de carregamento horizontal apresentaram 50% e 40% de ganho, respectivamente.

Com base nos arranjos ensaiados, a idéia de que no *cluster* as estacas trabalhem de forma independente, não exclui a contribuição que uma estaca vizinha exerce sobre as demais. Fica bem definido nos resultados apresentados, que a distância entre as estacas do grupo influencia na melhora da capacidade de permanência do conjunto. Para os três espaçamentos ensaiados, a maior eficiência foi àquele referente a duas vezes o diâmetro da estaca. Isso mostra que estacas que são instaladas muito próximas podem sofrer o efeito de borda diminuindo assim a resistência lateral de cada estaca isolada. Enquanto que estacas instaladas em distâncias superiores a três

vezes o diâmetro, tendem a se comportar como estacas isoladas e aparentemente não contribuem para melhoria da eficiência do grupo, mas vale ressaltar que o efeito do grupo diminui a carga da estaca de forma individual.

Outro ponto relevante a ser destacado nesta tese refere-se aos resultados relacionados ao tipo de carregamento de acordo com o ângulo de inclinação da carga. Nos resultados apresentados a estaca isolada tem o seu valor de carga duplicado no ensaio de $\Theta=45^\circ$, quando comparado ao ensaio de $\Theta=90^\circ$. Fica bem definido que para carregamentos verticais, a distância entre as estacas não apresenta contribuição significativa. Enquanto que, baseado na superfície de ruptura adotada, para carregamentos entre os ângulos 0° a 45° , o espaçamento é uma variável que tem influência expressiva na carga de permanência.

Resultados utilizando os modelos semi-empíricos dos autores citados direcionados à arranjos de estacas que trabalham de forma isolada e com grupos de estacas em bloco são empregados para fins de comparação. Os métodos semi-empíricos dos trabalhos de Patra *and* Pise (2006), Das et al. (1976) e Chattopadhyay (1986) foram desenvolvidos para grupos de estacas que trabalham como um bloco rígido. Na literatura apresentada, a maioria dos trabalhos que estudam o comportamento de um grupo de estacas carregadas na direção oblíqua considera o grupo como um único bloco. A pesquisa apresentada nesta tese buscou um embasamento teórico desses autores, mas com a perspectiva de um arranjo onde as estacas possam ter um comportamento individual, com liberdade nos deslocamentos ainda que conectadas por uma amarra ou cabo. Nesse contexto é possível afirmar que os métodos utilizados para comparação não se aplicam para o *cluster* de estacas. As estacas do *cluster* sofrem interferência das estacas vizinhas da mesma maneira em que as estacas do grupo rígido.

A utilização do diagrama polar para interpretar os resultados de carregamento oblíquo foi relevante, pois representa o valor de uma função em diferentes direções conhecendo-se o efeito da carga inclinada. A representação dos valores experimentais e dos valores obtidos usando os métodos semi-empíricos no diagrama polar demonstra que os ensaios em centrífuga foram representativos. Dos métodos escolhidos para comparação o que mais se

aproximou dos resultados experimentais foi o proposto por Prata *and* Pise (2006). No entanto, o modelo dos autores subestima a resistência entre os ângulos de 20° e 60°. Este fato pode ser explicado pelo fato desse modelo ter sido estudado para grupos de estacas que trabalham como um bloco único e rígido. Os outros métodos utilizados como comparação não mostram uma validação para ensaios de grupo, principalmente para a inclinação de $\Theta=45^\circ$ que apresentam a menor resistência, enquanto que nos ensaios experimentais o maior valor de resistência é observado no carregamento com inclinação de $\Theta=45^\circ$. Percebe-se, portanto que nos modelos citados, a interação entre as estacas não é devidamente considerada.

A pesquisa apresentada nesta tese obteve resultados satisfatórios para o desenvolvimento de novas técnicas aplicadas aos sistemas *off-shore*. O aumento da capacidade de carga dos pontos fixos das estacas através do arranjo em *cluster* foi identificado e comprovado através dos ensaios experimentais com espaçamentos máximo de 3D. Outros arranjos de *clusters* podem ser avaliados em novas pesquisas como será sugerido no próximo item.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros que podem complementar esta pesquisa sugere-se:

- Modelagem numérica 3D dos ensaios realizados nesta tese para comparação e verificação dos resultados, principalmente para validação de inclinações nas quais não foram executados ensaios;
- Ensaios experimentais em centrífuga geotécnica utilizando um *cluster* com três estacas e *clusters* desalinhados com duas e três estacas no arranjo, para verificação da influência em duas dimensões, isto é, distância lateral e oblíqua;
- Utilização de sensores de pressão dentro da amostra de solo posicionados em diferentes profundidades e distâncias do fuste da estaca;
- Utilização de estacas com diferente rugosidade superficial;
- Ensaios experimentais em centrífuga geotécnica utilizando *clusters* submetidos ao carregamento cíclico para verificação da degradação do arranjo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. S. **Interação solo-estrutura de fundações offshore do tipo estaca**. Dissertação de m.sc., programa de engenharia civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

AYOTHIRAMAN. R; BOOMINATHAN. A. **Depth of Fixity of Piles in Clay Under Dynamic Lateral Load**. Geotech Geol Eng, 31:447–461, 2012.

BASACK, S. **Experimental Investigation of Pile Group under Lateral Cyclic Load in Layered Soil**. Dept. of Applied Mechanics, Bengal Engineering and Science University Howrah, India -711103, 2007

BOOM, W de et al. **Floating production systems**. 17th International ship and offshore structures congress, Seoul, Korea, 16-21 August 2009.

BOULANGER, R.W; CURRAS, C.J.; KUTTER, B.L.; WILSON, D.W.; ABGHARI, A. **Seismic soil–pile-structure interaction experiments and analysis**. J Geotech Geoenviron Eng ASCE, 125(9):750–9, 1999.

BROMS. **Discussion of Piles in cohesionless soil subject to oblique pull by Y. Yoshimi**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 91: 199-205, 1965.

CARNEIRO, F.L. **Análise dimensional e teoria da semelhança dos modelos físicos**. 2^a Ed., Rio de Janeiro, editora UFRJ, 258p, 1993.

CHAKRABARTI, S.K. **Hydrodynamics of offshore structures**, Editora Computational Mechanics, 1987.

CHANDRASEKARAN SS, BOOMINATHAN A, DODAGOUDAR GR. **Experimental Investigations on the Behaviour of Pile Groups in Clay Under Lateral Cyclic Loading**. Geotech Geol Eng, 603-610, 2010.

CHATTOPADHYAY, B. C., PISE, P. J. **Uplift capacity of piles in sand.** Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 112(9), 888–903, 1986a.

CHATTOPADHYAY, B. C., PISE, P. J. **Ultimate resistance of vertical piles to oblique pulling loads,** Proceedings 1st East Asian Conference on Structural, Engineering and Construction, Bangkok, 1, 1632–1641, 1986b.

CHATTOPADHYAY, B. C., PISE, P. J. **Ultimate resistance of vertical piles to oblique pulling loads.** Proceedings IST East Asian Conference on Structural Engineering and Const., Bangkok, Vol. 1, pp. 1632–1641, 1986c.

CHOO, W.Y., Kim, S., KIM, J., KIM, D., KWON, O. **Pullout resistance of group suction anchors in parallel array installed in silty sand subjected to horizontal loading – Centrifuge and numerical modeling.** Ocean Engineering (107) 85–96, 2015.

COSTA, R. G. B. **Análise Paramétrica das Condições de Ancoragem de Plataformas Offshore Utilizando Estacas Torpedo a Partir de Modelos em Elementos Finitos.** Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

DAS, B. M. Seeley, G. R., and RAGHU, D. **Uplift capacity of model piles under oblique loads.** Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. 102: 1009-1013, 1976.

ELHAKIM, A.F., KHOULY, M. A. A. E., AWAD, R. **Three dimensional modeling of laterally loaded pile groups resting in sand.** Housing and Building National research Center, 12.78-97, 2014.

FERNANDES, A.C., ARAÚJO, J.B., ALMEIDA, J.C.A., Diniz, R., MATOS, V. **Torpedo Anchor Installation Hydrodynamics**. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 128:286-293, 2006.

HAJIALILUE-BONAB, M., CHAZELAS, J. L., LAVACHER, D. **Procedures Used for Dynamically Laterally Loaded Pile Tests in a Centrifuge**. *Geotechnical Testing Journal*, Vol.30, No1., 2015

ISMAEL, N. F. **Field test on bored piles subjected to axial and oblique pull**, *Journal of Geotechnical Engineering Division*. ASCE, 115(11), 1588–1598, 1989.

LAVIERI, R. S. **Métodos de Navegação Inercial Aplicados a Lançamentos Submarinos**. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil. 2011.

MADABHUSHI, S. **Centrifuge Modelling for Civil Engineers**. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA, 2014.

MANSTRANGELO, C. F. et al. **From Early Production Systems to the Development of Ultra Deepwater Fields – Experience and Critical Issues of Floating Production Units**. *Annual Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, U.S.A, 2003.

MEMARPOUR, M.M., KIMIAEIB, M., SHAYANFAR, M., KHANZADI, M., 2011, **Cyclic lateral response of pile foundations in offshore platforms**. *Computers and Geotechnics* 42- 180–192, 2011.

MEYERHOF, G. G. and RANJAN, G. **The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand, III: pile groups**. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, 10, 428–438, 1973.

MEYERHOF, G. G., MATHUR, S. K. and VALSANGKAR, A. J. **Lateral resistance and deflections of rigid walls and piles in layered soils.** Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 18(2), 159–170, 1981a.

MEYERHOF, G. G., MATHUR, S. K. and VALSANGKAR, A. J. **The bearing capacity of rigid piles and pile groups under inclined loads in layered sand.** Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 18, 514–519, 1981b.

MEYERHOF, G. G. and RANJAN, G. **The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand, III: pile group.** Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 10, 428–438, 1973.

MORENO, J.S. **Proposta de Metodologia para Critério de Projeto de Fundações de Estacas de Sucção para TLP.** Tese de D. SC., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

O'LOUGHLIN, C.D., RANDOLPH, M.F., RICHARDSON, M. **Experimental and Theoretical Studies of Deep Penetrating Anchors.** CD-ROM Proceedings of the 2004 Offshore Technology Conference, Houston: Houston's Reliant Center at Reliant Park, paper n^o OTC 16841, 2004a.

Oversen, J.H. **Contribution to Discussion on the use of physical models in design.** Proceedings 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton. Vol. 4 pp. 319-323, 1979.

PANDO, M.A. **Analyses of Lateral Loaded Piles with P-Y Curves - Observations on the Effect of Pile Flexural Stiffness and Cyclic Loading,** NCDOT 7th Geo3 T2, Raleigh, NC, Session 3B - Geotechnical II (Room: Pinehurst) - Paper: 3B-1_A49, 2013.

PATRA, N. R., KRISHNA, B. **Effect of compressive load on oblique pull-out capacity of model piles in sand.** Geotechnical and Geological Engineering, 593-614, 2006.

PATRA, N. R., PISE, P. J. **Model pile groups under pullout loads-an investigation.** Geotechnical and Geological Engineering, 265-282, 2006.

Poulos, H. G. and Davis, E. H. **Pile foundation analysis and design.** 1st ed., John Wiley and Sons, New York, USA, 1980.

Pokrovsky, G. Y.; Fedorov, I. S. **Studies of soil pressures and soil deformations by means of a centrifuge, 1,** Proc. 1st Int. Conf. On Soil Mechanics & Foundation Engineering, 1936.

Purkayastha, R.D., S. Dey. **Behavior Of Cyclically Loaded Model Piles In Soft Clay.** Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri – Rolla. Pp: 1-9, 1991.

RANDOLPH, M.F., HOUSE, A.R. **The Complementary roles of physical and computational modeling.** Report n. G: 1522, The University of Western Australia, Australia, 2001.

RATTON, R.B. **Ensaio Triaxiais em Areia Saturada.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 167 p, 1993.

SANTIAGO, P. A. C. **Estudo Experimental do Arrancamento de Dutos Enterrados Ancorados com Geogrelhas Utilizando Centrífuga Geotécnica.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, p. 101, 2010.

SCHOFIELD, A.N. **Cambridge geotechnical centrifuge operations.** Geotechnique 30 (3), 227-268, 1980.

SUKUMARAN, B. **A better Option for Deep Water Applications**. Proceedings of the SWE Annual Conference, Houston, Tx, 1998.

TATSUOKA, F., OKAHARA, M., TANAKA, T., TANI, K., MORIMOTO, T., SIDDIQUEE, M.S.A. **Progressive Failure and Particle Size Effect in Bearing Capacity of a Footing on Sand**. Geotechnical Engineering Congress, McLean, F., Campbell, D.A., and Harris, D.W., Editors, ASCE Geotechnical Special Publication No. 27, Vol. 2, Proceedings of a congress held in Boulder, Colorado, USA, June 1991, pp. 788-802, 1991.

TATSUOKA, F., SIDDIQUE, M.S.A., PARK, C-S, SAKAMOTO, M., ABE, F. **Modelling stress-strain relations of sand**. Soils and Foundations, 33(2): 60-8, 1993.

TAYLOR R.N. **Geotechnical Centrifuge Technology**. Blackie Academic & Professional, 1ª Ed, 1995.

TUNA, C. T. **Ensaio e Análise de Resposta de Estacas em Solo Residual do Granito Sob Ações Horizontais**, Teses de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2006.

WOOD DM, CREWE A, TAYLOR C. **Shaking table testing of geotechnical models**. Int J Phys Modell Geotech 1:1–13, 2002.

ANEXO I

Anexo I - Calibração do Pluviador

Para o Pluviador foram construídos três conjuntos de hastes de ferro rosqueadas com discos perfurados (Figura I.1). Cada conjunto é composto por três discos com diferentes diâmetros nos furos. O conjunto utilizado na tese foi o composto por discos com furos de 5mm de diâmetro (Figura I.2).

Na Figura I. 4 é apresentado o gráfico de calibração do pluviador para o conjunto de haste com discos perfurados em 5mm. Variou-se a altura de queda de 5 cm a 30 cm, considerando esta altura a partir da base do primeiro disco da haste. Em cada altura determinou-se o peso do material depositado e o volume ocupado para o cálculo da densidade relativa.

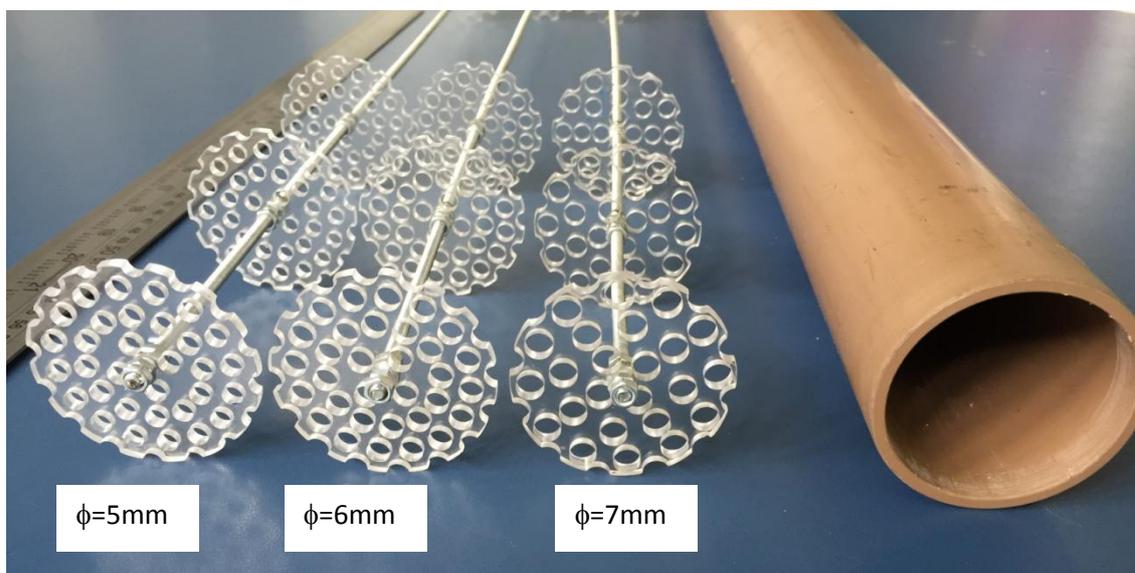


Figura I.1 Hastes com discos perfurados

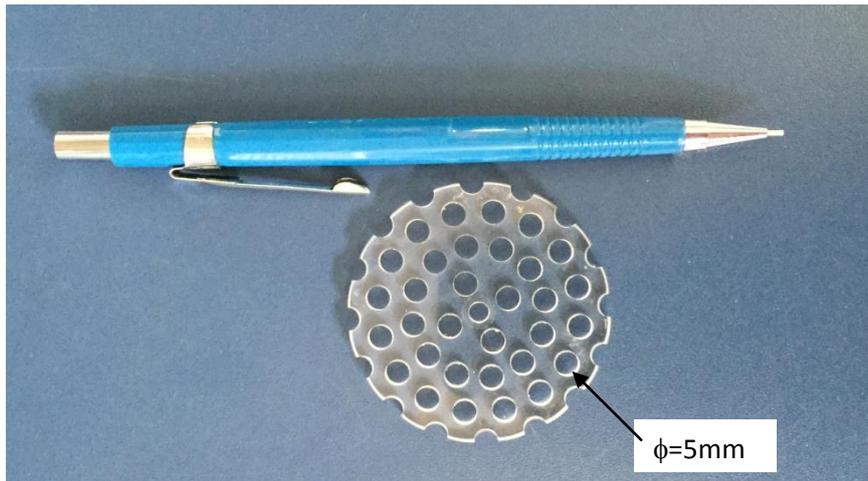


Figura I.2 Disco perfurado com diâmetro de 5mm



Figura I.3 Pluviador

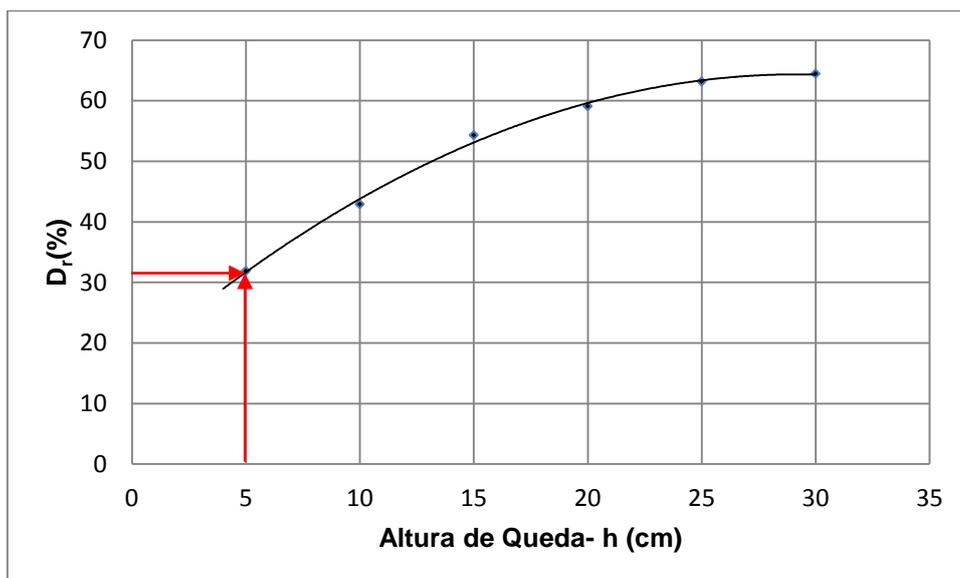


Figura I.4 Gráfico de calibração D_r x h

ANEXO II

Anexo II - Calibração da Célula de Carga

Para calibração da célula de carga ELH-TC590 utilizou-se um pórtico de calibração do laboratório, onde o instrumento é fixado em duas peças de latão em suas extremidades rosqueadas (Figura II.1). A peça de latão rosqueada na parte inferior da célula possui uma haste com uma base para apoio dos pesos (Figura II.2). Pesos mortos são inseridos no conjunto e os valores correspondentes de tensão aquisitados no PXI 1052. Na Figura II.3 é apresentado o gráfico de calibração da célula de carga, onde variou-se a carga de 0N a 430N.

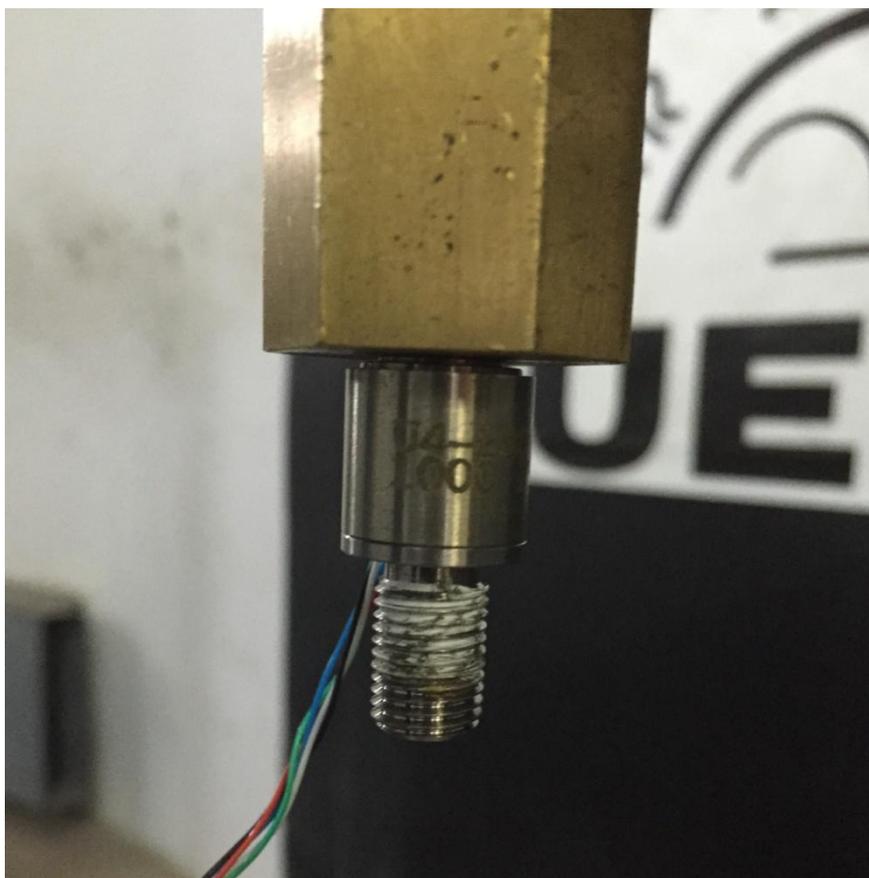


Figura II.1 Detalhe da célula de carga fixada a peça de latão



Figura II.2 Pórtico de calibração com pesos mortos

Célula: ELH-TC590-100lb (U4290)
Sentido: Tração
Módulo: NI SCXI 1121 (Slot 6)
Bloco de Terminais: NI SCXI 1321 (canal 2)
PXI:1052(centrífuga)

Excitação: 3,33V
Ganho: 100
Range: -50m - 50m

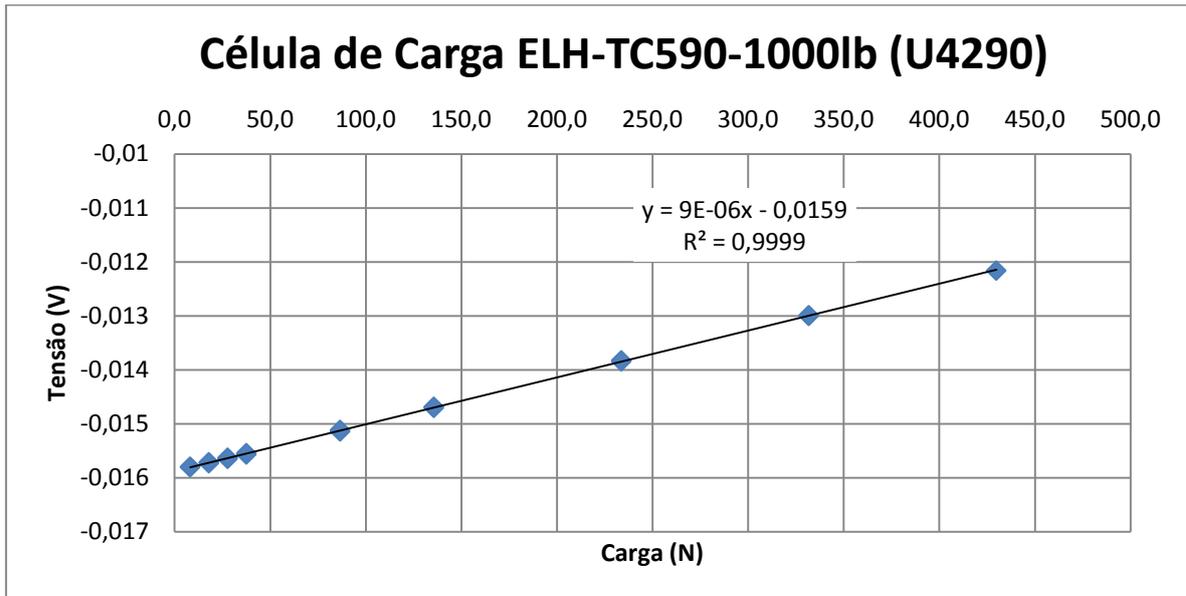


Figura II.3 Gráfico de calibração da célula de carga ELH-TC590

ANEXO III

Anexo III - Calibração dos Transdutores Potenciométricos Lineares

Os dois transdutores de deslocamento potenciométricos modelo PZ34-S-250 foram calibrados utilizando como referência uma régua linear (Figura III.1). Os valores de tensão foram adquiridos de acordo com cada deslocamento imposto no instrumento. Na Figura III.2 é apresentado o gráfico da calibração onde variou-se o deslocamento de 0mm a 250mm.

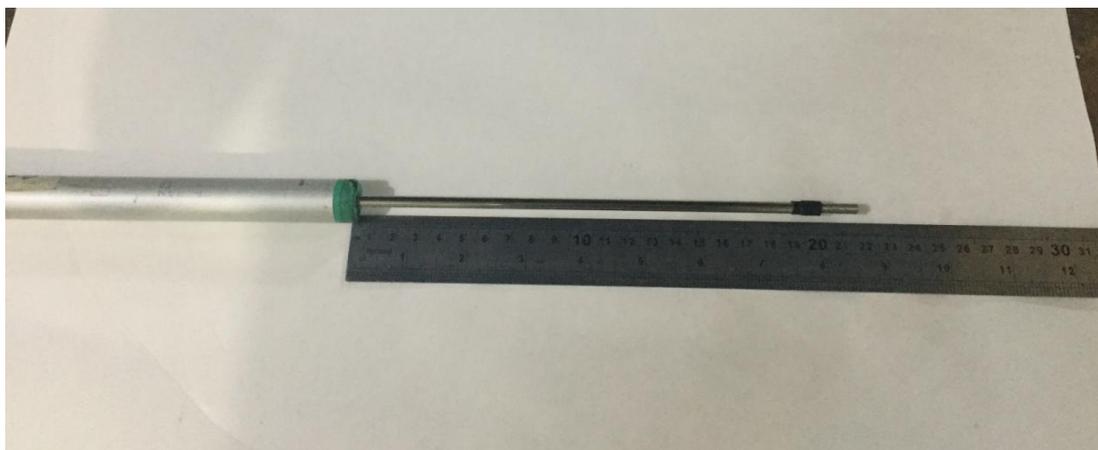


Figura III.1 Calibração do potenciométrico modelo PZ34-S-250

DADOS DO TRANSDUTOR	
Modelo	PZ-34-S-250
Range de medição	250 mm
Resistência	10K Ω
Número do transdutor	2
Canal	ai0

DADOS DA CALIBRAÇÃO	
Módulo	NI SCB 68
Tensão de alimentação	5V

Computador utilizado	NI PXI 1050 (centrífuga)
Sentido de calibração	Valores positivos com a haste entrando no transdutor
Terminal Configuration	R.S.E

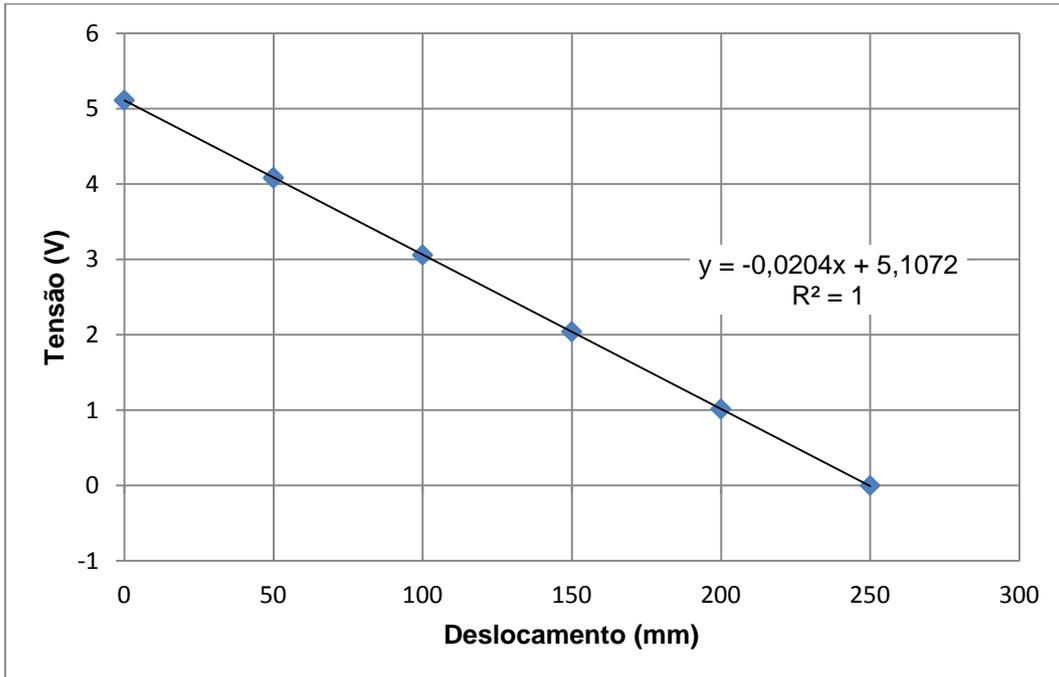


Figura III.2 Gráfico de calibração do transdutor de deslocamento potenciométrico

ANEXO IV

**Anexo IV - Calibração dos Transdutores Potenciométricos
(corda)**

Os transdutores potenciométricos de corda (19359 e 19994) modelo WPS-750-MK30-P10 foram calibrados utilizando um traçador de altura para medir os deslocamentos a cada 5mm com precisão (Figura IV.1). Nas Figuras IV.2 e IV.3 são apresentados os gráficos de calibração, onde o deslocamento variou de 0mm a 30mm.



Figura IV.1 Calibração dos transdutores WPS-750-MK30-P10

DADOS DO TRANSDUTOR	
Modelo	WPS-750-MK30-P10
Range de medição	750 mm
Resistência	10KΩ
Número do transdutor	19994(número 3)
Canal	66 (ai9)

DADOS DA CALIBRAÇÃO	
Módulo	NI SCB 68
Tensão de alimentação	5V
Computador utilizado	NI PXI 1050 (centrífuga)
Sentido de calibração	Valores positivos com a cordinha saindo do transdutor
Terminal Configuração	R.S.E

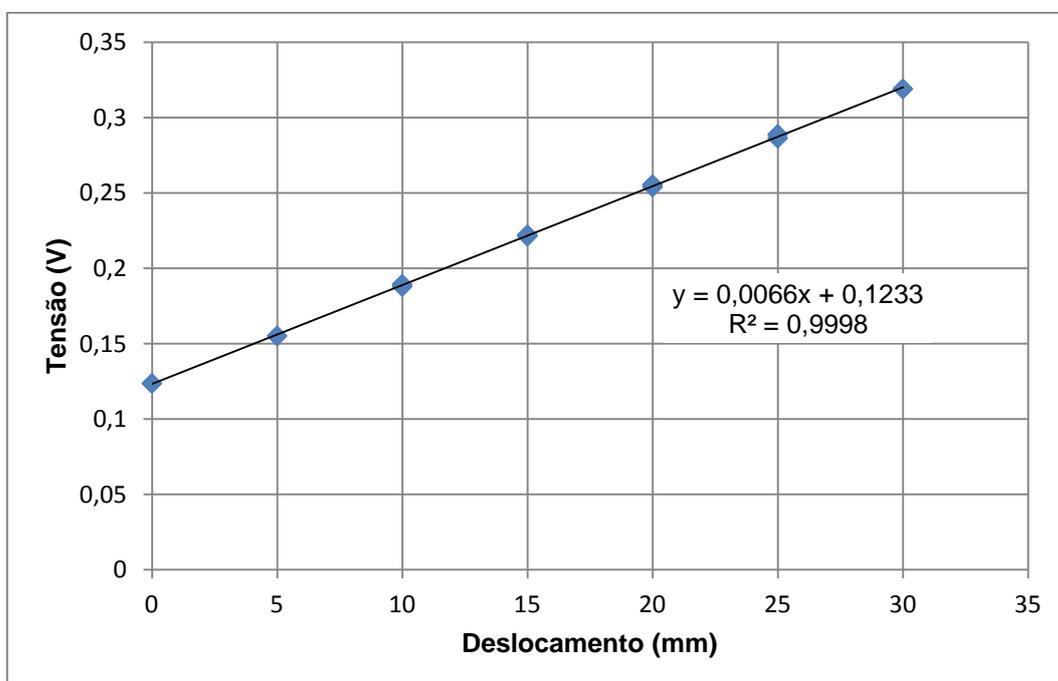


Figura IV.2 Gráfico da calibração do transdutor potenciométrico 19994

DADOS DO TRANSDUTOR	
Modelo	WPS-750-MK30-P10
Range de medição	750 mm
Resistência	10K Ω
Número do transdutor	19359(número 1)
Canal	33 (ai1)

DADOS DA CALIBRAÇÃO	
Módulo	NI SCB 68
Tensão de alimentação	5V
Computador utilizado	NI PXI 1050 (centrífuga)
Sentido de calibração	Valores positivos com a cordinha saindo do transdutor
Terminal Configuration	R.S.E

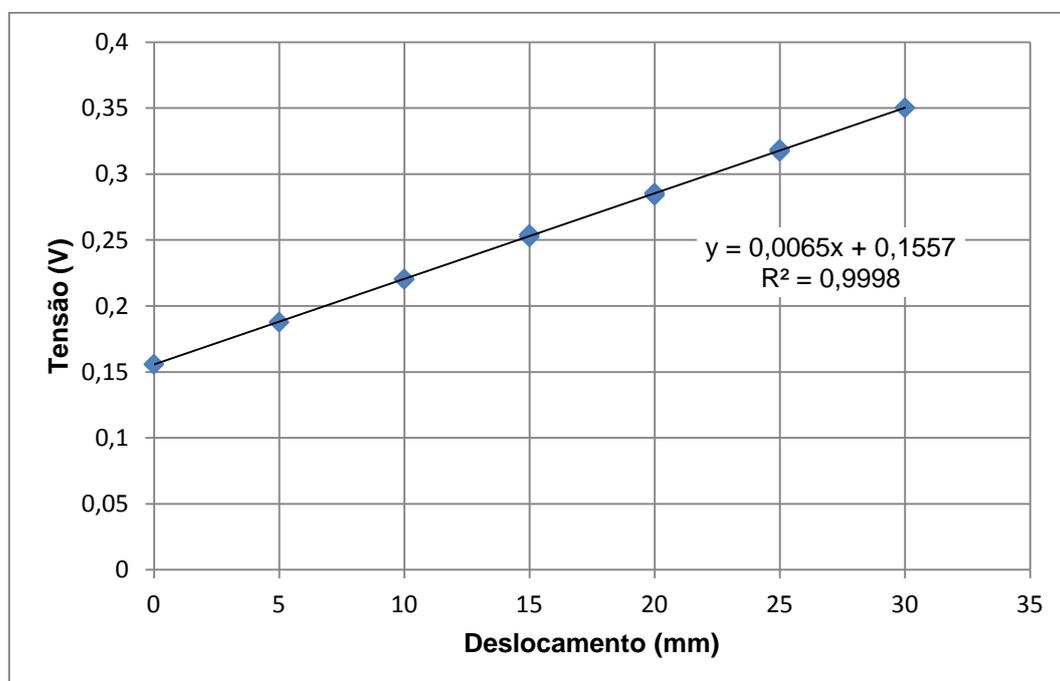


Figura IV.3 Gráfico de calibração do transdutor potenciométrico 19359

ANEXO V

Anexo V - Calibração dos Transdutores LVDT's

Os transdutores LVDT's (1855 e 1856) modelo 1000-MHR foram calibrados utilizando-se um micrômetro para controlar os deslocamentos em milímetro (Figura V.1). Os LVDTs foram conectados ao PXI e as leituras de tensão aquisitadas no local da calibração. Nas Figuras V.2 e V.3 são apresentados os gráficos de calibração dos LVDT's onde o deslocamento variou de 0 mm a 6mm.



Figura V.1 Calibração do LVDT utilizando um micrômetro

DADOS DO TRANSDUTOR	
Modelo	1000-MHR
Range de medição	50,8 mm
Número do transdutor	1855 (número 4)
Canal	ai 0
Slot	4

DADOS DA CALIBRAÇÃO	
Módulo	NI SCXI 1540
Tensão de alimentação	3V
Computador utilizado	NI PXI 1050 (centrífuga)

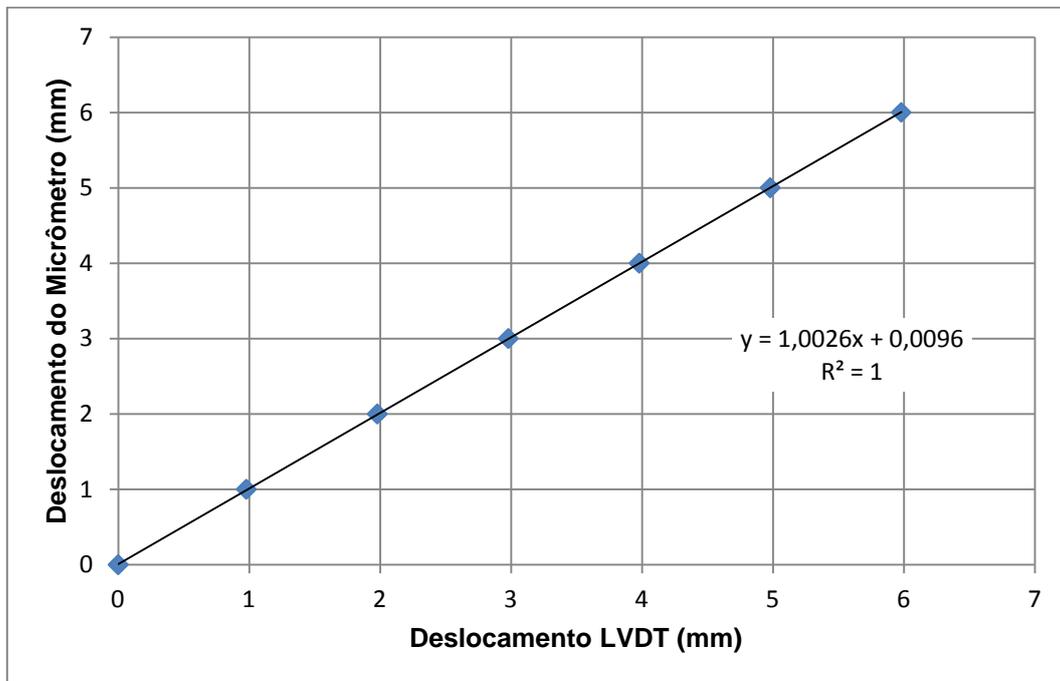


Figura V.2 Gráfico de calibração do LVDT 1855

DADOS DO TRANSDUTOR	
Modelo	1000-MHR
Range de medição	50,8 mm
Número do transdutor	1856 (número 5)
Canal	ai 1
Slot	4

DADOS DA CALIBRAÇÃO	
Módulo	NI SCXI 1540
Tensão de alimentação	3V
Computador utilizado	NI PXI 1050 (centrífuga)

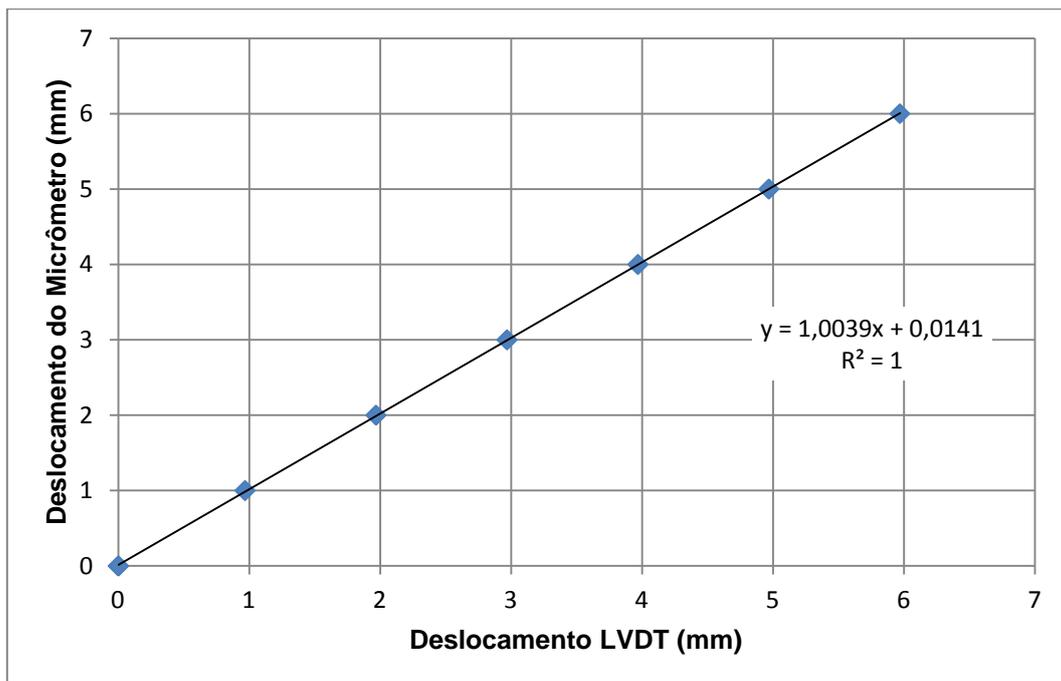


Figura V.3 Gráfico de calibração do LVDT 1856

ANEXO VI

Anexo VI – Transformadas para o Ajuste Hiperbólico

VI.1- Transformada para o ensaio horizontal, $\Theta=0^\circ$

a) Espaçamento 3D

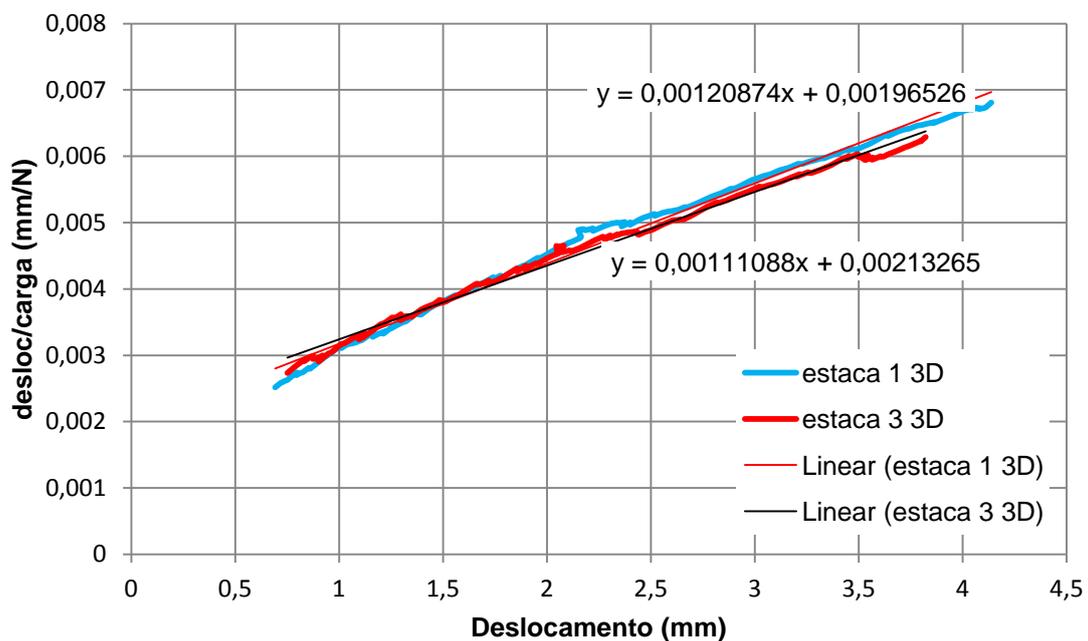


Figura VI.1 Gráfico da transformada para o ensaio horizontal de espaçamento 3D

Deslocamento	σ_{ult} (3)	Ei (3)	F (3)	σ_{ult} (1)	Ei (1)	F (1)
0	901,8759019	468,9001946	0	827,307775	508,8385252	0
0,2	901,8759019	468,9001946	84,94697	827,307775	508,8385252	90,62042367
0,4	901,8759019	468,9001946	155,2693	827,307775	508,8385252	163,348247
0,6	901,8759019	468,9001946	214,4442	827,307775	508,8385252	223,0065445
0,8	901,8759019	468,9001946	264,9279	827,307775	508,8385252	272,827847
1	901,8759019	468,9001946	308,5039	827,307775	508,8385252	315,0598614
1,2	901,8759019	468,9001946	346,4993	827,307775	508,8385252	351,3139728
1,4	901,8759019	468,9001946	379,9217	827,307775	508,8385252	382,7755382
1,6	901,8759019	468,9001946	409,5497	827,307775	508,8385252	410,3359523

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF**Laboratório de Engenharia Civil - LECIV**

1,8	901,8759019	468,9001946	435,9948	827,307775	508,8385252	434,6784539
2	901,8759019	468,9001946	459,7437	827,307775	508,8385252	456,3355344
2,2	901,8759019	468,9001946	481,1888	827,307775	508,8385252	475,7283401
2,4	901,8759019	468,9001946	500,6498	827,307775	508,8385252	493,1943293
2,6	901,8759019	468,9001946	518,3899	827,307775	508,8385252	509,007076
2,8	901,8759019	468,9001946	534,6276	827,307775	508,8385252	523,3907044
3	901,8759019	468,9001946	549,5462	827,307775	508,8385252	536,5305787
3,2	901,8759019	468,9001946	563,3	827,307775	508,8385252	548,5813344
3,4	901,8759019	468,9001946	576,0203	827,307775	508,8385252	559,6729929
3,6	901,8759019	468,9001946	587,8194	827,307775	508,8385252	569,9156715
3,8	901,8759019	468,9001946	598,7939	827,307775	508,8385252	579,4032512
4	901,8759019	468,9001946	609,0273	827,307775	508,8385252	588,2162636
4,2	901,8759019	468,9001946	618,5922	827,307775	508,8385252	596,4241814
4,4	901,8759019	468,9001946	627,5521	827,307775	508,8385252	604,0872544
4,6	901,8759019	468,9001946	635,9626	827,307775	508,8385252	611,2579902
4,8	901,8759019	468,9001946	643,8727	827,307775	508,8385252	617,9823597
5	901,8759019	468,9001946	651,3258	827,307775	508,8385252	624,3007831
5,2	901,8759019	468,9001946	658,3604	827,307775	508,8385252	630,2489435
5,4	901,8759019	468,9001946	665,0107	827,307775	508,8385252	635,8584607
5,6	901,8759019	468,9001946	671,3075	827,307775	508,8385252	641,1574541
5,8	901,8759019	468,9001946	677,2781	827,307775	508,8385252	646,1710134
6	901,8759019	468,9001946	682,9474	827,307775	508,8385252	650,9215965
6,2	901,8759019	468,9001946	688,3375	827,307775	508,8385252	655,4293654
6,4	901,8759019	468,9001946	693,4685	827,307775	508,8385252	659,7124726
6,6	901,8759019	468,9001946	698,3588	827,307775	508,8385252	663,7873048
6,8	901,8759019	468,9001946	703,0248	827,307775	508,8385252	667,6686934
7	901,8759019	468,9001946	707,4816	827,307775	508,8385252	671,3700937
7,2	901,8759019	468,9001946	711,7431	827,307775	508,8385252	674,9037419
7,4	901,8759019	468,9001946	715,8217	827,307775	508,8385252	678,2807892
7,6	901,8759019	468,9001946	719,729	827,307775	508,8385252	681,5114202
7,8	901,8759019	468,9001946	723,4756	827,307775	508,8385252	684,6049549
8	901,8759019	468,9001946	727,0711	827,307775	508,8385252	687,5699388
8,2	901,8759019	468,9001946	730,5246	827,307775	508,8385252	690,4142216
8,4	901,8759019	468,9001946	733,8443	827,307775	508,8385252	693,1450267
8,6	901,8759019	468,9001946	737,0378	827,307775	508,8385252	695,7690125
8,8	901,8759019	468,9001946	740,1121	827,307775	508,8385252	698,2923261
9	901,8759019	468,9001946	743,0739	827,307775	508,8385252	700,7206523
9,2	901,8759019	468,9001946	745,9292	827,307775	508,8385252	703,0592554
9,4	901,8759019	468,9001946	748,6836	827,307775	508,8385252	705,3130179
9,6	901,8759019	468,9001946	751,3424	827,307775	508,8385252	707,4864745
9,8	901,8759019	468,9001946	753,9105	827,307775	508,8385252	709,5838421
10	901,8759019	468,9001946	756,3925	827,307775	508,8385252	711,6090477

b) Espaçamento 2D

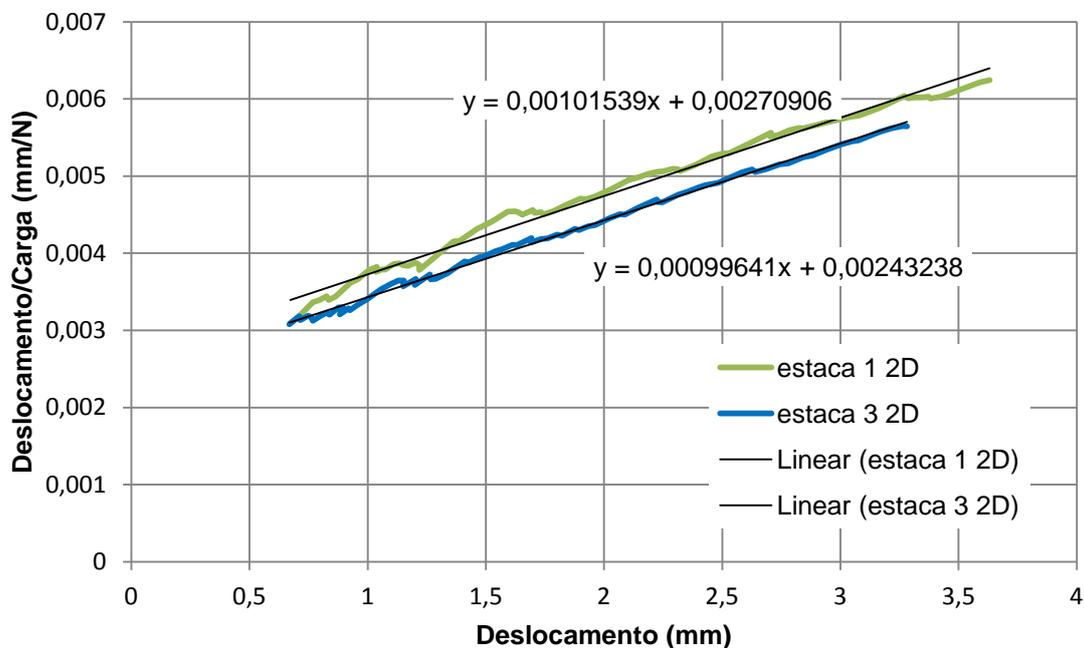


Figura VI.2 Gráfico da transformada para o ensaio horizontal de espaçamento 2D

Deslocamento	σ_{ult} (3)	E_i (3)	F (3)	σ_{ult} (1)	E_i (1)	F (1)
0	1003,602935	411,12	0	984,8433	369,1317	0
0,2	1003,602935	411,12	75,9976	984,8433	369,1317	68,67806
0,4	1003,602935	411,12	141,2956	984,8433	369,1317	128,402
0,6	1003,602935	411,12	198,005	984,8433	369,1317	180,8158
0,8	1003,602935	411,12	247,7158	984,8433	369,1317	227,1842
1	1003,602935	411,12	291,6481	984,8433	369,1317	268,496
1,2	1003,602935	411,12	330,7542	984,8433	369,1317	305,5357
1,4	1003,602935	411,12	365,788	984,8433	369,1317	338,9333
1,6	1003,602935	411,12	397,354	984,8433	369,1317	369,2009
1,8	1003,602935	411,12	425,943	984,8433	369,1317	396,7587
2	1003,602935	411,12	451,957	984,8433	369,1317	421,9552
2,2	1003,602935	411,12	475,729	984,8433	369,1317	445,0812
2,4	1003,602935	411,12	497,5368	984,8433	369,1317	466,382
2,6	1003,602935	411,12	517,6142	984,8433	369,1317	486,0654
2,8	1003,602935	411,12	536,1594	984,8433	369,1317	504,309
3	1003,602935	411,12	553,3412	984,8433	369,1317	521,265

3,2	1003,602935	411,12	569,3047	984,8433	369,1317	537,0652
3,4	1003,602935	411,12	584,175	984,8433	369,1317	551,8239
3,6	1003,602935	411,12	598,0607	984,8433	369,1317	565,6407
3,8	1003,602935	411,12	611,0565	984,8433	369,1317	578,6031
4	1003,602935	411,12	623,2452	984,8433	369,1317	590,7878
4,2	1003,602935	411,12	634,6998	984,8433	369,1317	602,263
4,4	1003,602935	411,12	645,4846	984,8433	369,1317	613,0887
4,6	1003,602935	411,12	655,6568	984,8433	369,1317	623,3186
4,8	1003,602935	411,12	665,267	984,8433	369,1317	633,0005
5	1003,602935	411,12	674,3607	984,8433	369,1317	642,1774
5,2	1003,602935	411,12	682,9783	984,8433	369,1317	650,8878
5,4	1003,602935	411,12	691,1563	984,8433	369,1317	659,1663
5,6	1003,602935	411,12	698,9275	984,8433	369,1317	667,0443
5,8	1003,602935	411,12	706,3215	984,8433	369,1317	674,5502
6	1003,602935	411,12	713,3651	984,8433	369,1317	681,7097
6,2	1003,602935	411,12	720,0827	984,8433	369,1317	688,5463
6,4	1003,602935	411,12	726,4964	984,8433	369,1317	695,0813
6,6	1003,602935	411,12	732,6263	984,8433	369,1317	701,3343
6,8	1003,602935	411,12	738,4908	984,8433	369,1317	707,323
7	1003,602935	411,12	744,1069	984,8433	369,1317	713,064
7,2	1003,602935	411,12	749,49	984,8433	369,1317	718,5723
7,4	1003,602935	411,12	754,6543	984,8433	369,1317	723,8618
7,6	1003,602935	411,12	759,6129	984,8433	369,1317	728,9452
7,8	1003,602935	411,12	764,3778	984,8433	369,1317	733,8343
8	1003,602935	411,12	768,9602	984,8433	369,1317	738,5402
8,2	1003,602935	411,12	773,3703	984,8433	369,1317	743,0728
8,4	1003,602935	411,12	777,6176	984,8433	369,1317	747,4416
8,6	1003,602935	411,12	781,7112	984,8433	369,1317	751,6553
8,8	1003,602935	411,12	785,659	984,8433	369,1317	755,7221
9	1003,602935	411,12	789,4688	984,8433	369,1317	759,6494
9,2	1003,602935	411,12	793,1478	984,8433	369,1317	763,4444
9,4	1003,602935	411,12	796,7024	984,8433	369,1317	767,1136
9,6	1003,602935	411,12	800,139	984,8433	369,1317	770,6632
9,8	1003,602935	411,12	803,4632	984,8433	369,1317	774,0988
10	1003,602935	411,12	806,6806	984,8433	369,1317	777,426

c) Espaçamento 1,5D

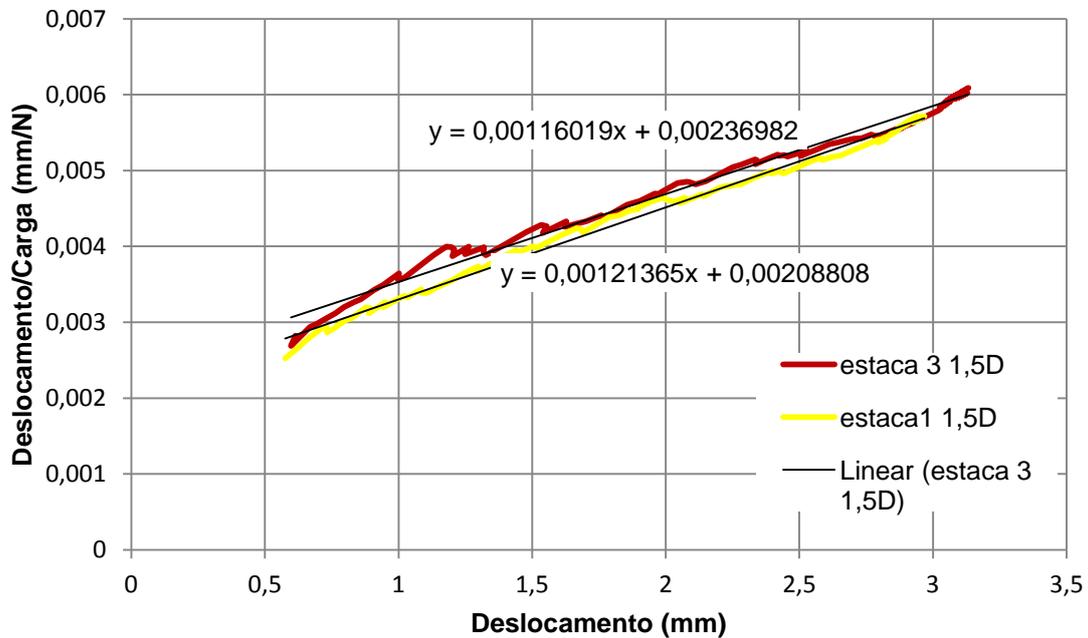


Figura VI.3 Gráfico da transformada para o ensaio horizontal de espaçamento 1,5D

Deslocamento	σ_{ult} (3)	E_i (3)	F (3)	σ_{ult} (1)	E_i (1)	F (1)
0	861,9278	421,973	0	823,9608	478,9089	0
0,2	861,9278	421,973	76,86815	823,9608	478,9089	85,80708
0,4	861,9278	421,973	141,1484	823,9608	478,9089	155,4279
0,6	861,9278	421,973	195,6989	823,9608	478,9089	213,0478
0,8	861,9278	421,973	242,5733	823,9608	478,9089	261,5234
1	861,9278	421,973	283,2853	823,9608	478,9089	302,8715
1,2	861,9278	421,973	318,9752	823,9608	478,9089	338,5565
1,4	861,9278	421,973	350,5182	823,9608	478,9089	369,6672
1,6	861,9278	421,973	378,5975	823,9608	478,9089	397,0302
1,8	861,9278	421,973	403,7538	823,9608	478,9089	421,2842
2	861,9278	421,973	426,421	823,9608	478,9089	442,9306
2,2	861,9278	421,973	446,9512	823,9608	478,9089	462,3685
2,4	861,9278	421,973	465,6328	823,9608	478,9089	479,9194
2,6	861,9278	421,973	482,7049	823,9608	478,9089	495,8454
2,8	861,9278	421,973	498,3668	823,9608	478,9089	510,3622
3	861,9278	421,973	512,7863	823,9608	478,9089	523,6489

3,2	861,9278	421,973	526,1057	823,9608	478,9089	535,8554
3,4	861,9278	421,973	538,4462	823,9608	478,9089	547,1085
3,6	861,9278	421,973	549,9118	823,9608	478,9089	557,5155
3,8	861,9278	421,973	560,5925	823,9608	478,9089	567,1684
4	861,9278	421,973	570,5662	823,9608	478,9089	576,1464
4,2	861,9278	421,973	579,9008	823,9608	478,9089	584,5178
4,4	861,9278	421,973	588,6559	823,9608	478,9089	592,3421
4,6	861,9278	421,973	596,8837	823,9608	478,9089	599,6712
4,8	861,9278	421,973	604,6306	823,9608	478,9089	606,5507
5	861,9278	421,973	611,9374	823,9608	478,9089	613,0208
5,2	861,9278	421,973	618,8407	823,9608	478,9089	619,1169
5,4	861,9278	421,973	625,3731	823,9608	478,9089	624,8705
5,6	861,9278	421,973	631,5635	823,9608	478,9089	630,3098
5,8	861,9278	421,973	637,4381	823,9608	478,9089	635,4597
6	861,9278	421,973	643,0207	823,9608	478,9089	640,3429
6,2	861,9278	421,973	648,3322	823,9608	478,9089	644,9794
6,4	861,9278	421,973	653,3922	823,9608	478,9089	649,3875
6,6	861,9278	421,973	658,2179	823,9608	478,9089	653,5838
6,8	861,9278	421,973	662,8254	823,9608	478,9089	657,583
7	861,9278	421,973	667,229	823,9608	478,9089	661,3988
7,2	861,9278	421,973	671,4421	823,9608	478,9089	665,0435
7,4	861,9278	421,973	675,4767	823,9608	478,9089	668,5283
7,6	861,9278	421,973	679,3439	823,9608	478,9089	671,8636
7,8	861,9278	421,973	683,054	823,9608	478,9089	675,0587
8	861,9278	421,973	686,6163	823,9608	478,9089	678,1224
8,2	861,9278	421,973	690,0395	823,9608	478,9089	681,0626
8,4	861,9278	421,973	693,3315	823,9608	478,9089	683,8865
8,6	861,9278	421,973	696,4999	823,9608	478,9089	686,601
8,8	861,9278	421,973	699,5513	823,9608	478,9089	689,2123
9	861,9278	421,973	702,4922	823,9608	478,9089	691,7261
9,2	861,9278	421,973	705,3285	823,9608	478,9089	694,1479
9,4	861,9278	421,973	708,0656	823,9608	478,9089	696,4825
9,6	861,9278	421,973	710,7087	823,9608	478,9089	698,7347
9,8	861,9278	421,973	713,2625	823,9608	478,9089	700,9087
10	861,9278	421,973	715,7315	823,9608	478,9089	703,0085

d) Estaca Isolada

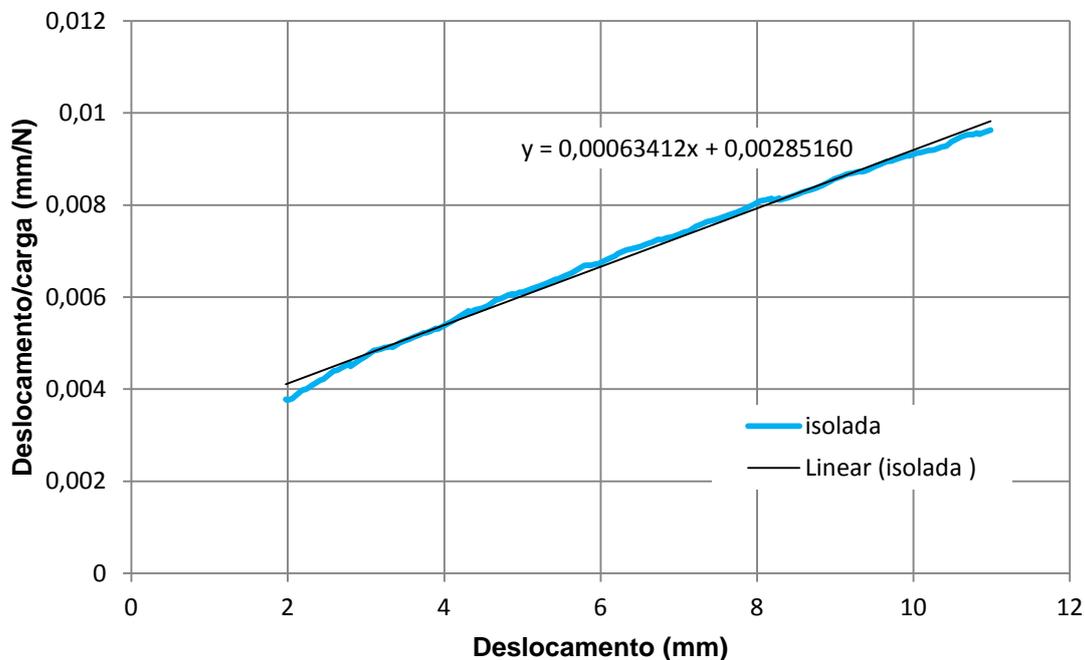


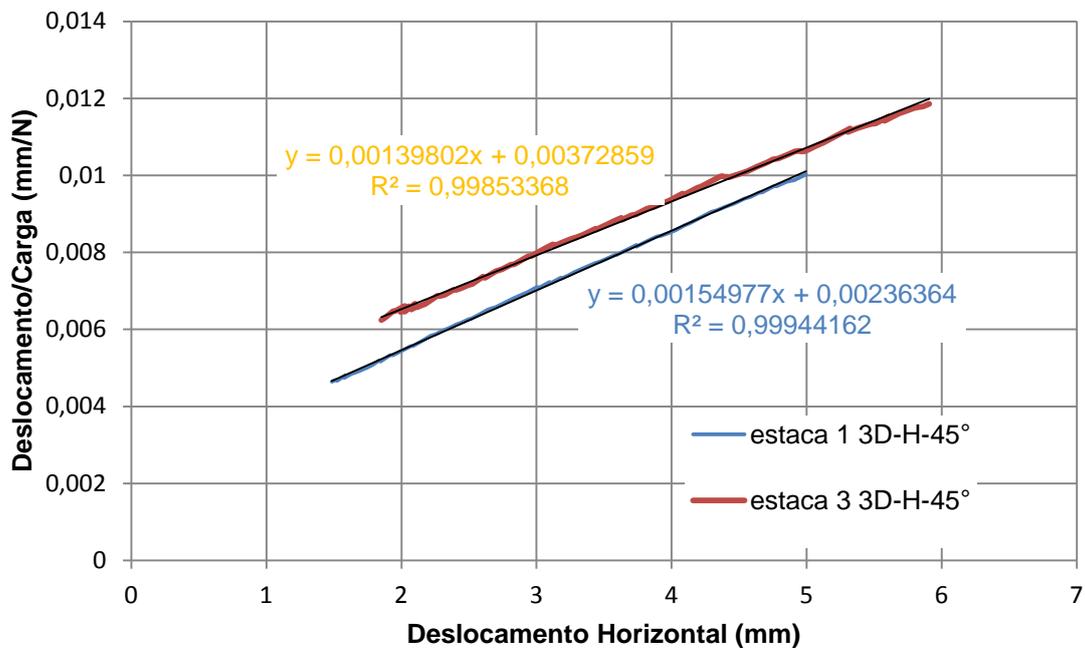
Figura VI.4 Gráfico da transformada para o ensaio horizontal da estaca isolada

Deslocamento	σ_{ult}	E_i	F
0	1576,989	350,6803	0
0,2	1576,989	350,6803	67,14961
0,4	1576,989	350,6803	128,8142
0,6	1576,989	350,6803	185,6394
0,8	1576,989	350,6803	238,1735
1	1576,989	350,6803	286,8848
1,2	1576,989	350,6803	332,1759
1,4	1576,989	350,6803	374,3948
1,6	1576,989	350,6803	413,8439
1,8	1576,989	350,6803	450,7871
2	1576,989	350,6803	485,4557
2,2	1576,989	350,6803	518,0537
2,4	1576,989	350,6803	548,7611
2,6	1576,989	350,6803	577,7377
2,8	1576,989	350,6803	605,1259
3	1576,989	350,6803	631,0528

3,2	1576,989	350,6803	655,6324
3,4	1576,989	350,6803	678,9669
3,6	1576,989	350,6803	701,1486
3,8	1576,989	350,6803	722,261
4	1576,989	350,6803	742,3795
4,2	1576,989	350,6803	761,5726
4,4	1576,989	350,6803	779,9029
4,6	1576,989	350,6803	797,4272
4,8	1576,989	350,6803	814,1974
5	1576,989	350,6803	830,2614
5,2	1576,989	350,6803	845,6627
5,4	1576,989	350,6803	860,4415
5,6	1576,989	350,6803	874,6348
5,8	1576,989	350,6803	888,2768
6	1576,989	350,6803	901,399
6,2	1576,989	350,6803	914,0304
6,4	1576,989	350,6803	926,1982
6,6	1576,989	350,6803	937,9274
6,8	1576,989	350,6803	949,2413
7	1576,989	350,6803	960,1615
7,2	1576,989	350,6803	970,7083
7,4	1576,989	350,6803	980,9005
7,6	1576,989	350,6803	990,7557
7,8	1576,989	350,6803	1000,29
8	1576,989	350,6803	1009,52
8,2	1576,989	350,6803	1018,458
8,4	1576,989	350,6803	1027,12
8,6	1576,989	350,6803	1035,517
8,8	1576,989	350,6803	1043,661
9	1576,989	350,6803	1051,564
9,2	1576,989	350,6803	1059,236
9,4	1576,989	350,6803	1066,687
9,6	1576,989	350,6803	1073,927
9,8	1576,989	350,6803	1080,965
10	1576,989	350,6803	1087,808

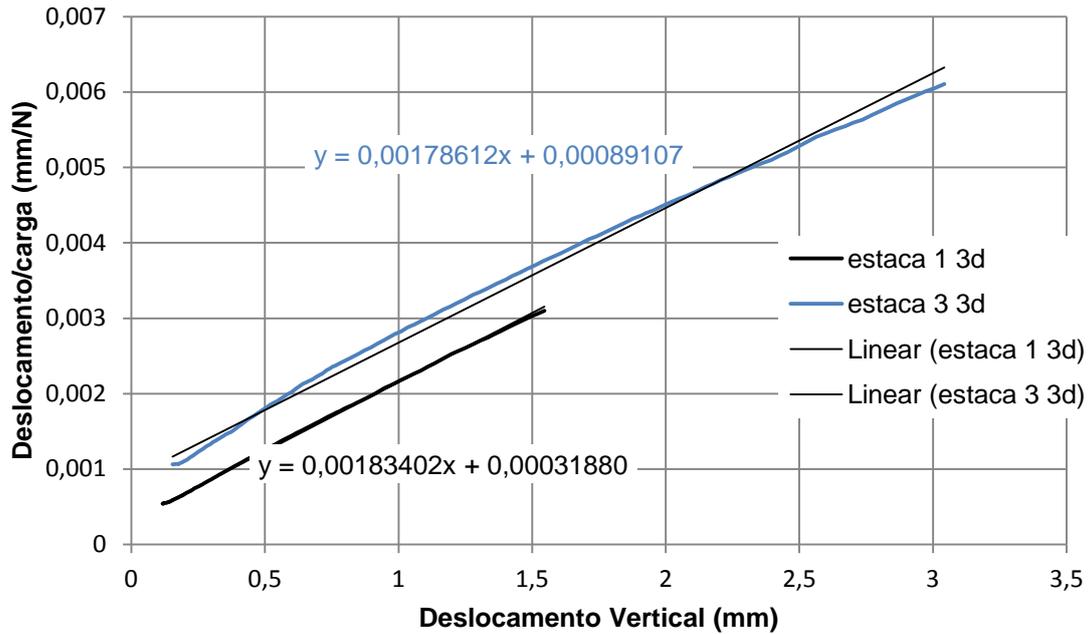
VI.2- Transformada para o ensaio inclinado, $\Theta=45^\circ$

a) Espaçamento 3D



Deslocamento	σ_{ult} (3)	E_i (3)	F (3)	σ_{ult} (1)	E_i (1)	F (1)
0	715,2973491	268,1979	0	645,257	423,0763	0
0,2	715,2973491	268,1979	49,89778	645,257	423,0763	74,80567
0,4	715,2973491	268,1979	93,28798	645,257	423,0763	134,0686
0,6	715,2973491	268,1979	131,3657	645,257	423,0763	182,1769
0,8	715,2973491	268,1979	165,0503	645,257	423,0763	222,0091
1	715,2973491	268,1979	195,0607	645,257	423,0763	255,5316
1,2	715,2973491	268,1979	221,9668	645,257	423,0763	284,1337
1,4	715,2973491	268,1979	246,2267	645,257	423,0763	308,8246
1,6	715,2973491	268,1979	268,2124	645,257	423,0763	330,3552
1,8	715,2973491	268,1979	288,2294	645,257	423,0763	349,2958
2	715,2973491	268,1979	306,5308	645,257	423,0763	366,0872
2,2	715,2973491	268,1979	323,3281	645,257	423,0763	381,0755
2,4	715,2973491	268,1979	338,7994	645,257	423,0763	394,5365
2,6	715,2973491	268,1979	353,0957	645,257	423,0763	406,6922
2,8	715,2973491	268,1979	366,3461	645,257	423,0763	417,7237

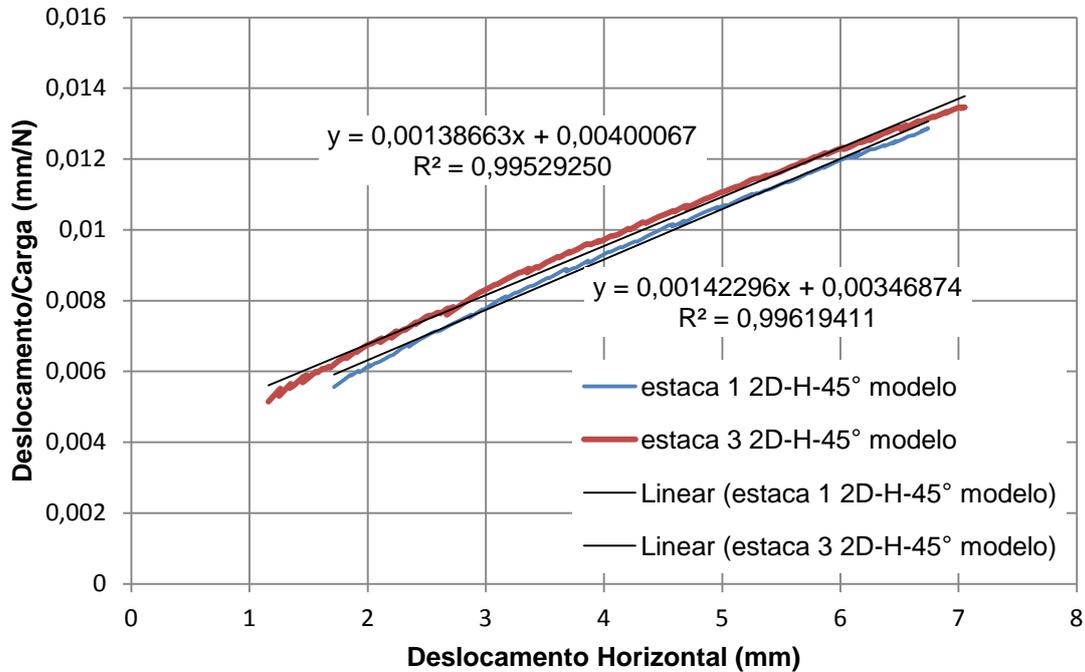
3	715,2973491	268,1979	378,6612	645,257	423,0763	427,78
3,2	715,2973491	268,1979	390,1367	645,257	423,0763	436,9851
3,4	715,2973491	268,1979	400,8556	645,257	423,0763	445,4426
3,6	715,2973491	268,1979	410,8903	645,257	423,0763	453,24
3,8	715,2973491	268,1979	420,3044	645,257	423,0763	460,4517
4	715,2973491	268,1979	429,1537	645,257	423,0763	467,1413
4,2	715,2973491	268,1979	437,4875	645,257	423,0763	473,3635
4,4	715,2973491	268,1979	445,3496	645,257	423,0763	479,1657
4,6	715,2973491	268,1979	452,779	645,257	423,0763	484,5889
4,8	715,2973491	268,1979	459,8104	645,257	423,0763	489,6692
5	715,2973491	268,1979	466,4749	645,257	423,0763	494,4381
5,2	715,2973491	268,1979	472,8006	645,257	423,0763	498,9233
5,4	715,2973491	268,1979	478,8126	645,257	423,0763	503,1494
5,6	715,2973491	268,1979	484,5338	645,257	423,0763	507,1383
5,8	715,2973491	268,1979	489,9846	645,257	423,0763	510,9094
6	715,2973491	268,1979	495,1839	645,257	423,0763	514,48
6,2	715,2973491	268,1979	500,1487	645,257	423,0763	517,8658
6,4	715,2973491	268,1979	504,8944	645,257	423,0763	521,0806
6,6	715,2973491	268,1979	509,4353	645,257	423,0763	524,1372
6,8	715,2973491	268,1979	513,7843	645,257	423,0763	527,047
7	715,2973491	268,1979	517,9534	645,257	423,0763	529,8202
7,2	715,2973491	268,1979	521,9534	645,257	423,0763	532,4662
7,4	715,2973491	268,1979	525,7946	645,257	423,0763	534,9937
7,6	715,2973491	268,1979	529,486	645,257	423,0763	537,4104
7,8	715,2973491	268,1979	533,0364	645,257	423,0763	539,7234
8	715,2973491	268,1979	536,4537	645,257	423,0763	541,9393
8,2	715,2973491	268,1979	539,7452	645,257	423,0763	544,0641
8,4	715,2973491	268,1979	542,9177	645,257	423,0763	546,1032
8,6	715,2973491	268,1979	545,9776	645,257	423,0763	548,0618
8,8	715,2973491	268,1979	548,9308	645,257	423,0763	549,9445
9	715,2973491	268,1979	551,7827	645,257	423,0763	551,7556
9,2	715,2973491	268,1979	554,5384	645,257	423,0763	553,4992
9,4	715,2973491	268,1979	557,2029	645,257	423,0763	555,1789
9,6	715,2973491	268,1979	559,7804	645,257	423,0763	556,7983
9,8	715,2973491	268,1979	562,2753	645,257	423,0763	558,3605
10	715,2973491	268,1979	564,6913	645,257	423,0763	559,8684



Deslocamento	σ_{ult} (3)	E_i (3)	F (3)	σ_{ult} (1)	E_i (1)	F (1)
0	559,8728	1122,246	0	545,2503	3136,763	0
0,2	559,8728	1122,246	160,2187	545,2503	3136,763	291,7136
0,4	559,8728	1122,246	249,1408	545,2503	3136,763	380,0807
0,6	559,8728	1122,246	305,6948	545,2503	3136,763	422,7698
0,8	559,8728	1122,246	344,8326	545,2503	3136,763	447,9243
1	559,8728	1122,246	373,526	545,2503	3136,763	464,507
1,2	559,8728	1122,246	395,4635	545,2503	3136,763	476,2615
1,4	559,8728	1122,246	412,7799	545,2503	3136,763	485,0286
1,6	559,8728	1122,246	426,7962	545,2503	3136,763	491,8186
1,8	559,8728	1122,246	438,3737	545,2503	3136,763	497,2326
2	559,8728	1122,246	448,0979	545,2503	3136,763	501,6504
2,2	559,8728	1122,246	456,381	545,2503	3136,763	505,3238
2,4	559,8728	1122,246	463,5211	545,2503	3136,763	508,4263
2,6	559,8728	1122,246	469,7396	545,2503	3136,763	511,0814
2,8	559,8728	1122,246	475,204	545,2503	3136,763	513,3794
3	559,8728	1122,246	480,0438	545,2503	3136,763	515,3878
3,2	559,8728	1122,246	484,3602	545,2503	3136,763	517,158
3,4	559,8728	1122,246	488,2337	545,2503	3136,763	518,7301
3,6	559,8728	1122,246	491,7293	545,2503	3136,763	520,1356
3,8	559,8728	1122,246	494,8995	545,2503	3136,763	521,3996
4	559,8728	1122,246	497,788	545,2503	3136,763	522,5425
4,2	559,8728	1122,246	500,4305	545,2503	3136,763	523,5808
4,4	559,8728	1122,246	502,8573	545,2503	3136,763	524,5284

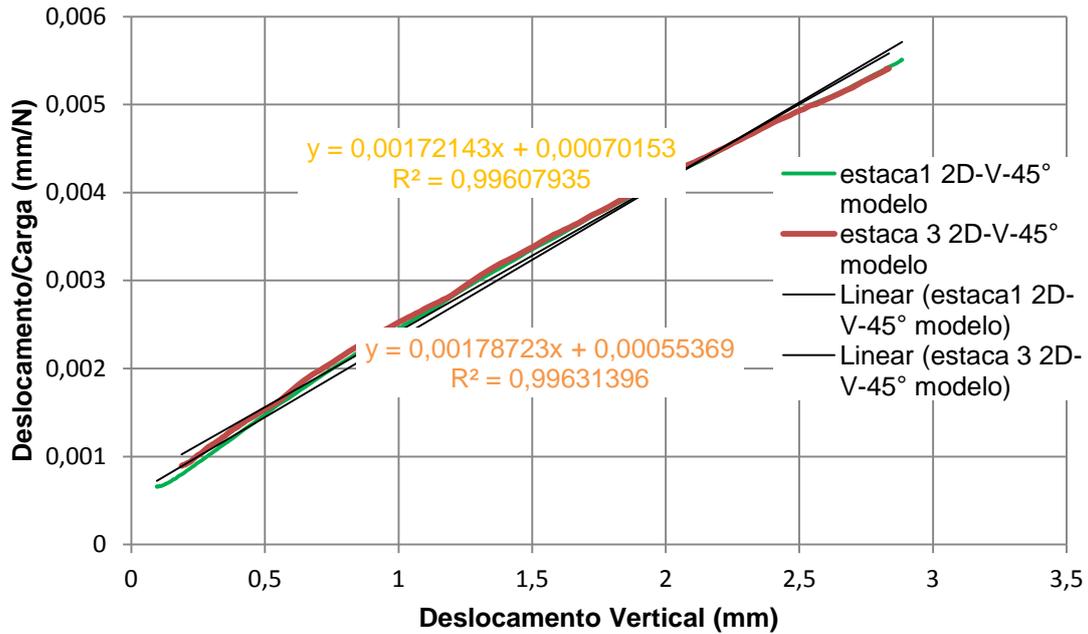
4,6	559,8728	1122,246	505,0936	545,2503	3136,763	525,3965
4,8	559,8728	1122,246	507,1612	545,2503	3136,763	526,1949
5	559,8728	1122,246	509,0784	545,2503	3136,763	526,9315
5,2	559,8728	1122,246	510,861	545,2503	3136,763	527,6132
5,4	559,8728	1122,246	512,5227	545,2503	3136,763	528,2461
5,6	559,8728	1122,246	514,0755	545,2503	3136,763	528,8351
5,8	559,8728	1122,246	515,5296	545,2503	3136,763	529,3847
6	559,8728	1122,246	516,8943	545,2503	3136,763	529,8986
6,2	559,8728	1122,246	518,1774	545,2503	3136,763	530,3804
6,4	559,8728	1122,246	519,3862	545,2503	3136,763	530,8328
6,6	559,8728	1122,246	520,5268	545,2503	3136,763	531,2584
6,8	559,8728	1122,246	521,605	545,2503	3136,763	531,6597
7	559,8728	1122,246	522,6256	545,2503	3136,763	532,0386
7,2	559,8728	1122,246	523,5932	545,2503	3136,763	532,3969
7,4	559,8728	1122,246	524,5118	545,2503	3136,763	532,7364
7,6	559,8728	1122,246	525,385	545,2503	3136,763	533,0583
7,8	559,8728	1122,246	526,2162	545,2503	3136,763	533,3641
8	559,8728	1122,246	527,0082	545,2503	3136,763	533,6549
8,2	559,8728	1122,246	527,7638	545,2503	3136,763	533,9319
8,4	559,8728	1122,246	528,4854	545,2503	3136,763	534,1959
8,6	559,8728	1122,246	529,1753	545,2503	3136,763	534,4479
8,8	559,8728	1122,246	529,8356	545,2503	3136,763	534,6887
9	559,8728	1122,246	530,468	545,2503	3136,763	534,9189
9,2	559,8728	1122,246	531,0744	545,2503	3136,763	535,1393
9,4	559,8728	1122,246	531,6562	545,2503	3136,763	535,3506
9,6	559,8728	1122,246	532,215	545,2503	3136,763	535,5531
9,8	559,8728	1122,246	532,7521	545,2503	3136,763	535,7476
10	559,8728	1122,246	533,2688	545,2503	3136,763	535,9344

b) Espaçamento 2D



Deslocamento	σ_{ult} (3)	Ei (3)	F (3)	σ_{ult} (1)	Ei (1)	F (1)
0	721,172916	249,958132	0	702,76044	288,289119	0
0,2	721,172916	249,958132	46,7508619	702,76044	288,289119	53,285987
0,4	721,172916	249,958132	87,8093799	702,76044	288,289119	99,060805
0,6	721,172916	249,958132	124,155535	702,76044	288,289119	138,80805
0,8	721,172916	249,958132	156,55657	702,76044	288,289119	173,64472
1	721,172916	249,958132	185,62174	702,76044	288,289119	204,42791
1,2	721,172916	249,958132	211,840994	702,76044	288,289119	231,82618
1,4	721,172916	249,958132	235,612809	702,76044	288,289119	256,36875
1,6	721,172916	249,958132	257,264589	702,76044	288,289119	278,47997
1,8	721,172916	249,958132	277,067834	702,76044	288,289119	298,5041
2	721,172916	249,958132	295,249582	702,76044	288,289119	316,72331
2,2	721,172916	249,958132	312,001153	702,76044	288,289119	333,37112
2,4	721,172916	249,958132	327,484908	702,76044	288,289119	348,64242
2,6	721,172916	249,958132	341,839528	702,76044	288,289119	362,70115
2,8	721,172916	249,958132	355,184179	702,76044	288,289119	375,68623

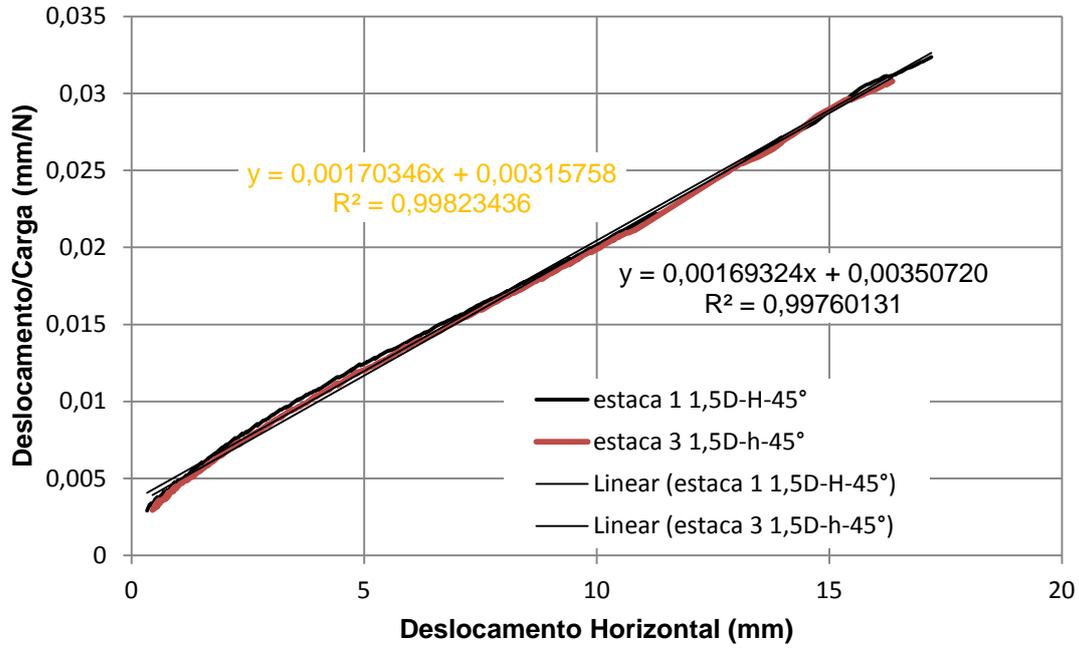
3	721,172916	249,958132	367,62183	702,76044	288,289119	387,71612
3,2	721,172916	249,958132	379,24191	702,76044	288,289119	398,89248
3,4	721,172916	249,958132	390,122466	702,76044	288,289119	409,30302
3,6	721,172916	249,958132	400,33192	702,76044	288,289119	419,02387
3,8	721,172916	249,958132	409,930502	702,76044	288,289119	428,12135
4	721,172916	249,958132	418,971446	702,76044	288,289119	436,65357
4,2	721,172916	249,958132	427,501976	702,76044	288,289119	444,67163
4,4	721,172916	249,958132	435,564128	702,76044	288,289119	452,22063
4,6	721,172916	249,958132	443,195447	702,76044	288,289119	459,34057
4,8	721,172916	249,958132	450,429569	702,76044	288,289119	466,06702
5	721,172916	249,958132	457,296718	702,76044	288,289119	472,43172
5,2	721,172916	249,958132	463,824126	702,76044	288,289119	478,46309
5,4	721,172916	249,958132	470,036398	702,76044	288,289119	484,18664
5,6	721,172916	249,958132	475,955817	702,76044	288,289119	489,62536
5,8	721,172916	249,958132	481,602614	702,76044	288,289119	494,79999
6	721,172916	249,958132	486,995199	702,76044	288,289119	499,72931
6,2	721,172916	249,958132	492,150361	702,76044	288,289119	504,43036
6,4	721,172916	249,958132	497,083441	702,76044	288,289119	508,91864
6,6	721,172916	249,958132	501,808487	702,76044	288,289119	513,20827
6,8	721,172916	249,958132	506,338389	702,76044	288,289119	517,31216
7	721,172916	249,958132	510,684989	702,76044	288,289119	521,24211
7,2	721,172916	249,958132	514,859194	702,76044	288,289119	525,00895
7,4	721,172916	249,958132	518,87106	702,76044	288,289119	528,62263
7,6	721,172916	249,958132	522,729877	702,76044	288,289119	532,09231
7,8	721,172916	249,958132	526,444239	702,76044	288,289119	535,42642
8	721,172916	249,958132	530,022109	702,76044	288,289119	538,63276
8,2	721,172916	249,958132	533,470873	702,76044	288,289119	541,71854
8,4	721,172916	249,958132	536,797398	702,76044	288,289119	544,69042
8,6	721,172916	249,958132	540,008067	702,76044	288,289119	547,55461
8,8	721,172916	249,958132	543,108831	702,76044	288,289119	550,31684
9	721,172916	249,958132	546,105238	702,76044	288,289119	552,98248
9,2	721,172916	249,958132	549,002468	702,76044	288,289119	555,55649
9,4	721,172916	249,958132	551,805366	702,76044	288,289119	558,04353
9,6	721,172916	249,958132	554,518465	702,76044	288,289119	560,44793
9,8	721,172916	249,958132	557,146012	702,76044	288,289119	562,77373
10	721,172916	249,958132	559,69199	702,76044	288,289119	565,02474



Deslocamento	σ_{ult} (3)	E_i (3)	F (3)	σ_{ult} (1)	E_i (1)	F (1)
0	580,9124	1425,456	0	559,5251	1806,065	0
0,2	580,9124	1425,456	191,2382	559,5251	1806,065	219,5062
0,4	580,9124	1425,456	287,7487	559,5251	1806,065	315,3127
0,6	580,9124	1425,456	345,9434	559,5251	1806,065	368,9973
0,8	580,9124	1425,456	384,8607	559,5251	1806,065	403,3327
1	580,9124	1425,456	412,7183	559,5251	1806,065	427,1825
1,2	580,9124	1425,456	433,6441	559,5251	1806,065	444,7136
1,4	580,9124	1425,456	449,9391	559,5251	1806,065	458,1434
1,6	580,9124	1425,456	462,9873	559,5251	1806,065	468,7603
1,8	580,9124	1425,456	473,6712	559,5251	1806,065	477,3644
2	580,9124	1425,456	482,5801	559,5251	1806,065	484,4785
2,2	580,9124	1425,456	490,1223	559,5251	1806,065	490,4588
2,4	580,9124	1425,456	496,5899	559,5251	1806,065	495,5563
2,6	580,9124	1425,456	502,1973	559,5251	1806,065	499,9531
2,8	580,9124	1425,456	507,1055	559,5251	1806,065	503,7843
3	580,9124	1425,456	511,4374	559,5251	1806,065	507,1525
3,2	580,9124	1425,456	515,2891	559,5251	1806,065	510,1369
3,4	580,9124	1425,456	518,7361	559,5251	1806,065	512,7995
3,6	580,9124	1425,456	521,8391	559,5251	1806,065	515,1897
3,8	580,9124	1425,456	524,6471	559,5251	1806,065	517,3472
4	580,9124	1425,456	527,2002	559,5251	1806,065	519,3045
4,2	580,9124	1425,456	529,5317	559,5251	1806,065	521,0882
4,4	580,9124	1425,456	531,6692	559,5251	1806,065	522,7204

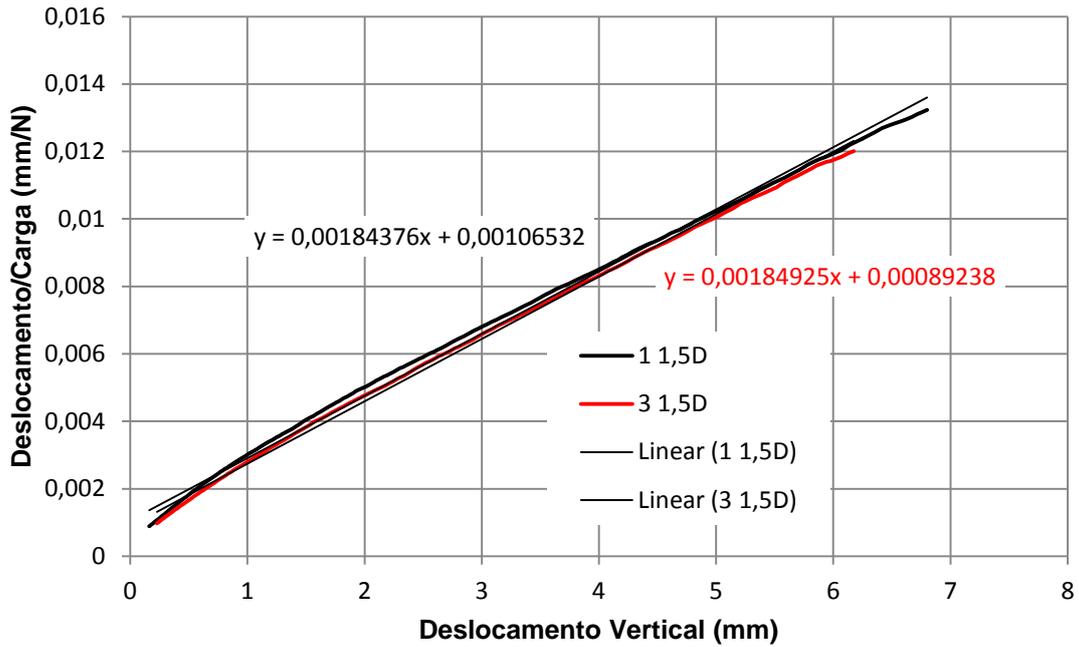
4,6	580,9124	1425,456	533,636	559,5251	1806,065	524,2196
4,8	580,9124	1425,456	535,4517	559,5251	1806,065	525,6015
5	580,9124	1425,456	537,1331	559,5251	1806,065	526,8793
5,2	580,9124	1425,456	538,6945	559,5251	1806,065	528,0643
5,4	580,9124	1425,456	540,1484	559,5251	1806,065	529,1663
5,6	580,9124	1425,456	541,5055	559,5251	1806,065	530,1937
5,8	580,9124	1425,456	542,7752	559,5251	1806,065	531,1538
6	580,9124	1425,456	543,9656	559,5251	1806,065	532,0531
6,2	580,9124	1425,456	545,0839	559,5251	1806,065	532,8971
6,4	580,9124	1425,456	546,1365	559,5251	1806,065	533,6908
6,6	580,9124	1425,456	547,129	559,5251	1806,065	534,4386
6,8	580,9124	1425,456	548,0665	559,5251	1806,065	535,1443
7	580,9124	1425,456	548,9533	559,5251	1806,065	535,8113
7,2	580,9124	1425,456	549,7935	559,5251	1806,065	536,4429
7,4	580,9124	1425,456	550,5906	559,5251	1806,065	537,0416
7,6	580,9124	1425,456	551,348	559,5251	1806,065	537,6101
7,8	580,9124	1425,456	552,0684	559,5251	1806,065	538,1506
8	580,9124	1425,456	552,7545	559,5251	1806,065	538,665
8,2	580,9124	1425,456	553,4088	559,5251	1806,065	539,1553
8,4	580,9124	1425,456	554,0334	559,5251	1806,065	539,623
8,6	580,9124	1425,456	554,6302	559,5251	1806,065	540,0698
8,8	580,9124	1425,456	555,2011	559,5251	1806,065	540,4969
9	580,9124	1425,456	555,7477	559,5251	1806,065	540,9057
9,2	580,9124	1425,456	556,2715	559,5251	1806,065	541,2973
9,4	580,9124	1425,456	556,774	559,5251	1806,065	541,6727
9,6	580,9124	1425,456	557,2564	559,5251	1806,065	542,033
9,8	580,9124	1425,456	557,7199	559,5251	1806,065	542,3791
10	580,9124	1425,456	558,1656	559,5251	1806,065	542,7117

c) Espaçamento 1,5D



Deslocamento	σ_{ult} (3)	Ei (3)	F (3)	σ_{ult} (1)	Ei (1)	F (1)
0	587,0405	316,6982	0	590,5837	285,1277	0
0,2	587,0405	316,6982	57,17108	590,5837	285,1277	52,00414
0,4	587,0405	316,6982	104,1948	590,5837	285,1277	95,59096
0,6	587,0405	316,6982	143,5525	590,5837	285,1277	132,6511
0,8	587,0405	316,6982	176,9775	590,5837	285,1277	164,5484
1	587,0405	316,6982	205,7173	590,5837	285,1277	192,2914
1,2	587,0405	316,6982	230,6924	590,5837	285,1277	216,6422
1,4	587,0405	316,6982	252,5971	590,5837	285,1277	238,1869
1,6	587,0405	316,6982	271,9647	590,5837	285,1277	257,3844
1,8	587,0405	316,6982	289,212	590,5837	285,1277	274,5982
2	587,0405	316,6982	304,6691	590,5837	285,1277	290,1208
2,2	587,0405	316,6982	318,6008	590,5837	285,1277	304,1897
2,4	587,0405	316,6982	331,2225	590,5837	285,1277	317,0001
2,6	587,0405	316,6982	342,7106	590,5837	285,1277	328,7135
2,8	587,0405	316,6982	353,2112	590,5837	285,1277	339,465
3	587,0405	316,6982	362,8465	590,5837	285,1277	349,3686

3,2	587,0405	316,6982	371,7191	590,5837	285,1277	358,5206
3,4	587,0405	316,6982	379,9161	590,5837	285,1277	367,0035
3,6	587,0405	316,6982	387,512	590,5837	285,1277	374,8882
3,8	587,0405	316,6982	394,5704	590,5837	285,1277	382,2356
4	587,0405	316,6982	401,1465	590,5837	285,1277	389,099
4,2	587,0405	316,6982	407,2881	590,5837	285,1277	395,5246
4,4	587,0405	316,6982	413,0368	590,5837	285,1277	401,5531
4,6	587,0405	316,6982	418,4292	590,5837	285,1277	407,22
4,8	587,0405	316,6982	423,4975	590,5837	285,1277	412,5571
5	587,0405	316,6982	428,2699	590,5837	285,1277	417,5923
5,2	587,0405	316,6982	432,7717	590,5837	285,1277	422,3505
5,4	587,0405	316,6982	437,0253	590,5837	285,1277	426,854
5,6	587,0405	316,6982	441,0506	590,5837	285,1277	431,1226
5,8	587,0405	316,6982	444,8655	590,5837	285,1277	435,1743
6	587,0405	316,6982	448,4861	590,5837	285,1277	439,0252
6,2	587,0405	316,6982	451,9269	590,5837	285,1277	442,6899
6,4	587,0405	316,6982	455,201	590,5837	285,1277	446,1816
6,6	587,0405	316,6982	458,3201	590,5837	285,1277	449,5122
6,8	587,0405	316,6982	461,295	590,5837	285,1277	452,6926
7	587,0405	316,6982	464,1356	590,5837	285,1277	455,7327
7,2	587,0405	316,6982	466,8506	590,5837	285,1277	458,6417
7,4	587,0405	316,6982	469,4483	590,5837	285,1277	461,4279
7,6	587,0405	316,6982	471,9361	590,5837	285,1277	464,0988
7,8	587,0405	316,6982	474,3208	590,5837	285,1277	466,6615
8	587,0405	316,6982	476,6086	590,5837	285,1277	469,1224
8,2	587,0405	316,6982	478,8055	590,5837	285,1277	471,4874
8,4	587,0405	316,6982	480,9167	590,5837	285,1277	473,7621
8,6	587,0405	316,6982	482,947	590,5837	285,1277	475,9516
8,8	587,0405	316,6982	484,9012	590,5837	285,1277	478,0605
9	587,0405	316,6982	486,7833	590,5837	285,1277	480,0932
9,2	587,0405	316,6982	488,5973	590,5837	285,1277	482,0538
9,4	587,0405	316,6982	490,3468	590,5837	285,1277	483,946
9,6	587,0405	316,6982	492,0353	590,5837	285,1277	485,7733
9,8	587,0405	316,6982	493,6658	590,5837	285,1277	487,5391
10	587,0405	316,6982	495,2412	590,5837	285,1277	489,2464

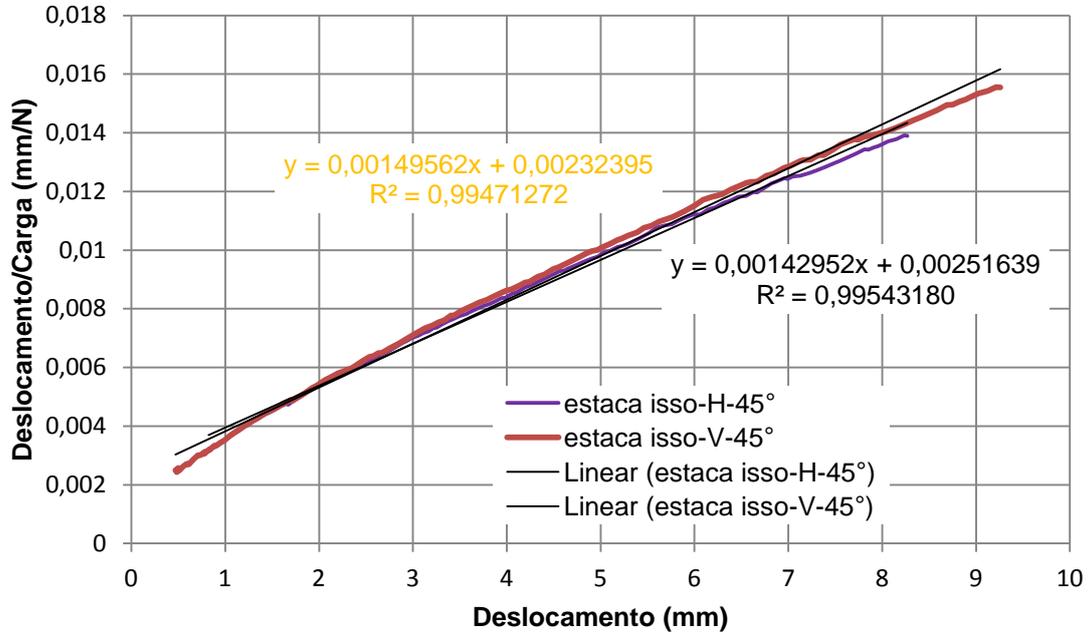


Deslocamento	σ_{ult} (3)	E_i (3)	F (3)	σ_{ult} (1)	E_i (1)	F (1)
0	540,7598	1120,599	0	542,3699	938,6851	0
0,2	540,7598	1120,599	158,4497	542,3699	938,6851	139,463
0,4	540,7598	1120,599	245,086	542,3699	938,6851	221,8741
0,6	540,7598	1120,599	299,7108	542,3699	938,6851	276,297
0,8	540,7598	1120,599	337,2994	542,3699	938,6851	314,92
1	540,7598	1120,599	364,7465	542,3699	938,6851	343,7513
1,2	540,7598	1120,599	385,6686	542,3699	938,6851	366,0956
1,4	540,7598	1120,599	402,1452	542,3699	938,6851	383,921
1,6	540,7598	1120,599	415,4571	542,3699	938,6851	398,4723
1,8	540,7598	1120,599	426,4362	542,3699	938,6851	410,5757
2	540,7598	1120,599	435,6463	542,3699	938,6851	420,801
2,2	540,7598	1120,599	443,4831	542,3699	938,6851	429,5539
2,4	540,7598	1120,599	450,2324	542,3699	938,6851	437,1311
2,6	540,7598	1120,599	456,1059	542,3699	938,6851	443,7545
2,8	540,7598	1120,599	461,2637	542,3699	938,6851	449,5935
3	540,7598	1120,599	465,8291	542,3699	938,6851	454,7797
3,2	540,7598	1120,599	469,8986	542,3699	938,6851	459,4168
3,4	540,7598	1120,599	473,5488	542,3699	938,6851	463,5876
3,6	540,7598	1120,599	476,8414	542,3699	938,6851	467,3591
3,8	540,7598	1120,599	479,8265	542,3699	938,6851	470,786
4	540,7598	1120,599	482,5451	542,3699	938,6851	473,9134
4,2	540,7598	1120,599	485,0316	542,3699	938,6851	476,779

Laboratório de Engenharia Civil - LECIV

4,4	540,7598	1120,599	487,3143	542,3699	938,6851	479,4144
4,6	540,7598	1120,599	489,4174	542,3699	938,6851	481,8461
4,8	540,7598	1120,599	491,3613	542,3699	938,6851	484,097
5	540,7598	1120,599	493,1633	542,3699	938,6851	486,1865
5,2	540,7598	1120,599	494,8385	542,3699	938,6851	488,1313
5,4	540,7598	1120,599	496,3997	542,3699	938,6851	489,9459
5,6	540,7598	1120,599	497,8583	542,3699	938,6851	491,6431
5,8	540,7598	1120,599	499,2241	542,3699	938,6851	493,2339
6	540,7598	1120,599	500,5055	542,3699	938,6851	494,7279
6,2	540,7598	1120,599	501,7103	542,3699	938,6851	496,1337
6,4	540,7598	1120,599	502,845	542,3699	938,6851	497,4589
6,6	540,7598	1120,599	503,9157	542,3699	938,6851	498,7103
6,8	540,7598	1120,599	504,9275	542,3699	938,6851	499,8938
7	540,7598	1120,599	505,8853	542,3699	938,6851	501,0149
7,2	540,7598	1120,599	506,7931	542,3699	938,6851	502,0783
7,4	540,7598	1120,599	507,655	542,3699	938,6851	503,0884
7,6	540,7598	1120,599	508,4741	542,3699	938,6851	504,0491
7,8	540,7598	1120,599	509,2537	542,3699	938,6851	504,9639
8	540,7598	1120,599	509,9966	542,3699	938,6851	505,8361
8,2	540,7598	1120,599	510,7052	542,3699	938,6851	506,6685
8,4	540,7598	1120,599	511,3819	542,3699	938,6851	507,4638
8,6	540,7598	1120,599	512,0288	542,3699	938,6851	508,2245
8,8	540,7598	1120,599	512,6478	542,3699	938,6851	508,9527
9	540,7598	1120,599	513,2408	542,3699	938,6851	509,6505
9,2	540,7598	1120,599	513,8092	542,3699	938,6851	510,3198
9,4	540,7598	1120,599	514,3546	542,3699	938,6851	510,9622
9,6	540,7598	1120,599	514,8784	542,3699	938,6851	511,5794
9,8	540,7598	1120,599	515,3818	542,3699	938,6851	512,1728
10	540,7598	1120,599	515,866	542,3699	938,6851	512,7437

d) Estaca Isolada



Deslocamento	σ_{ult} (H)	Ei (H)	F (H)	σ_{ult} (v)	Ei (v)	F (v)
0	699,5355	397,3947	0	668,619	430,3019	0
0,2	699,5355	397,3947	71,3701	668,619	430,3019	76,24642
0,4	699,5355	397,3947	129,5254	668,619	430,3019	136,8833
0,6	699,5355	397,3947	177,8251	668,619	430,3019	186,2589
0,8	699,5355	397,3947	218,5789	668,619	430,3019	227,2439
1	699,5355	397,3947	253,427	668,619	430,3019	261,8096
1,2	699,5355	397,3947	283,5663	668,619	430,3019	291,3545
1,4	699,5355	397,3947	309,891	668,619	430,3019	316,8985
1,6	699,5355	397,3947	333,082	668,619	430,3019	339,2028
1,8	699,5355	397,3947	353,6675	668,619	430,3019	358,847
2	699,5355	397,3947	372,0633	668,619	430,3019	376,2801
2,2	699,5355	397,3947	388,601	668,619	430,3019	391,8555
2,4	699,5355	397,3947	403,5487	668,619	430,3019	405,8553
2,6	699,5355	397,3947	417,1251	668,619	430,3019	418,5069
2,8	699,5355	397,3947	429,5107	668,619	430,3019	429,9962
3	699,5355	397,3947	440,8556	668,619	430,3019	440,4762

Laboratório de Engenharia Civil - LECIV

3,2	699,5355	397,3947	451,2856	668,619	430,3019	450,0745
3,4	699,5355	397,3947	460,9071	668,619	430,3019	458,8977
3,6	699,5355	397,3947	469,8106	668,619	430,3019	467,0362
3,8	699,5355	397,3947	478,0737	668,619	430,3019	474,5666
4	699,5355	397,3947	485,7629	668,619	430,3019	481,5547
4,2	699,5355	397,3947	492,9361	668,619	430,3019	488,0569
4,4	699,5355	397,3947	499,6435	668,619	430,3019	494,1223
4,6	699,5355	397,3947	505,9292	668,619	430,3019	499,7935
4,8	699,5355	397,3947	511,8315	668,619	430,3019	505,1076
5	699,5355	397,3947	517,3846	668,619	430,3019	510,0974
5,2	699,5355	397,3947	522,6186	668,619	430,3019	514,7916
5,4	699,5355	397,3947	527,5602	668,619	430,3019	519,2159
5,6	699,5355	397,3947	532,2333	668,619	430,3019	523,3928
5,8	699,5355	397,3947	536,6591	668,619	430,3019	527,3424
6	699,5355	397,3947	540,8568	668,619	430,3019	531,083
6,2	699,5355	397,3947	544,8435	668,619	430,3019	534,6305
6,4	699,5355	397,3947	548,6349	668,619	430,3019	537,9997
6,6	699,5355	397,3947	552,2448	668,619	430,3019	541,2035
6,8	699,5355	397,3947	555,686	668,619	430,3019	544,254
7	699,5355	397,3947	558,9702	668,619	430,3019	547,1618
7,2	699,5355	397,3947	562,1077	668,619	430,3019	549,9368
7,4	699,5355	397,3947	565,1082	668,619	430,3019	552,5878
7,6	699,5355	397,3947	567,9805	668,619	430,3019	555,1229
7,8	699,5355	397,3947	570,7326	668,619	430,3019	557,5496
8	699,5355	397,3947	573,3719	668,619	430,3019	559,8748
8,2	699,5355	397,3947	575,9052	668,619	430,3019	562,1045
8,4	699,5355	397,3947	578,3388	668,619	430,3019	564,2447
8,6	699,5355	397,3947	580,6785	668,619	430,3019	566,3006
8,8	699,5355	397,3947	582,9295	668,619	430,3019	568,277
9	699,5355	397,3947	585,0968	668,619	430,3019	570,1785
9,2	699,5355	397,3947	587,185	668,619	430,3019	572,0093
9,4	699,5355	397,3947	589,1984	668,619	430,3019	573,7733
9,6	699,5355	397,3947	591,1409	668,619	430,3019	575,4739
9,8	699,5355	397,3947	593,0162	668,619	430,3019	577,1147
10	699,5355	397,3947	594,8277	668,619	430,3019	578,6987

ANEXO VII

Anexo VII – Planilha de Cálculo das Cargas do Protótipo

$$F_{Prot} = N_g^2 F_{mod}$$

Sendo $N_g = 24$

Ensaio Horizontal ($\Theta = 0^\circ$)

Espaçamento	F_{mod} (N)	F_{prot} (N)	F_{prot} (kN)
0	1087,81	626578,56	626,57856
3D	734	422784	422,784
2D	792,05	456220,8	456,2208
1,5D	709,37	408597,12	408,59712

Ensaio Vertical
($\Theta = 90^\circ$)

Espaçamento	F_{mod} (N)	F_{prot} (N)	F_{prot} (kN)
0	313,86	180783,36	180,78336
3D	282,19	162541,44	162,54144
2D	261,11	150399,36	150,39936
1,5D	265,58	152974,08	152,97408

Ensaio Inclinado ($\Theta = 45^\circ$ - componente vertical)

Espaçamento	$F_{V_{mod}}$ (N)	$F_{V_{prot}}$ (N)	$F_{V_{prot}}$ (kN)
0	578,69	333325,44	333,32544
3D	534,6	307929,6	307,9296
2D	550,43	317047,68	317,04768
1,5D	514,3	296236,8	296,2368

Ensaio Inclinado ($\Theta = 45^\circ$ - componente horizontal)

Espaçamento	$F_{H_{mod}}$ (N)	$F_{H_{prot}}$ (N)	$F_{H_{prot}}$ (kN)
0	594,82	342616,32	342,61632
3D	562,27	323867,52	323,86752
2D	562,35	323913,6	323,9136
1,5D	492,24	283530,24	283,53024