

Universidade Federal do Rio de Janeiro

CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACA-TORPEDO MODELO, EM ARGILA MOLE,  
SUBMETIDA A PROVA DE CARGA A TRAÇÃO INCLINADA

André Filipe de Brito Alves

Abril-2013



CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACA-TORPEDO MODELO, EM ARGILA MOLE,  
SUBMETIDA A PROVA DE CARGA A TRAÇÃO INCLINADA

André Filipe de Brito Alves

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger

Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Alessandra Conde de Freitas

**Rio de Janeiro**

**Abril de 2013**

CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACA-TORPEDO MODELO, EM ARGILA MOLE,  
SUBMETIDA A PROVA DE CARGA A TRAÇÃO INCLINADA

André Filipe de Brito Alves

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO  
DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Fernando Artur Brasil Danziger D.Sc.

---

Prof. Gustavo Vaz de Mello Guimarães M.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Alessandra Conde de Freitas M.Sc.

---

Eng<sup>a</sup>. Elisabeth de Campos Porto

---

Prof. Francisco de Rezende Lopes Ph.D.

---

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL de 2013

Alves, André Filipe de Brito

Capacidade de Carga de Estaca-Torpedo Modelo, em Argila Mole, Submetida à Prova de Carga a Tração Inclinada/ André Filipe de Brito Alves. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

IX, 82 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger *et al.*

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 83.

1. Capacidade de Carga 2. Estaca-Torpedo Modelo 3. Prova de Carga de Tração Inclinada 4. Argila Mole. I. Danziger, Fernando Artur Brasil *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Capacidade de Carga de Estaca-Torpedo Modelo, em Argila Mole, Submetida à Prova de Carga a Tração Inclinada.

## **Agradecimentos**

Antes de tudo gostaria de agradecer a todas as pessoas do Laboratório de Ensaios de Campo e Instrumentação da COPPE/UFRJ.

Agradeço em especial ao Prof. Gustavo Vaz de Mello Guimarães por toda a dedicação e disposição para ajudar em todos os momentos, à Alessandra Conde de Freitas pelas contribuições feitas ao presente trabalho e ao Prof. Fernando Artur Brasil Danziger por todos os ensinamentos, por ter inspirado minha escolha pela Geotecnia e pela oportunidade de estagiar nesta área.

Agradeço a todas as pessoas que nestes últimos anos me ajudaram a manter o foco em me tornar Engenheiro Civil.

Agradeço à minha namorada Joana Souza de Meirelles por todo carinho, amizade, paciência e acima de tudo por nunca ter permitido que eu deixasse de acreditar em mim.

Agradeço, por fim, a toda minha família por tudo que representa na minha vida. Por cada gesto acolhedor e pela compreensão e incentivo ao longo do caminho que me trouxe até aqui.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Capacidade de Carga de Estaca-Torpedo Modelo, em Argila Mole, Submetida a Prova de Carga a Tração Inclinada

André Filipe de Brito Alves

Abril, 2013

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger

Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Alessandra Conde de Freitas

Curso: Engenharia Civil

O crescimento da exploração de petróleo no litoral brasileiro, e no mundo, vem fazendo com que cada vez mais a prática de projetos da engenharia geotécnica esteja ligada à área de pesquisas. Neste contexto, foi realizada uma pesquisa experimental de campo envolvendo uma prova de carga com esforço de tração inclinada em uma estaca-torpedo modelo, em um depósito de solo mole com propriedades geotécnicas conhecidas. Os resultados obtidos através da instrumentação da prova de carga (LVDT's e célula de carga) são apresentados e analisados. A previsão da capacidade de carga foi estimada através do método de MEYERHOF (1973) e comparada com o desempenho observado através da instrumentação.

*Palavras-chave:* capacidade de carga, estaca-torpedo modelo, prova de carga a tração inclinada, argila mole.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of  
the requirements for the degree of Engineer.

The Uplift Capacity of a Model Torpedo Pile, in a Soft Clay Deposit, Under Oblique  
Load Test

André Filipe de Brito Alves

April, 2013

Advisors: Fernando Artur Brasil Danziger

Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Alessandra Conde de Freitas

Course: Civil Engineering

The increase of oil exploration at the Brazilian coast, and around the world, requires that more often projects of geotechnical engineering be correlated with research. In this context, a research involving a load test on a model torpedo pile, in soft clay deposit, was performed. The results of the test are shown in this work. The ultimate load was calculated by applying the method proposed by MEYERHOF (1973), and compared with the failure load obtained with the load test.

*Keywords: uplift capacity, model torpedo-pile, oblique load test, soft clay.*

# SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....   | 1  |
| 1.1   | OBJETIVO.....  | 2  |
| 1.2   | JUSTIFICATIVA.....   | 2  |
| 1.3   | METODOLOGIA .....  | 2  |
| 1.4   | ESTRUTURA DO TRABALHO.....   | 2  |
| 2     | ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA.....                             | 4  |
| 2.1   | GENERALIDADES .....  | 4  |
| 2.2   | MÉTODO DE MEYERHOF (1973).....                                     | 5  |
|       | INTRODUÇÃO .....   | 5  |
|       | TEORIA .....   | 5  |
|       | ENSAIOS.....   | 10 |
| 2.3   | CRITÉRIO DE RUPTURA.....   | 11 |
| 3     | CAMPO EXPERIMENTAL .....   | 12 |
| 3.1   | LOCALIZAÇÃO, PERFIL GEOTÉCNICO E ENSAIOS DE CAMPO REALIZADOS ..... | 12 |
| 3.2   | PARÂMETROS GEOTÉCNICOS CONSIDERADOS NAS ANÁLISES.....              | 17 |
| 4     | AS ESTACAS .....   | 17 |
| 4.1   | A ESTACA-TORPEDO .....   | 17 |
| 4.2   | A ESTACA-TORPEDO MODELO.....                                       | 19 |
| 5     | PROVA DE CARGA .....   | 22 |
| 5.1   | GENERALIDADES .....  | 22 |
| 5.2   | ARRANJO FÍSICO.....  | 32 |
| 5.3   | ESTACAS DE REAÇÃO.....   | 34 |
| 5.4   | INSTRUMENTAÇÃO .....   | 36 |
| 5.4.1 | LVDT .....   | 36 |
| 5.4.2 | CÉLULA DE CARGA .....  | 40 |
| 5.5   | SISTEMA DE CRAVAÇÃO .....  | 43 |
| 5.6   | INSTALAÇÃO DAS ESTACAS.....  | 44 |
| 5.7   | INSTALAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO.....                                  | 47 |
| 5.7.1 | LVDT .....   | 47 |
| 5.7.2 | CÉLULA DE CARGA.....   | 52 |
| 6     | APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....                                  | 53 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6.1   | PREVISÃO PELO MÉTODO DE MEYERHOF (1973).....          | 53 |
| 6.2   | DESEMPENHO (PROVA DE CARGA) .....                     | 59 |
| 6.2.1 | DESLOCAMENTO HORIZONTAL VERSUS TEMPO.....             | 60 |
| 6.2.2 | CARGA VERTICAL VERSUS TEMPO .....                     | 62 |
| 6.2.3 | CARGA VERSUS TEMPO .....                              | 63 |
| 7     | ANÁLISE CONJUNTA DOS RESULTADOS.....                  | 64 |
| 7.1   | COMPOSIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS .....                    | 64 |
| 7.1.1 | COMPOSIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....         | 64 |
| 7.1.2 | COMPOSIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS .....          | 65 |
| 7.2   | DESLOCAMENTO HORIZONTAL VERSUS TEMPO.....             | 67 |
| 7.3   | DESLOCAMENTO VERTICAL VERSUS TEMPO .....              | 69 |
| 7.4   | DESLOCAMENTO HORIZONTAL E VERTICAL VERSUS TEMPO ..... | 71 |
| 7.5   | MOVIMENTO DA ESTACA .....                             | 72 |
| 7.6   | DESLOCAMENTO INCLINADO VERSUS TEMPO.....              | 73 |
| 7.7   | CARGA INCLINADA A 45° X TEMPO.....                    | 75 |
| 7.8   | CARGA A 45° VERSUS DESLOCAMENTO A 45°.....            | 76 |
| 7.9   | RETROANÁLISE DOS RESULTADOS .....                     | 77 |
| 7.10  | CRITÉRIO DE RUPTURA .....                             | 79 |
| 8     | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....   | 81 |
| 8.1   | CONCLUSÕES .....                                      | 81 |
| 8.2   | SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....                | 82 |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                      | 83 |
|       | ANEXOS .....  | 86 |
|       | ANEXO A .....   | 86 |
|       | ANEXO B .....   | 90 |
|       | ANEXO C .....   | 95 |

# Capacidade de Carga de Estaca-torpedo Modelo, em Argila Mole, Submetida à Prova de Carga a Tração Inclinada

## 1 Introdução

A busca por ancoragens de estruturas offshore em pequenos raios tem aumentado em virtude do crescimento da taxa de ocupação do subsolo, pois a exploração em condições mais adversas implica maiores cargas atuando nas estruturas offshore. Neste sentido, intensificou-se a realização de estudos e projetos voltados ao desenvolvimento de novas soluções, dentre as quais se destaca a estaca-torpedo, que tem frequentemente demonstrado ser a forma mais econômica de se ancorar estruturas em empreendimentos *offshore* brasileiros (adaptado de MEDEIROS, 2002, *apud* COSTA, 2008).

Com a finalidade de validar os modelos numéricos utilizados em projetos de fundações em estaca-torpedo para estruturas *offshore*, uma série de provas de carga com solicitações horizontal, tração vertical e tração inclinada a 45° foram planejadas e realizadas com uma estaca-torpedo modelo. Esta última prova de carga, de tração inclinada a 45°, será o objeto de análise deste trabalho. Para as análises das provas de carga horizontal e tração vertical ver GUIMARÃES (2013) e CONDE DE FREITAS (2013).

A prova de carga foi realizada no campo experimental de argila mole do Sarapui II. A escolha do campo deve-se ao fato deste apresentar características semelhantes às condições encontradas em cenários *offshore*, além da localização facilitar o apoio logístico necessário à realização da pesquisa.

A curva carga versus deslocamento, obtida na prova de carga realizada com a estaca-torpedo modelo no campo experimental, é apresentada e analisada, realizando-se ao final uma comparação entre previsão e desempenho. São comparados alguns critérios de ruptura encontrados na literatura. Para a previsão da capacidade de carga de ruptura a tração inclinada foi adotada a metodologia de MEYERHOF (1973).

São também apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas experimentais com a estaca-torpedo modelo.

## **1.1 Objetivo**

Uma prova de carga a tração inclinada a 45°, com uma estaca-torpedo modelo, foi planejada e realizada visando comparações com metodologia para previsão da capacidade de carga e critério de ruptura adotados em projetos de estacas. O campo experimental escolhido apresenta características semelhantes às condições encontradas nos cenários *offshore*.

## **1.2 Justificativa**

O crescimento da exploração de petróleo no subsolo brasileiro vem aumentando a utilização das estacas-torpedo como estruturas de ancoragem de sistemas *offshore*. Desta forma novos estudos e projetos estão sendo desenvolvidos. Uma prova de carga instrumentada contribui de forma positiva para validar metodologias e critérios utilizados em projetos.

## **1.3 Metodologia**

A metodologia consistiu na realização de uma pesquisa experimental de campo, envolvendo: (i) uma prova de carga a tração inclinada a 45° em estaca-torpedo modelo em argila mole; (ii) apresentação e análise dos resultados obtidos através da prova de carga; e (iii) comparação entre previsão e desempenho da estaca-torpedo modelo durante a prova de carga.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

Segue-se a esta introdução o segundo capítulo, no qual são apresentados aspectos relativos à estimativa da capacidade de carga dos projetos de fundações de estruturas *offshore*. A metodologia adotada foi a de MEYERHOF (1973).

No terceiro capítulo, são apresentadas as principais características do campo experimental onde foi realizada a pesquisa. São apresentados também os limites

inferior e superior dos parâmetros geotécnicos adotados na análise pelos ensaios de DSS e palheta elétrica, respectivamente.

No quarto capítulo, são apresentadas as características gerais da estaca-torpedo utilizada para fundações de estruturas *offshore*. O modelo utilizado para a realização da prova de carga também é apresentado e detalhado.

No quinto capítulo, a prova de carga a tração inclinada a 45° é descrita desde o planejamento até sua realização.

No sexto capítulo são apresentados os resultados da previsão através da metodologia de MEYERHOF (1973) e do desempenho da prova de carga.

No sétimo capítulo, os resultados obtidos são analisados em conjunto e interpretados com base em critério utilizado em projetos *offshore*.

No oitavo capítulo, são apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas experimentais com a estaca-torpedo modelo.

## 2 Estimativa da Capacidade de Carga

### 2.1 Generalidades

Alguns critérios devem ser observados nos projetos das fundações de estruturas *offshore* para suportar cargas estáticas, cíclicas, periódicas e transientes de forma que a estrutura fique isenta de deformações ou vibrações excessivas. Para isto, os projetos de fundação offshore devem atender as seguintes premissas POULOS (1988):

- As capacidades de carga lateral e axial devem ser compatíveis com os carregamentos aplicados.
- A relação carga-deslocamento deve ser compatível com as condições de trabalho da estrutura.
- Deve haver viabilidade de instalação das estacas, por exemplo, no que diz respeito à disponibilidade de equipamentos e de espaço no leito marinho.

A elaboração dos projetos segundo essas premissas se dá com embasamento nas análises de cravabilidade das estacas, de capacidade de carga axial, de deformações axiais, de capacidade de carga lateral, de deformações laterais e da resposta dinâmica. Se necessário, bases alargadas também podem ser construídas na ponta da estaca para aumentar a capacidade de carga e de resistência ao arrancamento das estacas.

No caso das cargas de tração inclinada a  $45^\circ$ , a metodologia desenvolvida por MEYERHOF (1973), por ser uma metodologia simples, foi escolhida para uma análise em relação à ruptura e será detalhada no presente trabalho.

Outra opção de análise para cargas de ruptura seria analisar separadamente o esforço horizontal e o esforço vertical, pelas metodologias de BROMS (1964) e BIARREZ e BARRAUD (1968), por exemplo.

## 2.2 Método de MEYERHOF (1973)

Para estimativa da capacidade de carga de ruptura do solo o método de MEYERHOF (1973) foi escolhido. Este método visa calcular a carga última de fundações em solos arenosos e argilosos quando solicitados a tração inclinada.

A seguir uma rápida descrição do método de Meyerhof é realizada com base no trabalho original de 1973.

### Introdução

A resistência a tração em paredes rígidas e estacas sob carregamentos inclinados teve seu início com base em trabalhos anteriores sobre capacidade de carga a tração vertical (MEYERHOF e ADAMS, 1968). O comportamento das fundações solicitadas não axialmente depende de uma consideração conjunta das características de deformações do solo e da fundação, bem como do mecanismo de ruptura na carga última, que é complexo. Sendo assim, um método de análise aproximado semiempírico pode ser formulado, tomando como base resultados de ensaios para fundações assentes em areia e argila, submetidas a tração inclinada variando a inclinação do carregamento desde a direção vertical a horizontal.

### Teoria

Na ruptura de uma parede vertical rígida sob tração inclinada, uma massa de solo de formato aproximadamente piramidal é extraída. Para fundações com pequenas profundidades de assentamento a superfície de ruptura atinge o nível do terreno (ruptura generalizada), enquanto que para grandes profundidades de assentamento pode ocorrer ruptura por cisalhamento localizada próxima a fundação.

Para a carga de ruptura  $Q_u$  aplicada na parede no nível do terreno e com inclinação  $\alpha$  (ângulo medido a partir da vertical), as resultantes dos empuxos de terra passivos  $P_1$  e  $P_2$  têm inclinação  $\delta_1$  e  $\delta_2$  com a horizontal respectivamente (ver Figura 2.1). As resultantes dos empuxos de terra passivos  $P_1$  e  $P_2$  atuam conjuntamente com as forças de adesão  $C_1$  e  $C_2$  nas partes superior e inferior da parede, respectivamente. Para pequenas inclinações do carregamento (pequenos valores de  $\alpha$ ) tanto  $P_1$  como  $P_2$  atuam para baixo; com o aumento de  $\alpha$  o ponto de aplicação de  $P_1$  sobe e o ângulo  $\delta_1$  diminui, desta maneira  $P_1$  passa a atuar para cima quando  $\alpha$  se aproxima de  $90^\circ$ , enquanto o ponto de aplicação de  $P_2$  se aproxima da base com seu  $\delta_2$  aproximadamente inalterado.

A carga de ruptura por unidade de comprimento da parede pode ser estimada a partir do polígono de forças mostrado na Figura 2.1 e pode ser apresentado da seguinte forma:

$$[1] Q_u = S_u K_c D + \frac{\gamma D^2 K_b}{2} + W \cos \alpha$$

Onde:

- D é a profundidade de assentamento da fundação;
- $K_b$  e  $K_c$  são coeficientes de arrancamento;
- W é o peso da fundação;
- $S_u$  é a resistência não drenada;
- $\gamma$  o peso específico do solo.

Para tração vertical:

$$[2] K_b = 2K_u \tan \phi,$$

Onde:

$K_u$  = coeficiente de empuxo de terra atuante;

$$\delta_1 = \delta_2 = 2\phi/3;$$

$\delta_1 = -\phi/2$  e  $\delta_2 = \phi$  (para carregamentos horizontais).

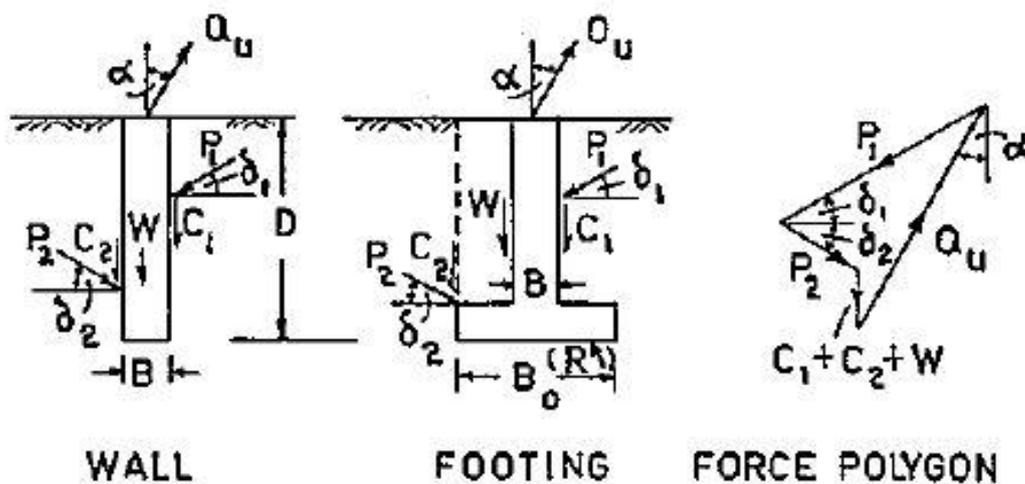


Figura 2.1 – Forças na ruptura em fundações sob carregamento inclinado, adaptada de MEYERHOF (1973).

Utilizando uma variação linear para  $\delta_1$  e  $\delta_2$  entre seus limites para valores intermediários de  $\alpha$ , os coeficientes de arrancamento,  $K_b$ , para paredes rígidas aproximadamente verticais foram determinados para seus coeficientes de empuxo de terra correspondentes (CAQUOT & KERISEL, 1949; SOKOLOVSKII, 1965). Estes coeficientes são apresentados na Figura 2.2 para vários ângulos de atrito do solo, e, a não ser para elevados valores de ângulo de atrito, o valor de  $K_b$  não varia muito com a inclinação do carregamento. Os coeficientes de arrancamento,  $K_c$ , não foram plotados, pois em solos coesivos a presença de trincas de tração nos testes invalidou a análise. Entretanto, para paredes em argilas saturadas ( $\phi=0$ ),  $K_c = 2$  teoricamente para  $\alpha = 0^\circ$ , e este valor de  $K_c$  decresce para aproximadamente 1 com  $\alpha = 90^\circ$ .

Ressalta-se que o ângulo  $\beta$  que aparece na Figura 2.2 é o ângulo de assentamento do muro com a horizontal e que, na maioria dos casos, é igual a zero.

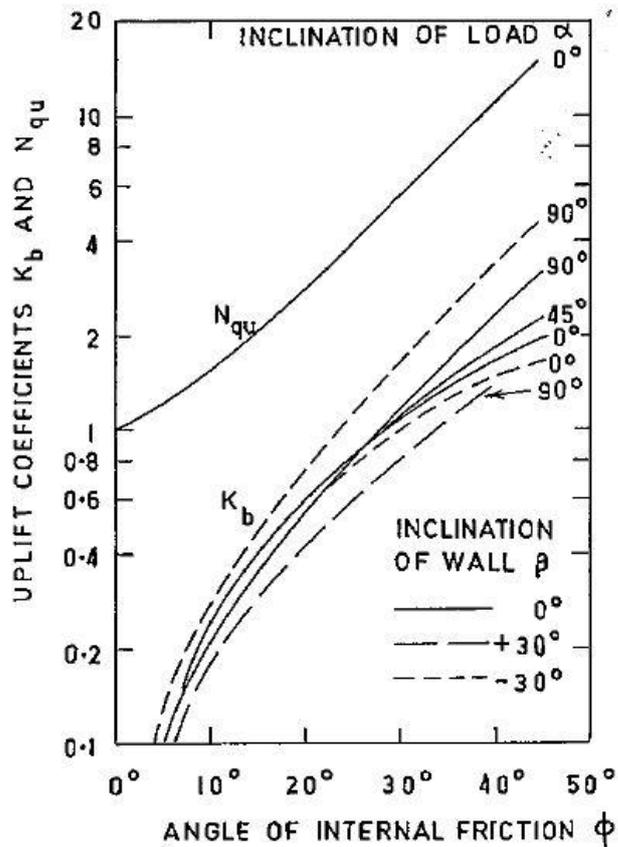


Figura 2.2 – Coeficientes de arrancamento teóricos para paredes ancoradas rígidas, adaptada de MEYERHOF (1973).

A análise apresentada para paredes pode ser adaptada para estacas rígidas de largura  $B$  multiplicando-se os coeficientes de tração por fatores de forma para a obtenção de coeficientes correspondentes para estacas. Os fatores de forma para tração vertical (MEYERHOF e ADAMS, 1968) e para carregamento horizontal em estacas rígidas (BRINCH HANSEN, 1961) crescem de maneira aproximadamente linear com razão  $D/B$  até um valor crítico em que os coeficientes de forma se tornam constantes. O mesmo foi encontrado ao estender o método apresentado anteriormente para estacas cravadas sob carga horizontal (RANJAN, 1970). A carga de ruptura de estacas rígidas pode então ser expressa por:

$$[3] Q_u = \left( S_u K'_c D + \frac{\gamma D^2 K'_b}{2} \right) B + W \cos \alpha$$

Onde:

- $B$  é a largura da fundação;
- $K'_b$  e  $K'_c$  são coeficientes de arrancamento para estacas rígidas;

com os parâmetros sendo os mesmos mostrados anteriormente. O coeficiente de arrancamento,  $K'_b$ , para estacas circulares aproximadamente verticais são apresentados nas figuras 2.3 e 2.4, para tração vertical e horizontal, respectivamente. Valores intermediários de  $K'_b$  podem ser interpolados.

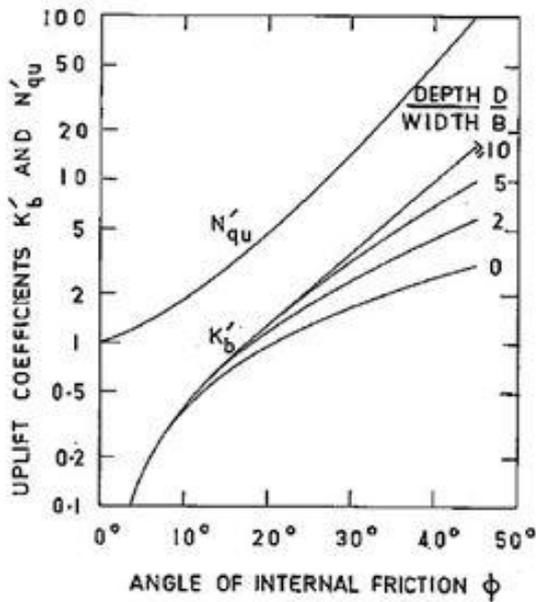


Figura 2.3 – Coeficientes de arrancamento vertical para estacas rígidas, adaptada de MEYERHOF (1973).

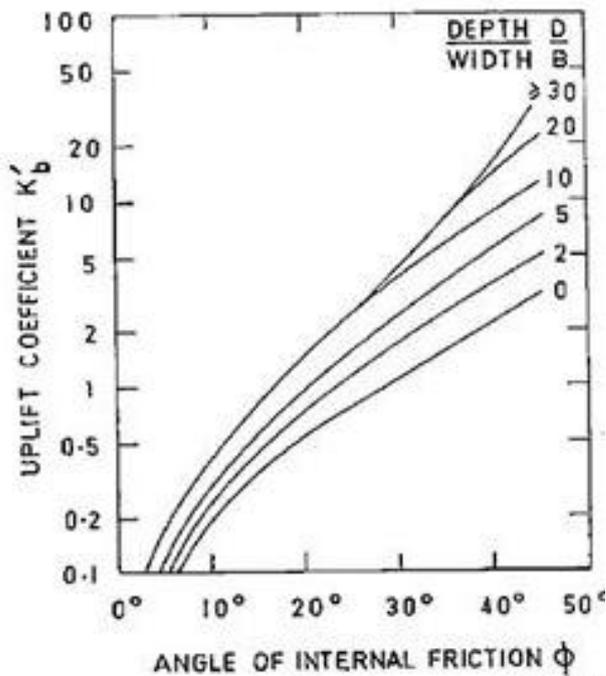


Figura 2.4 – Coeficientes de arrancamento horizontal para estacas rígidas, adaptada de MEYERHOF (1973).

Uma comparação entre as figuras 2.3 e 2.4 mostra que para um dado ângulo de atrito os valores de  $K'_b$  para estacas curtas decrescem quando o ângulo  $\alpha$  aumenta, enquanto para estacas longas o valor de  $K'_b$  cresce com  $\alpha$ .

Para estacas aproximadamente rígidas em argilas saturadas ( $\phi=0$ ) sob tração vertical,  $K'_c = \pi$ , teoricamente (MEYERHOF e ADAMS, 1968), enquanto para carregamentos horizontais os valores correspondentes a  $K'_c$  variam de aproximadamente 1 para estacas curtas a 3 para estacas longas com alguma redução decorrente de trincas de tração.

### Ensaio

Diversos ensaios foram realizados e interpretados. Estes ensaios foram executados em solos arenosos e argilosos com diversos tipos de fundação. No caso de estacas foram utilizadas estacas com 12,7 mm de diâmetro e vários comprimentos diferentes. Todos os ensaios foram realizados na Nova Scotia Technical College (HOPE, 1969; RANJAN, 1970; VALLIAPPAN, 1970).

Em estacas com base alargada, a capacidade de carga a tração inclinada de fundações geralmente decresce à medida que a inclinação da carga cresce com a vertical.

A Figura 2.5 apresenta os resultados dos ensaios realizados em argila saturada para diversos tipos de fundações e inclinações de carregamento.

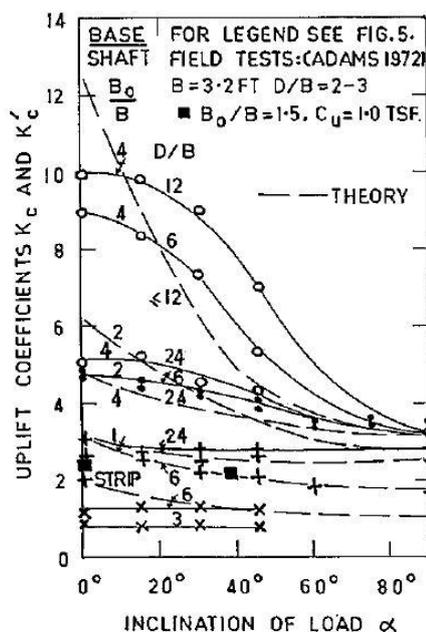


Figura 2.5 – Comparativo entre coeficientes teóricos e obtidos através de ensaios de fundações em argila, adaptada de MEYERHOF (1973).

### 2.3 Critério de Ruptura

O critério de ruptura para estacas solicitadas a tração inclinada utilizado neste trabalho é adotado na maioria dos projetos da indústria *offshore*. Este se baseia em um percentual de uma das dimensões de uma seção da estaca, ou seja, com base em uma dimensão conhecida é possível estimar o quanto de deslocamento da estaca será provocado pela carga na iminência da ruptura. No critério utilizado no trabalho é adotado o valor de deslocamento igual a 10% do diâmetro da estaca.

Na Figura 2.6 é apresentado um exemplo de gráfico carga versus deslocamento, considerando uma estaca circular com diâmetro igual a 40 cm. Ao aplicar o critério de ruptura citado, obtém-se um deslocamento de 4 cm, o que forneceria uma carga de ruptura de aproximadamente 5,3 kN.

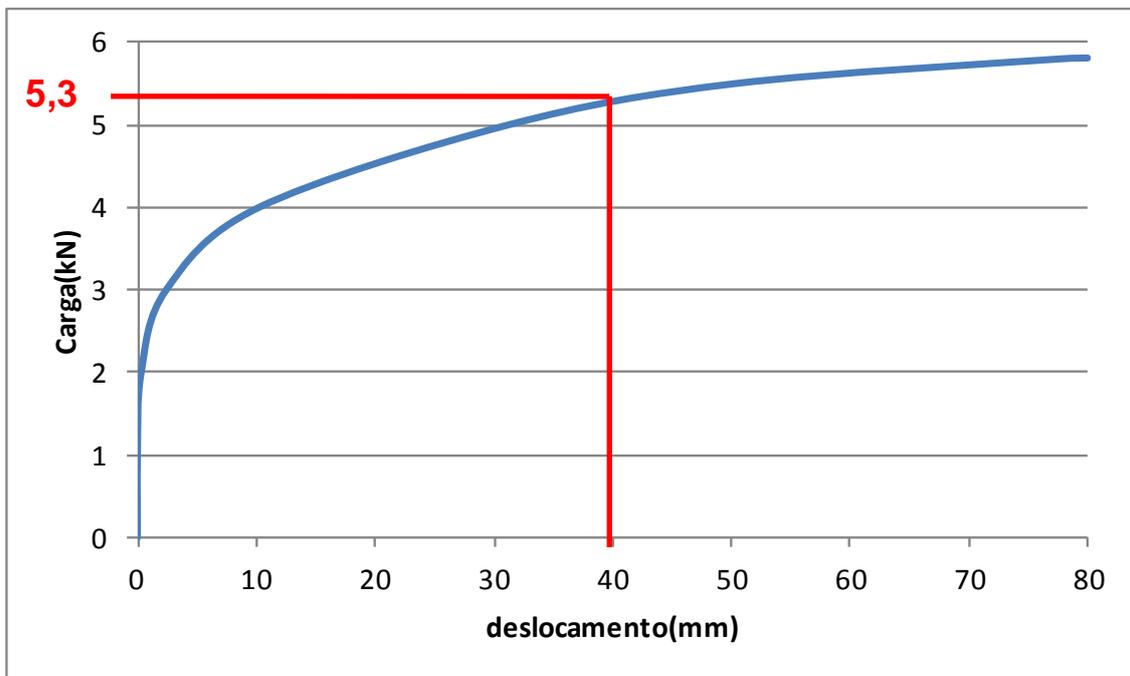


Figura 2.6 – Exemplo de utilização do critério de ruptura adotado

Devido à geometria não convencional das estacas torpedo, a largura equivalente considerada para este tipo de estacas foi tomada como sendo a projeção das aletas na direção da força solicitante. Para a estaca-torpedo modelo a largura considerada é de 25 cm, como apresentado na Figura 2.7. Neste caso o deslocamento equivalente será igual a 2,5 cm.

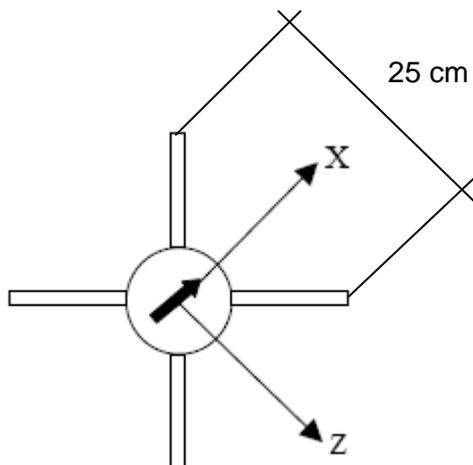


Figura 2.7 – Largura adotada para definição do critério de ruptura

### 3 Campo Experimental

#### 3.1 Localização, Perfil Geotécnico e Ensaios de Campo Realizados

O local escolhido para as provas de carga foi o campo experimental do Sarapuí II, que está localizado no município de Duque de Caxias no Estado do Rio de Janeiro, Estação Rádio da Marinha. A área fica adjacente a Rodovia Washington Luiz (BR-040) a cerca de dois quilômetros da REDUC. O solo ensaiado é uma argila mole, onde varias pesquisas têm sido desenvolvidas (e.g JANNUZZI, 2009; HENRIQUES JUNIOR *et al.*, 2010; JANNUZZI *et al.*, 2010a, 2010b). A Figura 3.1 mostra uma vista de satélite da região (*GoogleEarth*). Um dos fatores determinantes para a escolha do campo experimental do Sarapuí II foi o fato deste possuir propriedades semelhantes às condições encontradas nos cenários *offshore*.



Figura 3.1 – Localização da área de realização dos ensaios na Estação Rádio da Marinha em relação à rodovia Washington Luiz, BR-040 (*GoogleEarth*)

De acordo com informações obtidas através do *GoogleEarth*, as coordenadas do campo experimental do Sarapui II são: latitude 22.741619°S latitude e longitude 43.287839°W.

Nas figuras 3.2 (A) e 3.2 (B) são ilustradas a entrada de acesso à área de realização dos ensaios e a área de realização dos ensaios, respectivamente.



Figura 3.2 – (A) Entrada de acesso à área de realização dos ensaios – (B) Área de realização dos ensaios

A Figura 3.3 apresenta a visão aérea da região de realização da prova de carga a tração inclinada com a estaca-torpedo modelo no campo experimental do Sarapui II.



A Tabela 3.1 relaciona os ensaios de campo já realizados em projeto de pesquisa anterior (JANNUZZI, 2009). Na ocasião, foi realizada caracterização geotécnica do local com base em ensaios de campo (SPT, CPTU, PALHETA e T-Bar). Em pesquisa recente foram realizadas quatro verticais de dilatômetro sísmico (SDMT) no campo experimental do Sarapuí II, além da retirada de amostras deformadas e indeformadas para caracterização completa em laboratório e determinação de outros parâmetros obtidos através de ensaios de laboratório. A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos ensaios realizados no campo experimental do Sarapuí II até a presente data.

Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios de campo realizados em Sarapuí II

| <b>Ensaio</b>                        | <b>Quantidades</b> |
|--------------------------------------|--------------------|
| SPT                                  | 6                  |
| CPTU                                 | 7                  |
| Verticais de Palheta Elétrica (VANE) | 5                  |
| T-Bar                                | 4                  |
| SDMT                                 | 4                  |

Na Figura 3.5 está indicada a área de realização das provas de carga com a estaca-torpedo modelo. Ressalta-se que esta área foi escolhida pois para a realização das provas de carga havia a necessidade de uma região na qual não houvesse ainda passagem de qualquer tipo de sobrecarga, como por exemplo a máquina de cravação dos ensaios de campo que foram realizados no lado oposto.

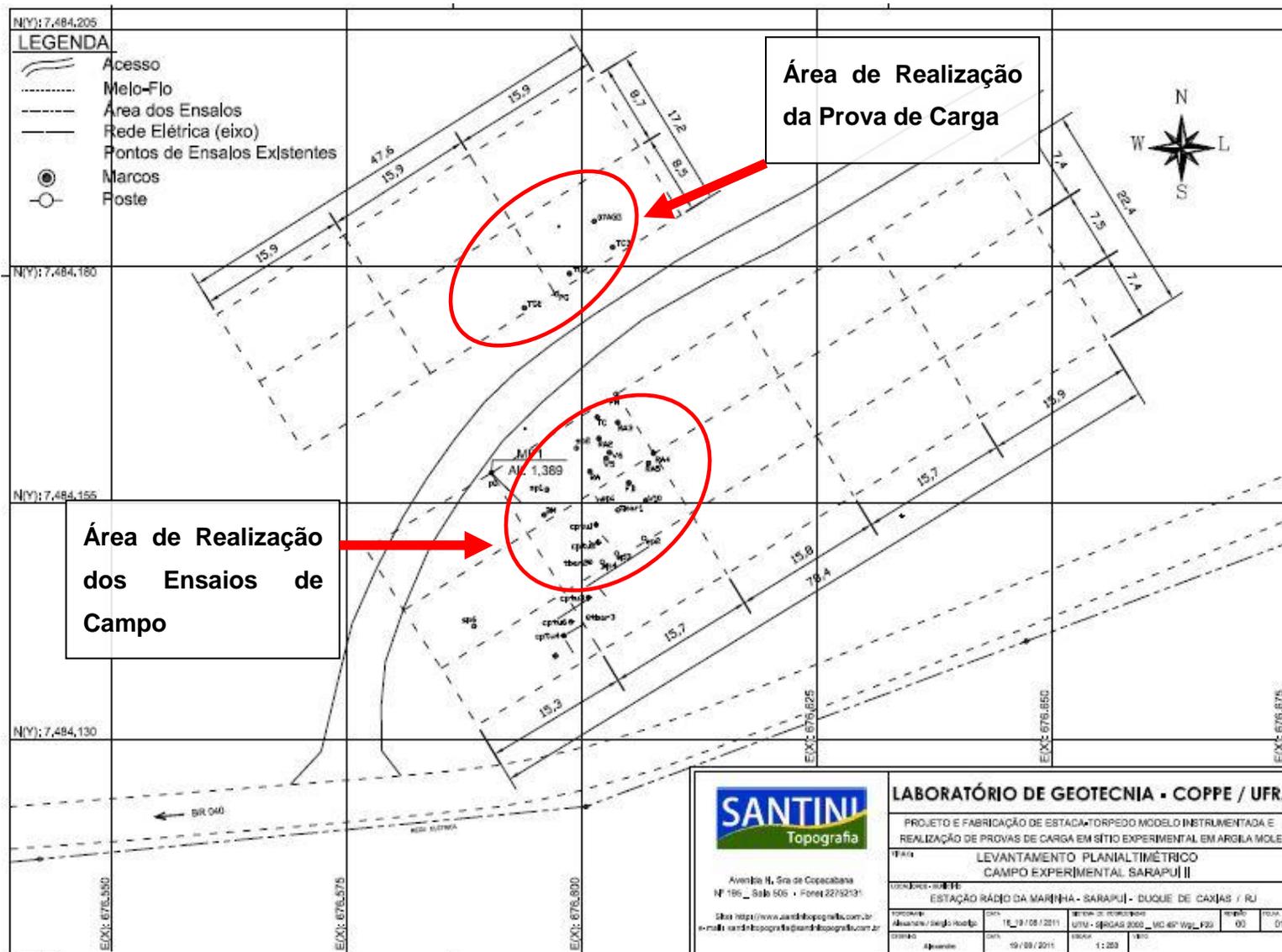


Figura 3.5. – Planta de locação no campo experimental de Sarapuí II

### 3.2 Parâmetros Geotécnicos Considerados nas Análises

A partir de ensaios de campo realizados no campo experimental do Sarapui II em pesquisa recente (JANNUZZI, 2009) e de ensaios de laboratório realizados por Jannuzzi (2013, tese em andamento) foram estimados os parâmetros geotécnicos utilizados na análise da estaca-torpedo modelo.

O parâmetro utilizado para alimentar o método de MEYERHOF (1973) para estimar a carga de ruptura do solo com a estaca-torpedo modelo foi a resistência não drenada ( $S_u$ ).

Para utilização no método foi adotado como limite inferior o parâmetro obtido através do ensaio de cisalhamento simples (DSS) e como limite superior o valor determinado através do ensaio de palheta elétrica (VANE). Os valores utilizados estão apresentados na tabela 3.2.

Considerando que a estaca-torpedo modelo possui cerca de dois metros enterrada foi adotado que a profundidade de referência para obtenção de  $S_u$  seria de 1 metro.

Tabela 3.2 – Valores de  $S_u$  utilizados na análise pelo método de MEYERHOF (1973). (JANNUZZI, 2013)

| Tipo de Ensaio Realizado | Profundidade (m) | $S_u$ (kPa) |
|--------------------------|------------------|-------------|
| Palheta                  | 1 m              | 8           |
| DSS                      | 1 m              | 4,5         |

## 4 As Estacas

### 4.1 A Estaca-Torpedo

As estacas-torpedo são amplamente utilizadas no Brasil como pontos fixos de ancoragem. Porém, vários aspectos relacionados à sua utilização ainda constituem desafios tecnológicos e, por isso, têm sido objeto de estudo de diversos centros de pesquisa (COSTA, 2008).

O conceito de estaca-torpedo, como a apresentada na Figura 4.1, foi proposto como solução para suportar as componentes verticais das cargas transmitidas pelas linhas e, ao mesmo tempo, contornar os problemas associados aos outros tipos de fundações (MEDEIROS, 2001 *Apud* COSTA, 2008).

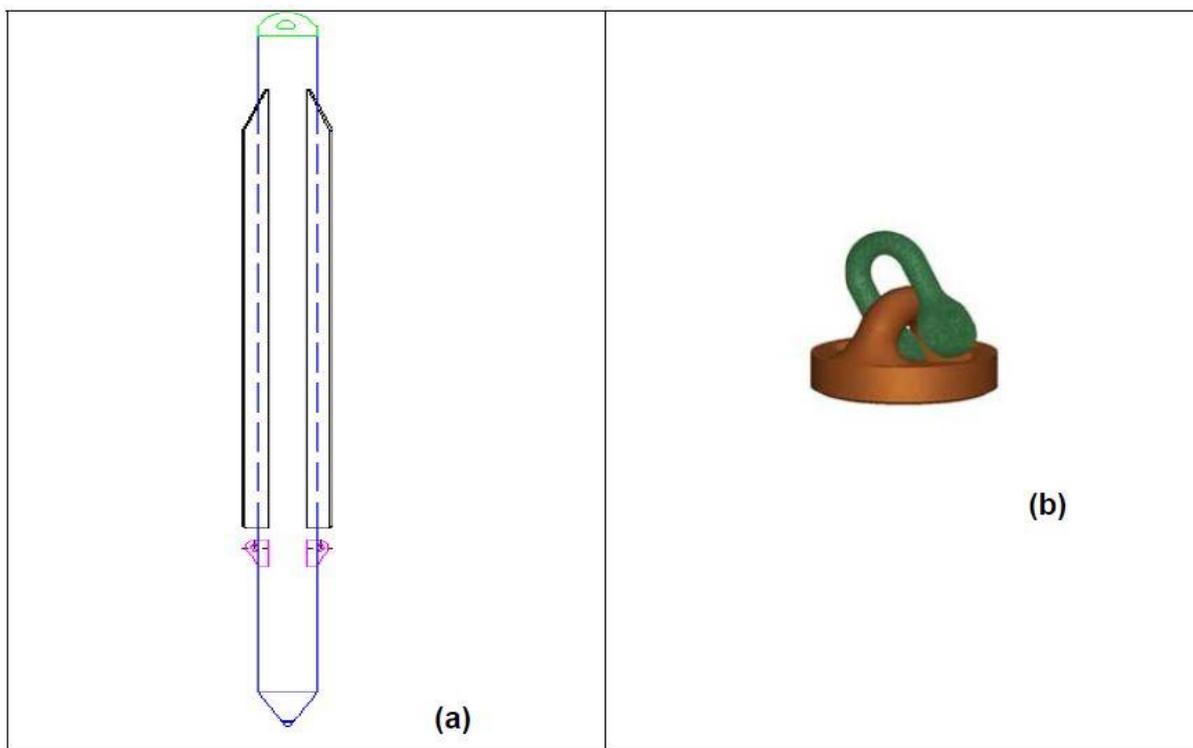


Figura 4.1 – (a) Estaca Torpedo e, em destaque, (b) Olhal de topo da estaca (MEDEIROS, 2002 *apud* COSTA, 2008).

As estacas-torpedo consistem de um tubo metálico de ponta fechada, dotada ou não de aletas, preenchido com materiais para aumentar o peso próprio da estaca(Figura 4.1a). A presença de um olhal externo, no topo da estaca (Figura 4.1b) permite que cargas horizontais e verticais possam ser aplicadas. Isto mostra que este tipo de ancoragem atende bem a fatores inerentes a problemas encontrados em águas profundas e ultra-profundas, tais como a necessidade de se ancorar com pequenos raios e de resistir a grandes componentes verticais de carregamento. (MEDEIROS, 2002 *apud* COSTA, 2008).

A estaca-torpedo (T-98), base para a fabricação do modelo utilizado neste trabalho, contém quatro aletas igualmente espaçadas, sendo uma estaca tubular de ponta fechada, de 1,067 m de diâmetro, 17 m de comprimento, cuja parede tem 0,038 m de espessura e cujas aletas têm 11 m de extensão e 0,90 m de largura. A Figura 4.2

mostra a estaca-torpedo (T-98) em tamanho natural. Em geral, seu comprimento é cerca de 10 vezes o seu diâmetro, apresentando basicamente o comportamento de um corpo rígido.



Figura 4.2 – Estaca-torpedo T-98 em tamanho real (imagem cedida pela PETROBRAS S.A. - proibida a reprodução sem prévia autorização da empresa)

#### 4.2 A Estaca-Torpedo Modelo

A estaca-torpedo modelo é uma versão reduzida da estaca-torpedo (T-98) utilizada para ancoragens *offshore*.

Para a definição da geometria da estaca-torpedo modelo, foi realizada uma análise dimensional e definida a escala geométrica do modelo: 1:8.

A fabricação da estaca-torpedo modelo foi realizada por uma empresa que já é fornecedora de estacas-torpedo utilizadas em águas profundas e ultra-profundas.

O material utilizado para a fabricação da estaca-torpedo modelo foi o aço carbono SAE 1020.

A estaca-torpedo modelo contém quatro aletas igualmente espaçadas, sendo uma estaca tubular de ponta fechada, de 14 cm de diâmetro e 2,25 m de comprimento, cuja parede tem 0,60 cm de espessura e cujas aletas têm 1,15 m de extensão e 0,11 m de largura. Inicialmente a estaca-torpedo modelo possuía um par de olhais no topo para a aplicação dos esforços durante os ensaios.

Após a fabricação do modelo foi constatado que seria necessária a instalação de um prolongador com olhais para facilitar a aplicação dos esforços durante as provas de carga. Um prolongador de cerca de 75 cm de comprimento, com três estágios de olhais, foi soldado ao corpo cilíndrico do modelo, conforme pode ser observado na figura a seguir.



Figura 4.3 – Estaca-torpedo modelo após colocação do prolongador para aplicação dos carregamentos

A estaca-torpedo modelo, após a instalação do prolongador, ficou com 2,95 m de comprimento. Os níveis dos quatro olhais instalados são: 5 cm, 25 cm, 45 cm e 75 cm em relação ao topo da estaca. O peso da estaca-torpedo modelo após todas as intervenções ficou de 1,60 kN.

A Figura 4.4 mostra as principais dimensões e detalhes, além de apresentar as vistas: elevação e isométrica, após a instalação do prolongador na estaca-torpedo modelo.

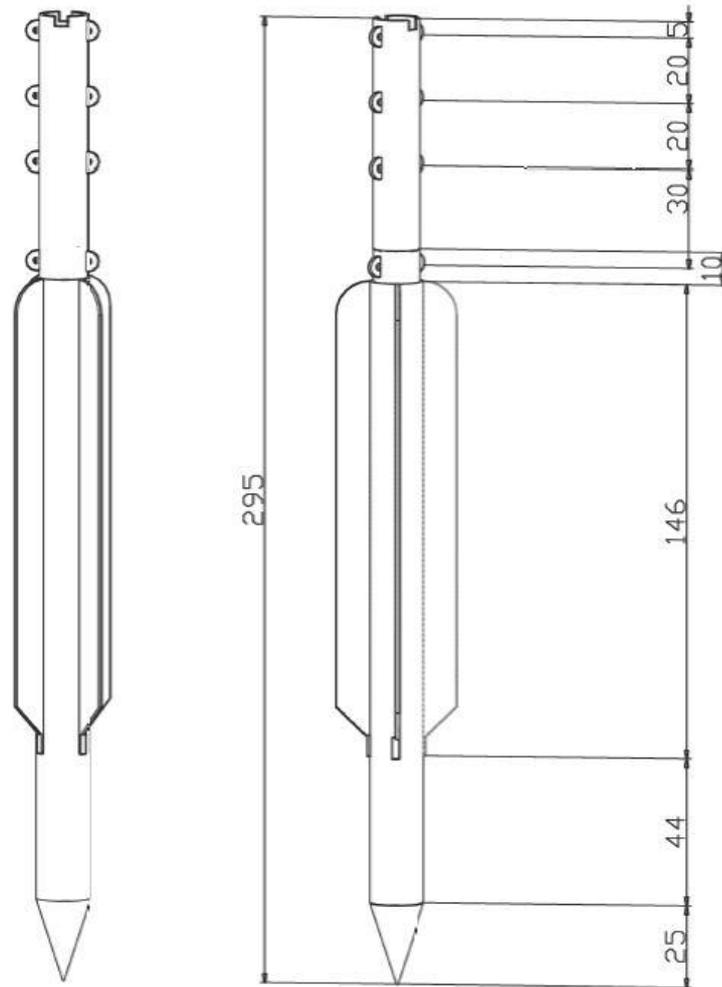


Figura 4.4 – Principais dimensões, em centímetros, e vistas da estaca-torpedo modelo: elevação e isométrica (dimensões em centímetro, sem escala)

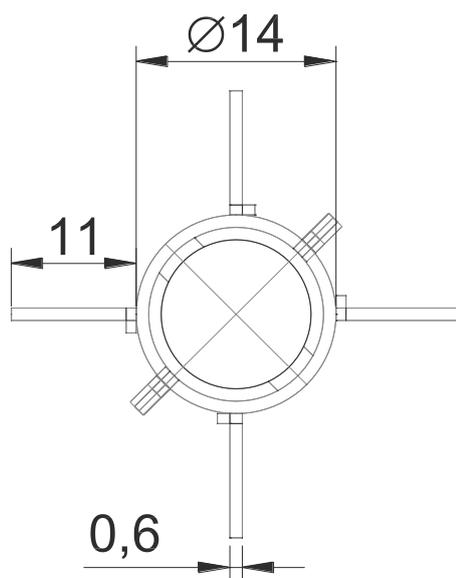


Figura 4.5 – Detalhe da vista superior da estaca-torpedo modelo

A estaca-torpedo modelo foi ainda instrumentada com células de tensão total, transdutores de poro-pressão e sensores de inclinação, ver GUIMARÃES *et al.* (2012) e CONDE DE FREITAS *et al.* (2012).

## 5 Prova de Carga

### 5.1 Generalidades

Para realização da prova de carga de tração inclinada com a estaca-topedo modelo um grande planejamento foi realizado. Diversos equipamentos e processos foram testados previamente tanto no laboratório quanto no campo experimental de modo a reduzir a possibilidade de percalços durante a realização dos trabalhos de campo.

Foram realizados diversos procedimentos para viabilizar a realização da prova de carga, como por exemplo: calibração da instrumentação, sistema de aquisição de dados e testes com gerador. A seguir são apresentados alguns detalhes destes procedimentos. Ressalta-se que devido à complexidade que envolve a realização de uma prova de carga deste tipo nem todos os detalhes são apresentados.

- Testes com sistema de aquisição de dados

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados para que os dados da instrumentação pudessem ser correlacionados em um mesmo instante de tempo. Diversos testes com este sistema foram realizados previamente em laboratório visando evitar imprevistos no campo experimental. Para a utilização deste sistema de aquisição, foi planejada uma configuração prática para a conexão da instrumentação no campo. Foram utilizados nos *slots* de memória dos cartões, conectores (tipo DB 25) que são ligados a caixas de passagem. Nas figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 são apresentados os equipamentos utilizados para que fosse possível adquirir os dados, associados a um mesmo instante de tempo, durante a prova de carga.

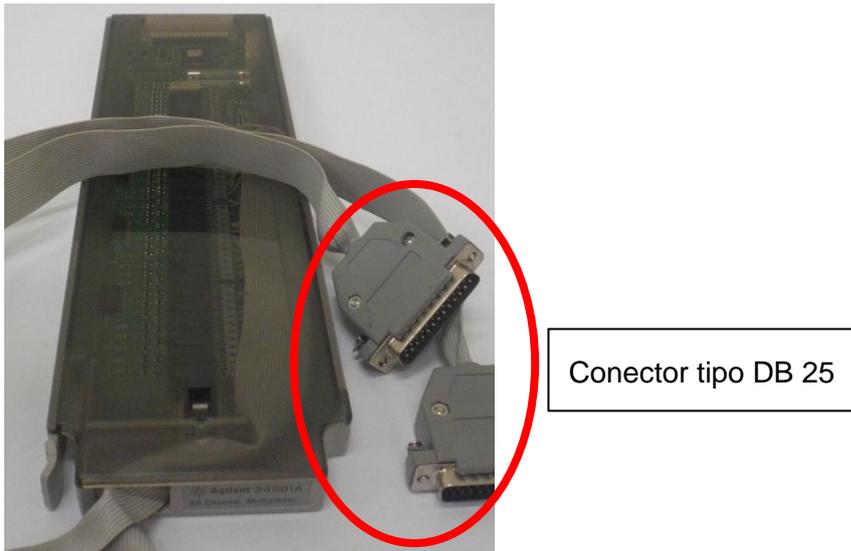


Figura 5.1 – Memória tipo 34901A com o cabo tipo flat e conectores DB 25 instalados



Figura 5.2 – Detalhes do sistema de aquisição de dados

Os instrumentos são conectados diretamente nas caixas de passagem através de cabos e conectores apropriados.



Figura 5.3 – Vista do fundo e da parte frontal das caixas de passagem

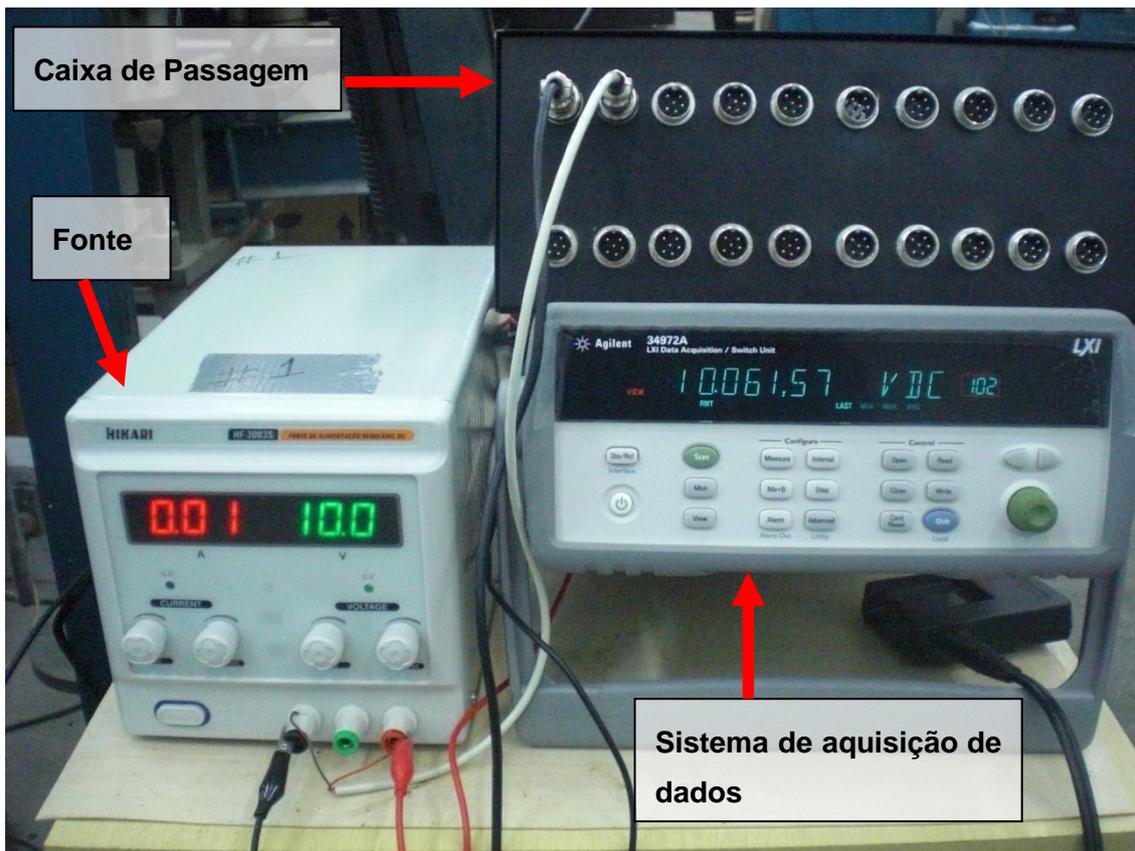


Figura 5.4 – Sistema de aquisição, caixa de passagem e fonte

A seguir, na Figura 5.5, apresenta-se um esquema com a ilustração de cada item utilizado tanto no laboratório quanto no campo.

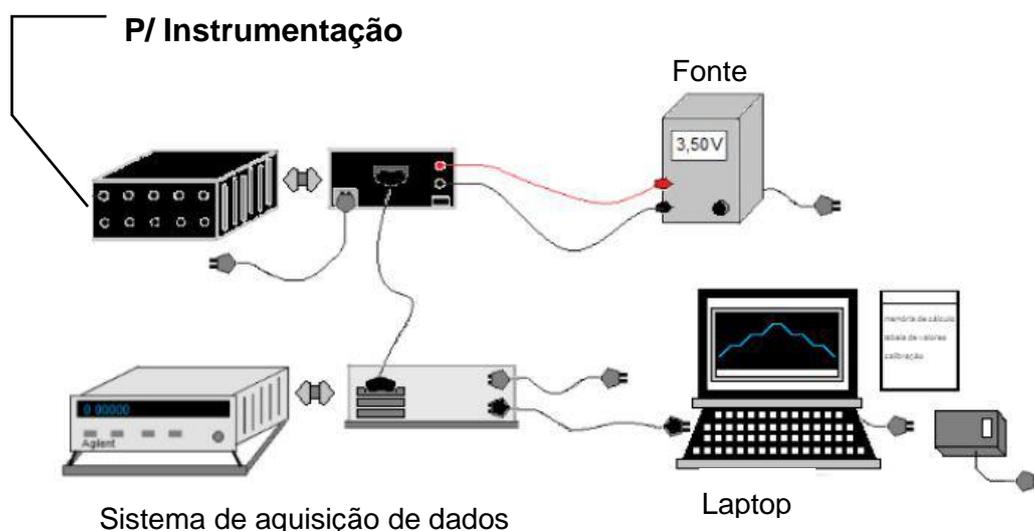


Figura 5.5 – Layout adotado para instrumentação – adaptado de CONDE DE FREITAS (2013)

- Testes com o gerador

Foram realizados diversos testes com a instrumentação da prova de carga sendo alimentada por um gerador ainda no laboratório. Este fato deveu-se à preocupação com a oscilação da tensão fornecidas pelo gerador.

O gerador utilizado para alimentar toda a instrumentação foi da marca BRANCO e suas principais características são mostradas na tabela 5.1 fornecida pelo fabricante.

Tabela 5.1 – Principais características do gerador BRANCO, DB-6500CFES – Disponível em <http://www.branco.com.br/produtos/geradores/bd-6500-es/>

|                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| motor                      | 10,0 cv                |
| partida                    | Partida elétrica       |
| tipo de combustível        | Diesel                 |
| potência contínua          | 4,0 KVA                |
| tensão de saída            | 110 V / 220 V          |
| tomada auxiliar            | 110 V                  |
| controle de tensão         | Capacitor / sem Escova |
| carregador de bateria      | 12 V, 8,3 A            |
| capacidade do tanque       | 12,5 l                 |
| autonomia (50% de carga)   | 5,2 h                  |
| peso                       | 165 kg                 |
| fases                      | Monofásico             |
| ruído (7 m)                | 70 dB A                |
| dimensões (C x L x A) (mm) | 920 x 520 x 700        |
| fio (mm)                   | 6,0                    |

A Figura 5.6 apresenta o gerador utilizado assim como um detalhe do quadro de comando.



Figura 5.6 – Gerador utilizado na pesquisa

Apresenta-se, na Figura 5.7, um gráfico mostrando que a oscilação de tensão com as fontes utilizadas é muito pequena podendo ser desprezada.

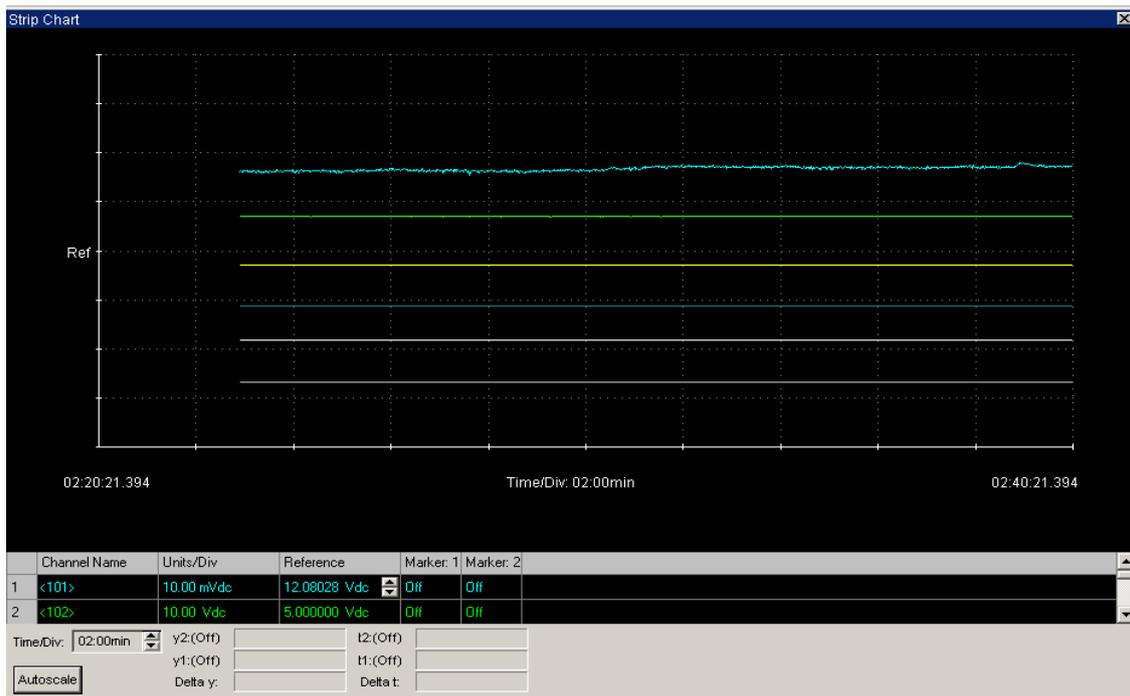


Figura 5.7 – Fontes testadas com a utilização do gerador

- Vigas de referência

Para possibilitar a utilização do sistema de medição de deslocamentos planejado, utilizando LVDT's, foi necessário projetar um conjunto de vigas de referência. O material escolhido para fabricação das vigas de referência foi a madeira, por apresentar algumas vantagens em relação a outros materiais, como o aço, por exemplo. Dentre estas vantagens estão o menor peso, que facilita o transporte do sistema de referência, além de um coeficiente de dilatação menor, o que torna menos preocupantes as deformações do material quando este está exposto às variações de temperatura durante os trabalhos de campo.

Antes de sua utilização no campo, as vigas foram montadas e numeradas para facilitar a montagem durante a realização da prova de carga. Esta pré-montagem é ilustrada na Figura 5.8, apresentada a seguir. Ressalta-se que as ligações entre as várias peças de madeira utilizadas no sistema de vigas de referência foram realizadas com chapas e parafusos para facilitar a montagem e desmontagem no local dos ensaios.



Figura 5.8 – Esquema de montagem prévia do sistema de referência de deslocamentos

Foram instaladas pequenas chapas de aço em alguns trechos da viga de referência para que fosse possível fazer a fixação dos LVDT's nas vigas através do uso de bases magnéticas acopladas aos LVDT's.

Na Figura 5.9 é possível visualizar as vigas de referência já instaladas e com os LVDT's fixados.



Figura 5.9 – Vigas de referência

Na Figura 5.10 é apresentado o esquema das vigas de referência em relação à estaca-torpedo modelo e os grupos de estacas de reação.

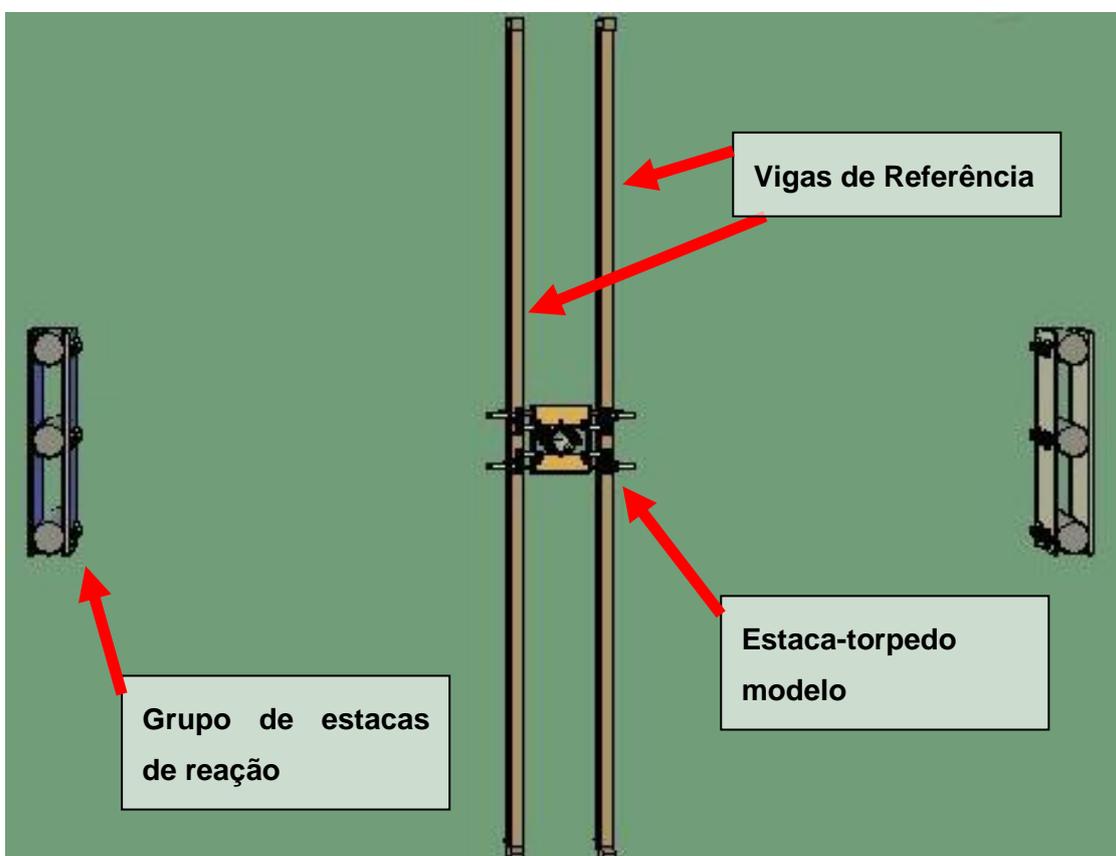


Figura 5.10 – Vista em planta do posicionamento das vigas de referência

- Sistema de plataformas para execução da prova de carga

Devido às características da argila mole na superfície do terreno no campo experimental de Sarapuí II, foram planejadas passarelas auxiliares em madeira para permitir a circulação de pessoas no entorno do local escolhido para cravação da estaca-torpedo modelo, para preservar ao máximo as características do solo no entorno do sistema de cravação. Nas figuras 5.11 e 5.12 é apresentado o descarregamento e posicionamento das passarelas auxiliares no campo



Figura 5.11 – Passarelas auxiliares sendo posicionadas



Figura 5.12 – Posicionamento das passarelas auxiliares

- Macaco hidráulico

Para a realização da prova de carga foi necessária a utilização de dois tipos de macacos. Ambos são hidráulicos, mas diferem em sua capacidade de aplicação de carga: um é fabricado para promover esforços de tração e o outro somente de compressão, sendo o primeiro utilizado durante a aplicação de carga de tração na estaca-torpedo modelo e o segundo na cravação dos grupos de estacas de reação e da estaca-torpedo modelo (adaptado de GUIMARÃES 2013).

A bomba hidráulica utilizada em ambos os macacos é da marca RÖMHELD com capacidade de 100 kN.

Os macacos utilizados em cada uma das atividades foram:

- 1- Cravação – para cravação do grupo de estacas e da estaca-torpedo modelo foi utilizado o macaco responsável por promover esforços de compressão. A marca utilizada é RÖMHELD, mesmo fornecedor da bomba hidráulica. O curso de macaco é de cerca de 360 mm.
- 2- Prova de Carga – durante a prova de carga de tração inclinada, foi utilizado o macaco hidráulico vazado, que permitia a aplicação de carga de tração. Este macaco é da marca ENERPAC, com um curso total de 76 mm.

Nas figuras 5.13 e 5.14 são apresentados os macacos hidráulicos da marca ENERPAC e o da RÖMHELD, respectivamente.



Figura 5.13 – Macaco hidráulico utilizado para aplicar carga de tração



Figura 5.14 – Macaco hidráulico utilizado para cravação

O esquema com o macaco na posição durante a realização da prova de carga é apresentado na Figura 5.15.

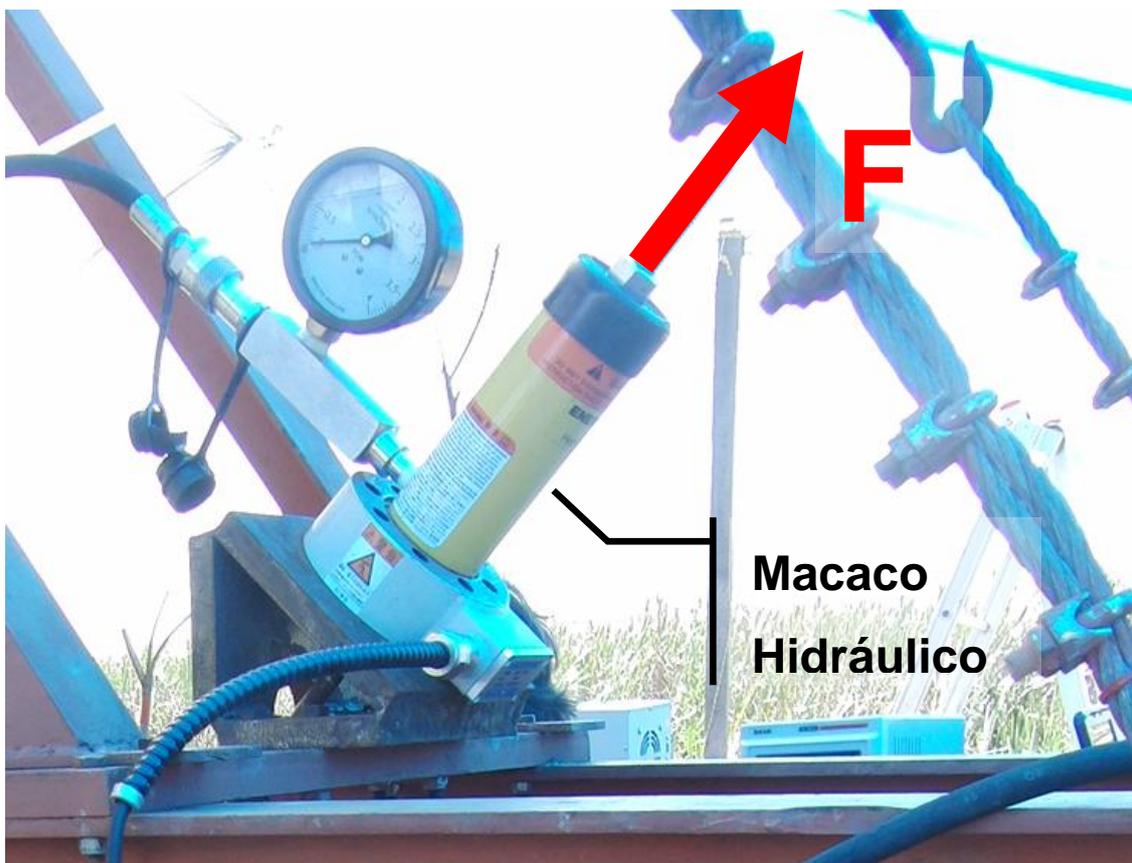


Figura 5.15 – Detalhe do macaco hidráulico posicionado para a prova de carga

## 5.2 Arranjo Físico

A prova de carga a tração inclinada foi planejada de modo que a estaca-torpedo modelo pudesse ser ensaiada até que fosse caracterizado o esgotamento da capacidade de carga do terreno, ou seja, a ruptura. Foram utilizadas estruturas compostas por 2 blocos rígidos com 3 estacas cada interligados por um sistema de vigas metálicas.

A seguir, na Figura 5.16, é apresentada uma ilustração com uma vista em elevação do sistema projetado e executado com as vigas de referência e base.

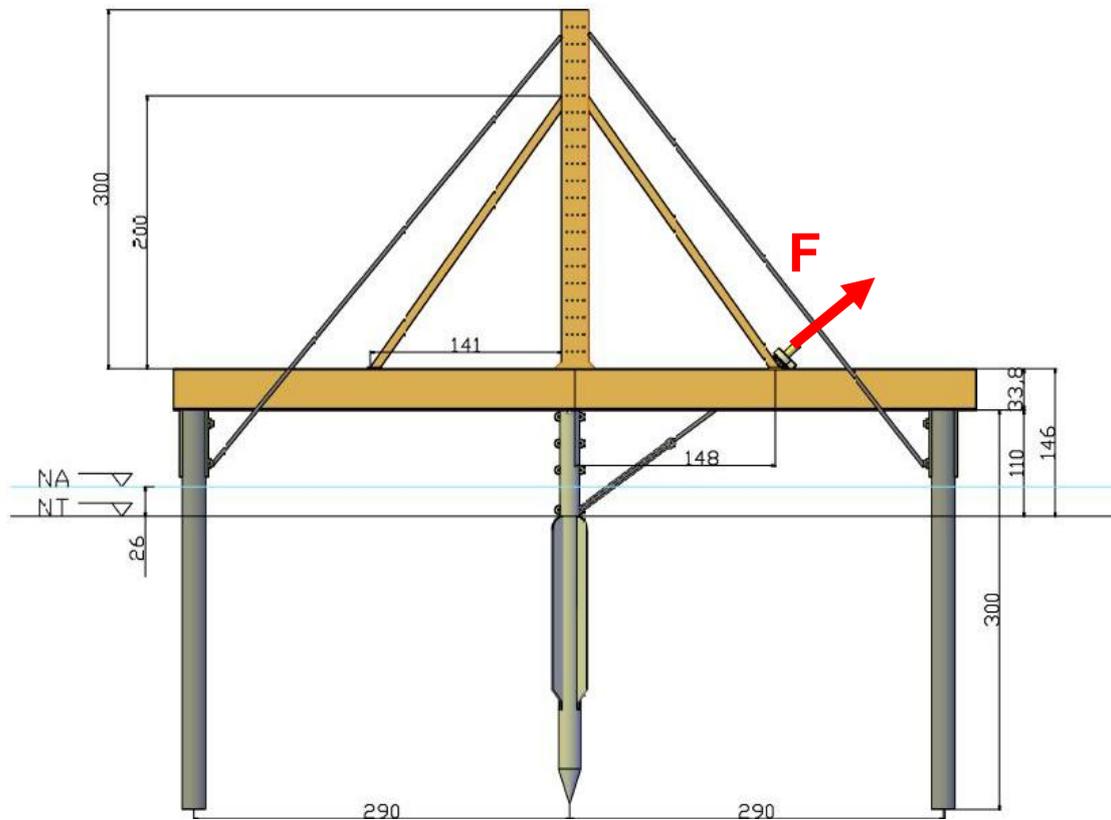


Figura 5.16 – Vista em elevação com as cotas em cm

A figura 5.17 apresenta um esquema em planta da prova de carga a tração inclinada a 45°.

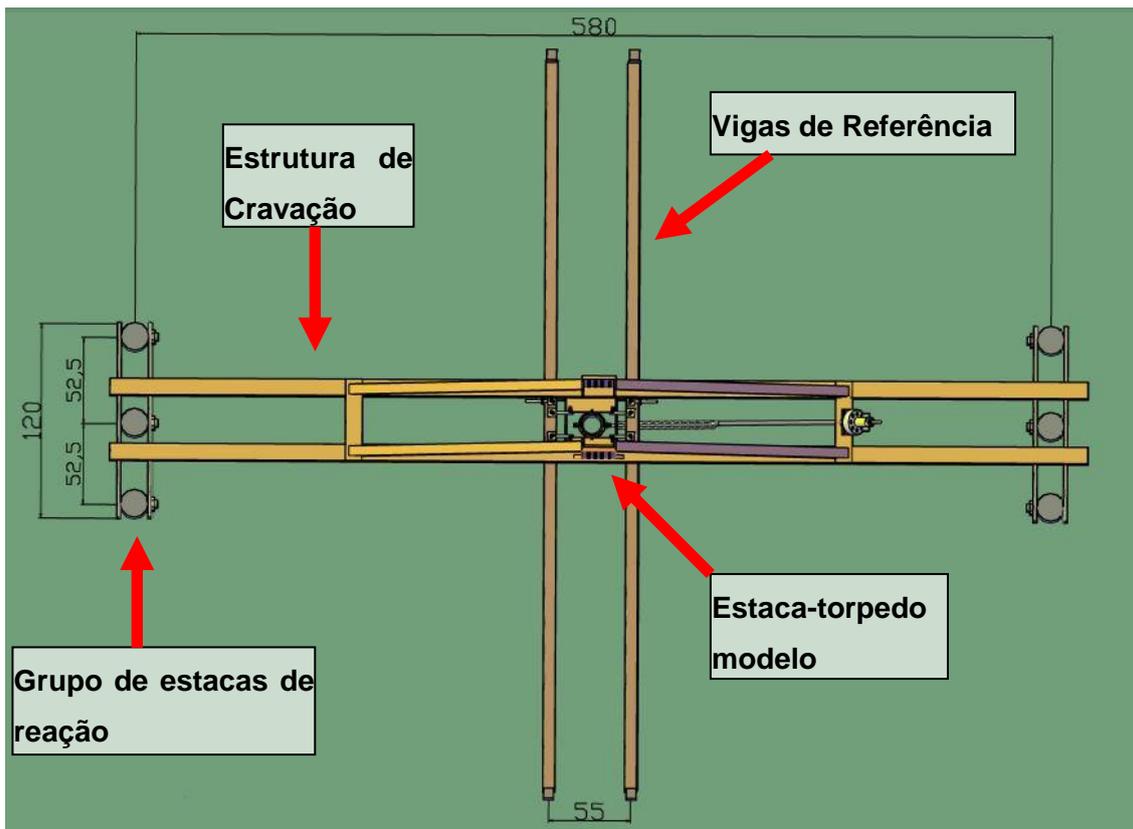


Figura 5.17 – Vista em planta da prova de carga

A Figura 5.18 apresenta um esquema isométrico da prova de carga a tração inclinada a 45°.

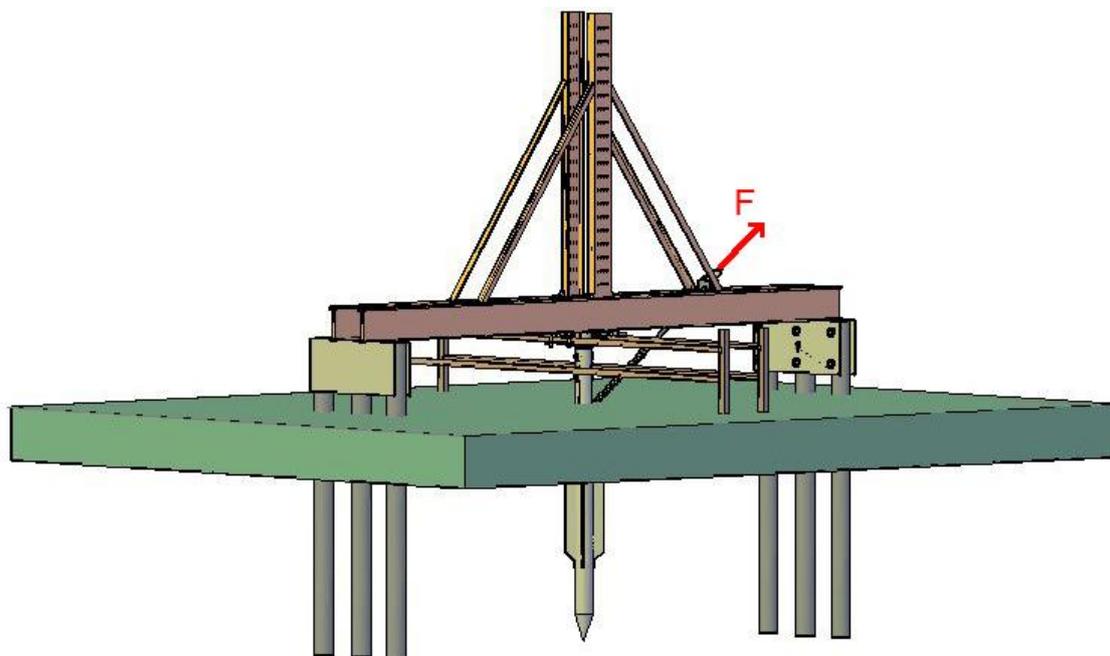


Figura 5.18 – Vista isométrica da prova de carga

### 5.3 Estacas de Reação

Devido às condições de fornecimento dos tubos estruturais utilizados como estacas (múltiplos de 3 metros) seria necessário utilizar um grupo de pelo menos duas estacas em cada lado da estaca-torpedo modelo. Com a intenção de um futuro estudo sobre o efeito de grupo em estacas, foram então planejados e executados dois blocos rígidos de três estacas iguais cada, que servem de reação.

Para que fosse possível a realização da prova de carga com a estaca-torpedo modelo, diversos equipamentos auxiliares foram necessários de modo a viabilizar a aplicação de um carregamento inclinado.

- Grupo de estacas de reação – foram utilizados dois grupos de estacas, cada um destes constituído de três estacas cilíndricas, que tem como função transferir o esforço de tração aplicado na estaca torpedo para o terreno no qual estas se encontram assentes.(Figura 5.19)



Figura 5.19 – Grupo de estacas de reação

Na Figura 5.20 são apresentados os grupos de estaca de reação após sua cravação no terreno.



Figura 5.20 – Estrutura de reação

Na Figura 5.21 apresentada a seguir é possível verificar o posicionamento dos grupos de estaca de reação sobre os quais foi apoiada a estrutura responsável pela cravação da estaca torpedo. Nesta figura a estrutura de cravação encontra-se na posição utilizada para cravação da estaca-torpedo, que difere em 90° em planta da posição definida para realização da prova de carga.



Figura 5.21 – Grupos de estacas de reação

## 5.4 Instrumentação

A instrumentação da prova de carga a tração inclinada foi composta de medidores de deslocamentos e medidores de força. Foram utilizados os LVDT's (Linear Variable Differential Transformer) para medida dos deslocamentos e células de carga para obter o valor das cargas aplicadas nas estacas.

### 5.4.1 LVDT

Para medição dos deslocamentos na prova de carga foi definida a utilização de LVDT's que, além de apresentarem boa acurácia, são dispositivos que podem ser utilizados com um sistema de aquisição de dados.

Algumas características gerais dos LVDT's utilizados para medir os deslocamentos continuamente durante as provas de carga estão apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Especificações dos LVDT's

| <b>Modelo</b>                  | <b>Designação</b> | <b>Curso (mm)</b> | <b>Fabricante</b> | <b>Quantidade</b> | <b>Tensão de alimentação</b> | <b>Grau de proteção</b> |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------|
| <b>PY - 2 - F - 100 - S60M</b> | <b>LVDT</b>       | <b>100</b>        | <b>GEFRAN</b>     | <b>8</b>          | <b>&lt; 60 V</b>             | <b>IP 40</b>            |

Durante a prova de carga, para medição dos deslocamentos verticais e horizontais da prova de carga inclinada, foram utilizados oito LVDT's, sendo quatro para medição dos deslocamentos horizontais e outros quatro medindo os deslocamentos verticais.

A Figura 5.22 mostra um dos LVDT's utilizados na prova de carga com a estaca-torpedo modelo.



Figura 5.22 – Modelo de LVDT utilizado na prova de carga

- Calibração dos LVDT's

Para a calibração dos LVDT's foi utilizado um micrômetro da marca Mitutoyo com sensibilidade de centésimo de milímetro. A Figura 5.22 mostra o aparelho utilizado para a calibração dos LVDT's.



Figura 5.23 – Micrômetro utilizado para calibração dos LVDT's

Já na Figura 5.24 é ilustrada a calibração em andamento.

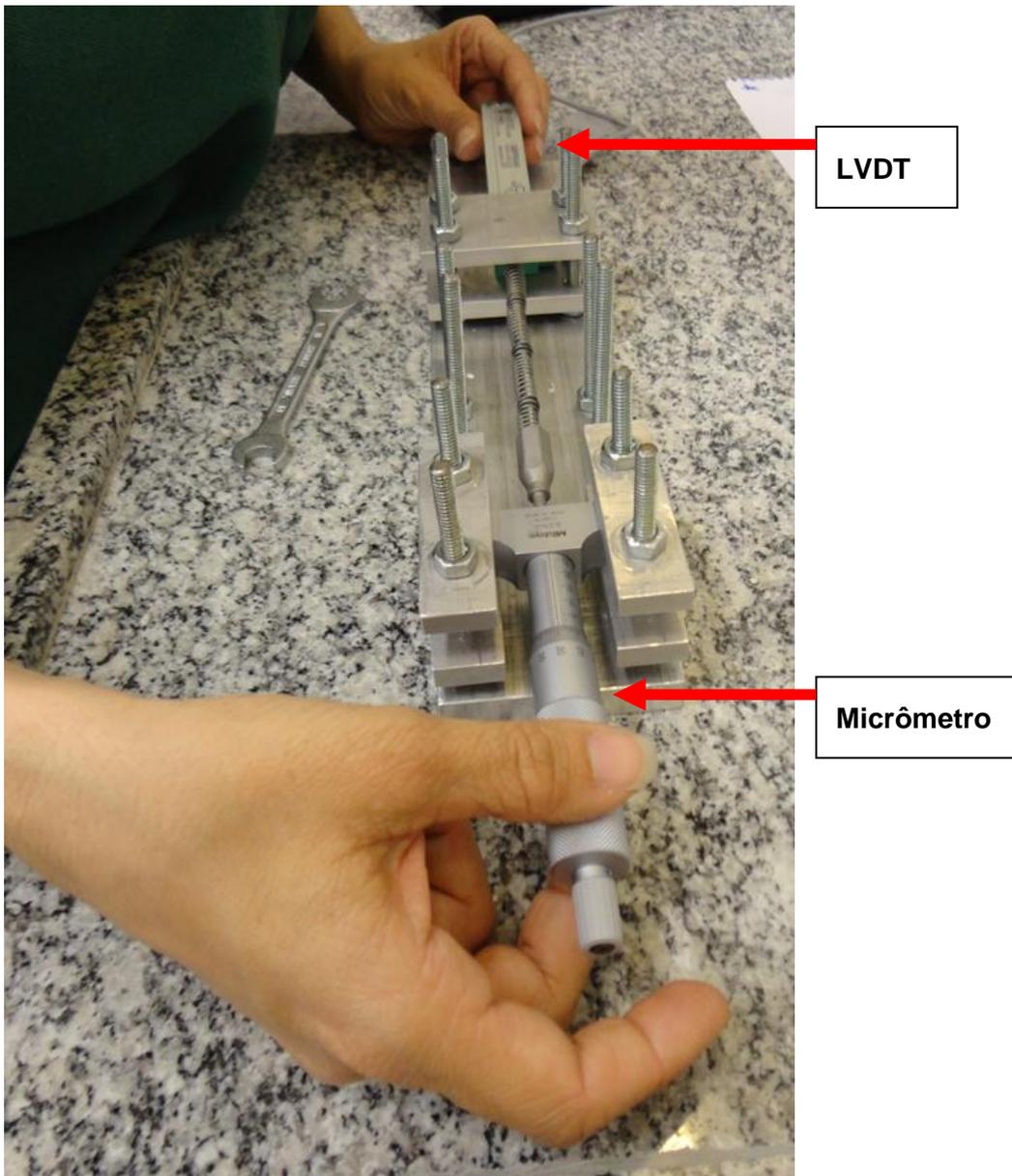


Figura 5.24 – Calibração do LVDT com o micrômetro

Nas figuras 5.25 e 5.26 são apresentados os gráficos gerados pela calibração dos LVDT's, o gráfico da calibração de um LVDT após a aplicação dos estágios de compressão e extensão e o gráfico da reta gerada para obter a constante de calibração após a realização dos 3 ciclos de compressão e extensão, respectivamente.

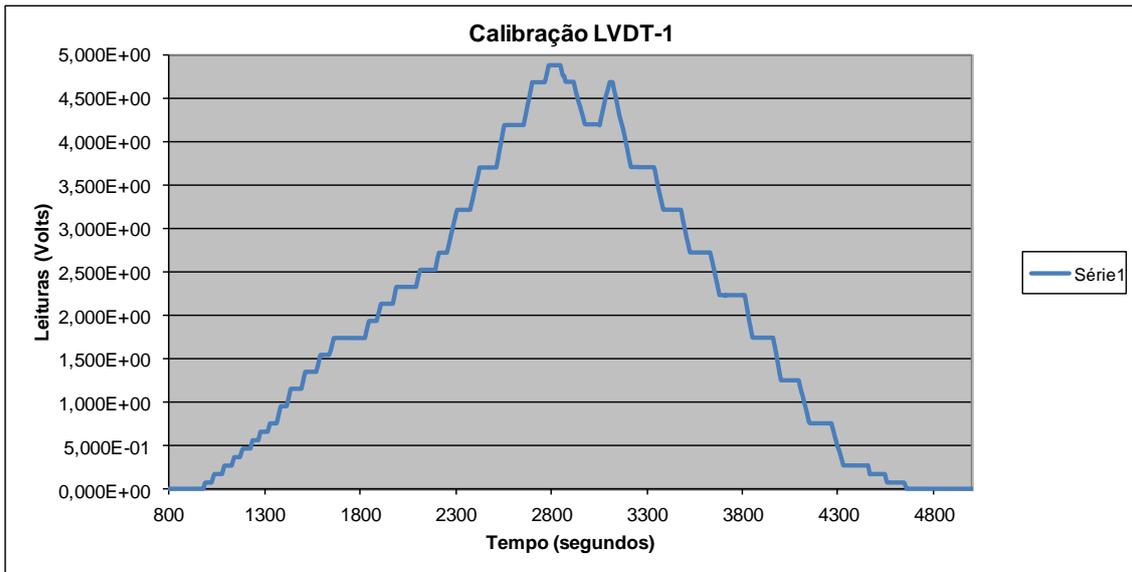


Figura 5.25 – Gráfico Leitura em Volts versus tempo em segundos

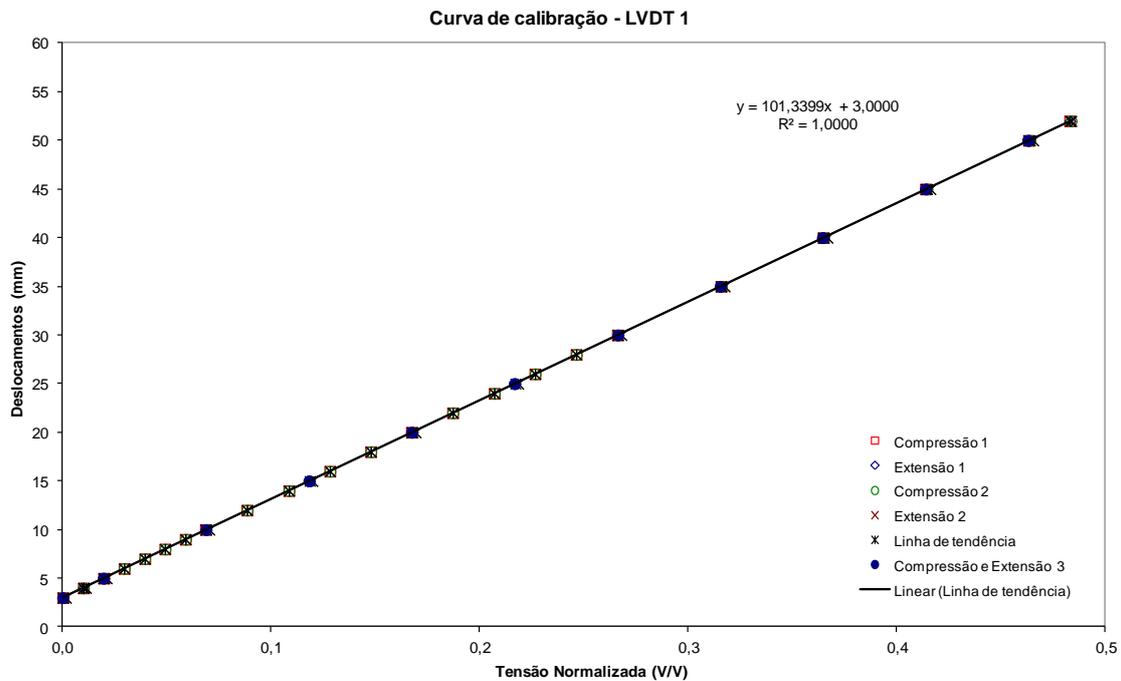


Figura 5.26 – Retra obtida após a aplicação dos 3 ciclos de compressão e extensão do LVDT-1

#### 5.4.2 Célula de carga

Para medição da carga de tração aplicada pelo macaco hidráulico durante a prova de carga foi utilizada uma célula de carga com capacidade de 50 kN, acoplada a uma barra de aço conectada à estaca-torpedo modelo por correntes. Esta célula de carga é vazada para permitir sua fixação na barra de aço utilizada no sistema.

O modelo de célula de carga escolhido foi o LUK-A-50kN da marca KYOWA. Seu funcionamento se dá através de strain-gauges internos à célula de carga. Suas principais características são apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Especificações da célula de carga

| <b>Modelo</b>       | <b>Designação</b>      | <b>Capacidade (kN)</b> | <b>Fabricante</b> | <b>Quantidade</b> | <b>Tensão de alimentação</b> |
|---------------------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| <b>LUK-A- 50 kN</b> | <b>Célula de Carga</b> | <b>50</b>              | <b>KYOWA</b>      | <b>1</b>          | <b>&lt; 2 V</b>              |

A seguir na Figura 5.27 é apresentada a célula de carga utilizada.



Figura 5.27 – Célula de carga KYOWA

- Calibração da célula de carga

Para a obtenção da constante de calibração da célula de carga utilizada na prova de carga a tração inclinada, esta foi previamente calibrada numa prensa mecânica, com o auxílio de um anel dinamométrico(Figura 5.28).



Figura 5.28 – Prensa utilizada na calibração da célula de carga

A calibração da célula de carga foi feita através da aplicação de incrementos de carga de aproximadamente 7,4 kN até 44,6 kN e então descarregado, foram feitos 2 ciclos de carga e descarga como mostra a Figura 5.29. O eixo vertical mostra os valores em mV lidos quando incrementos eram aplicados na prensa.

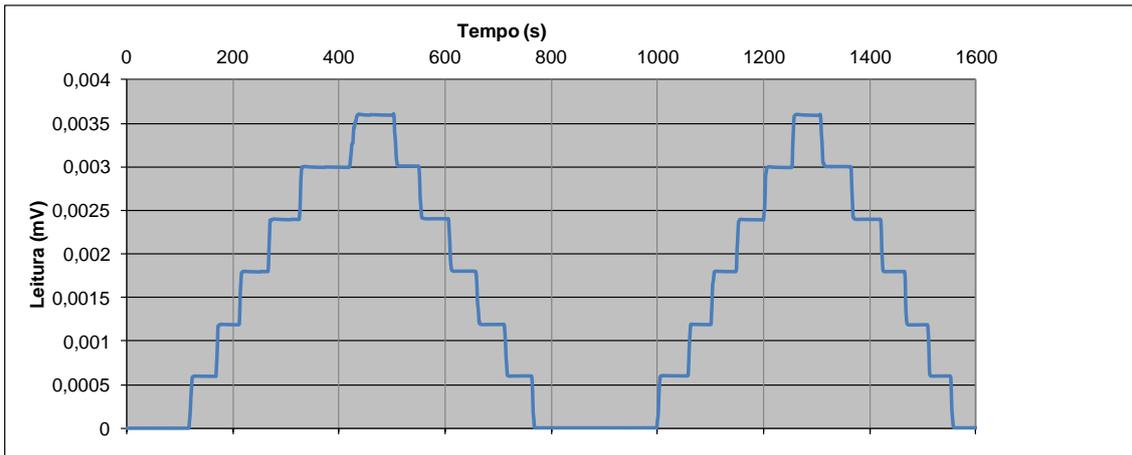


Figura 5.29 – Gráfico dos dados lidos durante a calibração da célula de carga

A partir dos dados lidos durante a calibração foi possível traçar o gráfico utilizado para obtenção da constante de calibração da célula de carga apresentado na Figura 5.30.

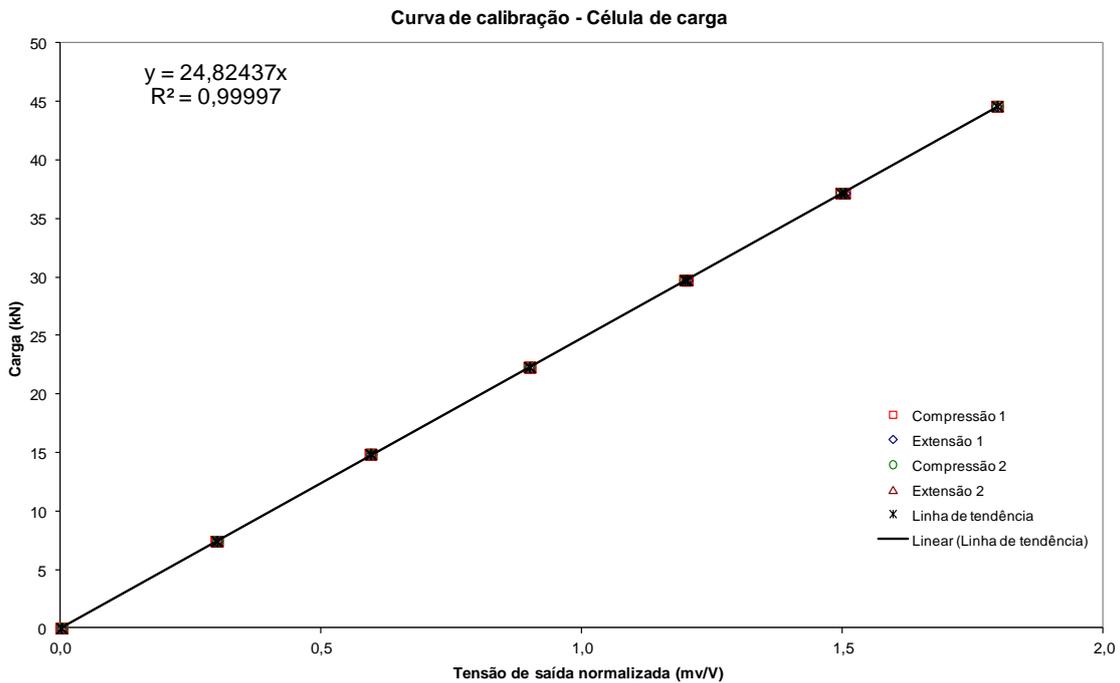


Figura 5.30 – Curva para obtenção da constante de calibração

## 5.5 Sistema de cravação

Um sistema de cravação foi projetado (SANTANA, 2013) e fabricado de tal maneira que a estrutura fosse capaz de executar basicamente 3 funções:

- 1- Cravação dos grupos de estacas de reação;
- 2- Cravação da estaca-torpedo modelo;
- 3- Servir como parte do sistema para realização da prova de carga.

As figuras 5.31 e 5.32 ilustram o sistema de cravação preparado para cravação da estaca-torpedo modelo.



Figura 5.31 – Sistema de cravação posicionado para cravação da estaca-torpedo modelo



Figura 5.32 – Sistema de cravação após instalação da estaca-torpedo modelo

## 5.6 Instalação das Estacas

Para a prova de carga a tração inclinada foram utilizados 2 grupos de estacas de reação, além da estaca-torpedo modelo. Para instalação dos grupos de estaca de reação o sistema de cravação foi apoiado sobre 2 blocos de concreto assentes numa chapa de aço colocada no nível do terreno.

A cravação dos grupos de estaca foi feita com o auxílio de um caminhão *Munck*, utilizado para colocar o grupo de estacas na posição desejada. Devido às características do terreno o trecho inicial da cravação ocorre apenas com o peso próprio do grupo de estacas, sendo a equipe realizadora da prova de carga responsável por garantir a verticalidade da estaca, acompanhando a cravação e utilizando níveis de bolha nas faces do grupo de estacas. A partir do momento em que o grupo de estacas perde a capacidade de cravação apenas por peso próprio, o macaco hidráulico passa a ser utilizado para levar o grupo de estacas até a profundidade de assentamento desejada.

Nas figuras 5.33 e 5.34 são mostradas as etapas referentes à cravação dos grupos de estacas de reação.



Figura 5.33 – Posicionamento do grupo de estacas com auxílio do caminhão *Munck*



Figura 5.34 – Conferência da verticalidade e cravação com auxílio do macaco hidráulico

O procedimento descrito para a cravação do grupo de estacas é realizado em ambos os grupos. Em seguida, é iniciada a cravação da estaca-torpedo modelo.

A instalação da estaca-torpedo também foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, que consiste no trecho inicial da cravação, esta foi realizada com o auxílio de um caminhão *Munck* e sua entrada no solo foi devida somente ao peso próprio da estaca. Durante esta etapa o caminhão ficou responsável pelo controle da velocidade de cravação e a equipe participante da cravação fez o controle da verticalidade utilizando como referência níveis de bolha acoplados à estaca-torpedo modelo. A segunda etapa de cravação ocorreu assim que a estaca perdeu a capacidade de avançar até a profundidade estipulada apenas com o peso próprio. A partir deste momento o avanço foi feito com o auxílio de um macaco hidráulico acoplado a uma chapa de aço apoiada no topo da estaca-torpedo modelo.

Nas figuras 5.35 e 5.36 são apresentadas as duas etapas de cravação da estaca-torpedo modelo.



Figura 5.35 – Etapa inicial da cravação - peso próprio da estaca torpedo modelo



Figura 5.36 – Segunda etapa da cravação, com macaco hidráulico

## 5.7 Instalação da Instrumentação

### 5.7.1 LVDT

A Tabela 5.4 apresenta o arranjo planejado para a configuração dos LVDT's utilizados na prova de carga, que pode ser melhor visualizado nas figuras 5.39 e 5.40.

Tabela 5.4 – Posição dos medidores de deslocamento

| ARRANJO DOS MEDIDORES DE DESLOCAMENTO - LVDT's |            |          |
|--|------------|----------|
| LVDT - 1                                       | Horizontal | Traseira |
| LVDT - 2                                       | Horizontal | Traseira |
| LVDT - 3                                       | Horizontal | Frontal  |
| LVDT - 4                                       | Horizontal | Frontal  |
| LVDT - 5                                       | Vertical   | Traseira |
| LVDT - 6                                       | Vertical   | Traseira |
| LVDT - 7                                       | Vertical   | Frontal  |
| LVDT - 8                                       | Vertical   | Frontal  |

Para que os LVDT's pudessem ser utilizados na estaca-torpedo modelo uma base para apoia-los LVDT's foi fabricada.(Figura 5.37)

Na Figura 5.38 é possível observar a base com placas de acrílico acopladas de modo a evitar que os LVDT's tivessem seu movimento bloqueado e pudessem movimentar-se livremente nas direções dos deslocamentos da estaca.



Figura 5.37 – Base para apoio dos medidores de deslocamento (LVDT's)

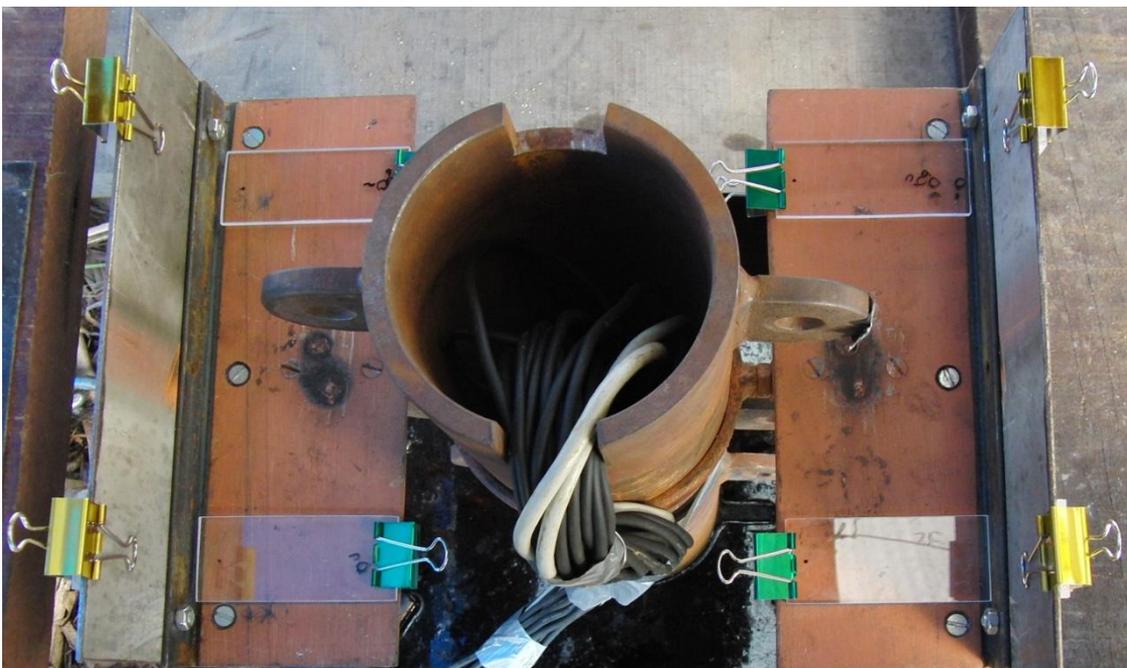


Figura 5.38 – Base de apoio dos LVDT's instalada na estaca

A Figura 5.39 mostra a disposição dos LVDT's durante a realização da prova de carga, sendo os LVDT's 1, 2, 3 e 4 medidores de deslocamentos horizontais enquanto que os LVDT's 5, 6, 7 e 8 são responsáveis pela medição dos deslocamentos verticais. Ressalta-se que "PARTE FRONTAL" indica a parte da estrutura onde é instalado o macaco hidráulico responsável pela aplicação da carga, consequentemente o deslocamento horizontal da estaca se dá no sentido da Parte Frontal.

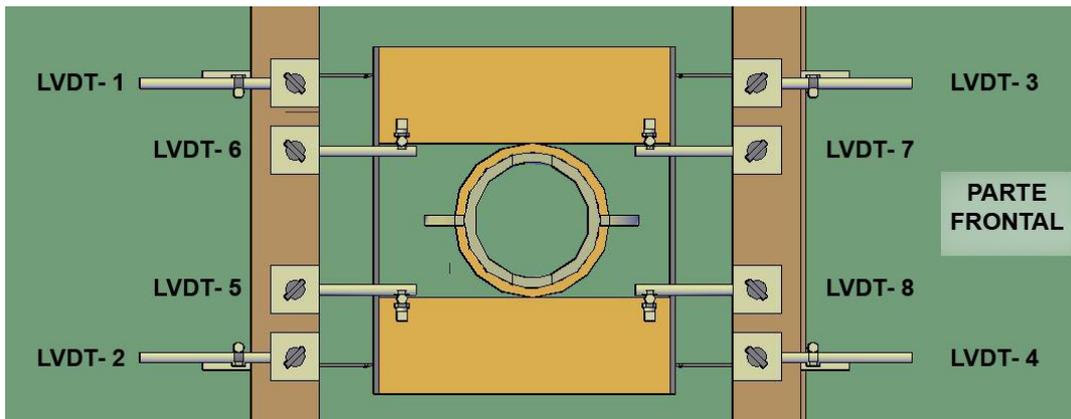


Figura 5.39 – Disposição dos medidores de deslocamento (LVDT's)

Na Figura 5.40 é apresentada a maneira como foram instalados os LVDT's para medição dos deslocamentos horizontal e vertical da estaca.

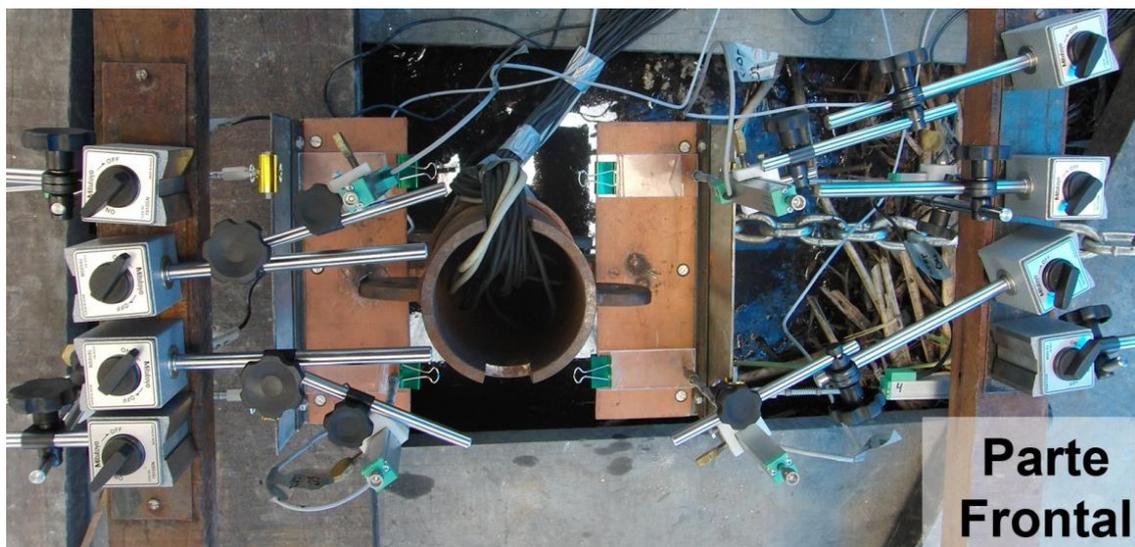


Figura 5.40 – Vista superior do posicionamento dos LVDT's para a prova de carga

Na Figura 5.41 é apresentada a maneira como foram instalados os LVDT's novamente, porém com elipses identificando detalhes que serão apresentados posteriormente.

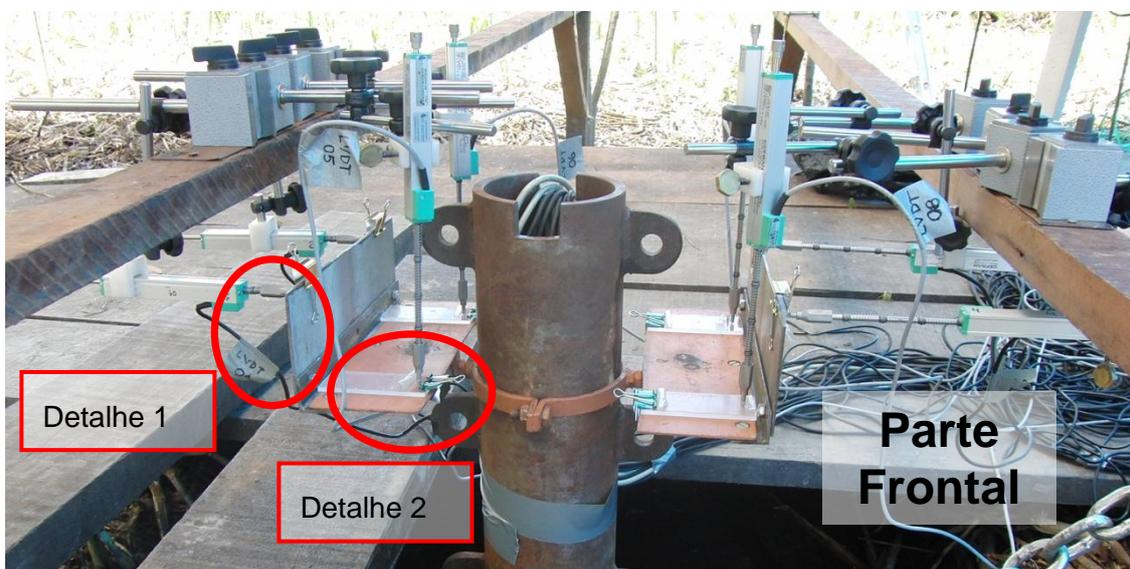


Figura 5.41 – Medidores de deslocamento (LVDT's)

A seguir, nas figuras 5.42 e 5.43 são apresentados alguns detalhes do posicionamento dos medidores de deslocamentos LVDT's, sendo os detalhes 1 e 2 referentes aos medidores de deslocamentos horizontais e verticais respectivamente.

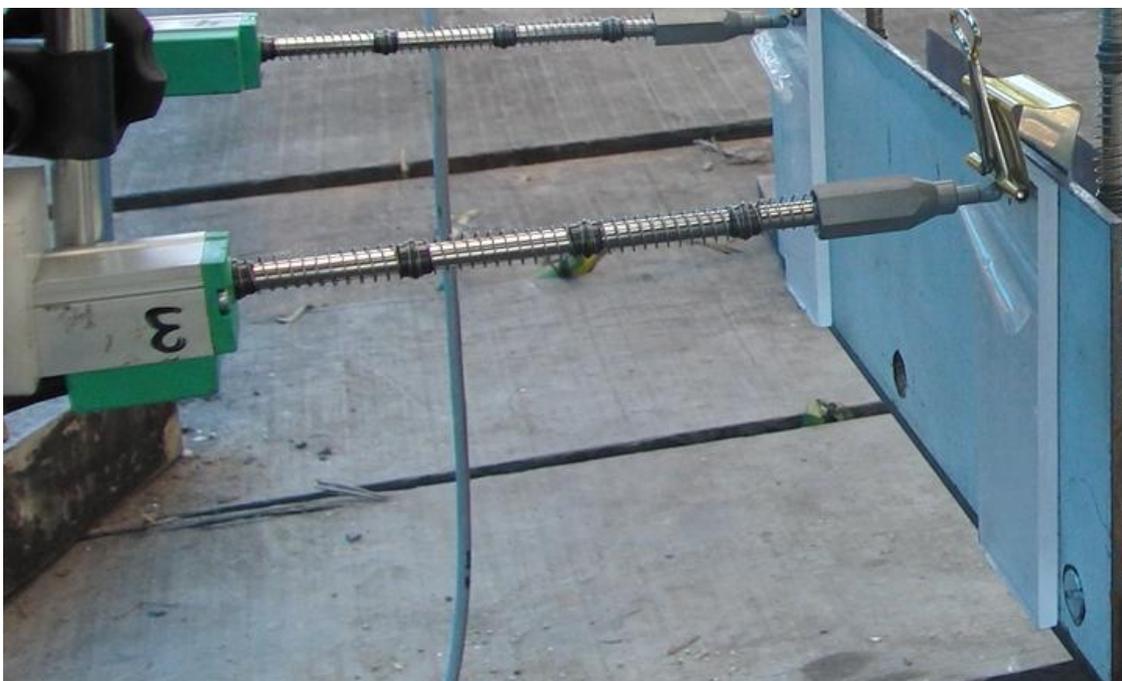


Figura 5.42 – Detalhe da ponta de um LVDT de medição do deslocamento horizontal, apoiado na base acrílica



Figura 5.43 – Detalhe da ponta de um LVDT de medição do deslocamento vertical, apoiado na base acrílica

Na Figura 5.44 tem-se uma vista geral de todos os LVDT's já preparados para o início da prova de carga.



Figura 5.44 – Posicionamento dos LVDT's durante a prova de carga

### 5.7.2 Célula de Carga

Para a instalação da célula de carga no sistema de cravação uma base de aço foi acoplada à estrutura com sua parte superior inclinada a  $45^\circ$  (Figura 5.45), deste modo a célula de carga pôde ser instalada entre a base e o macaco hidráulico, medindo os esforços de tração aplicados por este.



Figura 5.45 – Base de apoio do macaco utilizado na prova de carga

Na Figura 5.46 é apresentada a célula de carga na posição utilizada durante a prova de carga a tração inclinada.

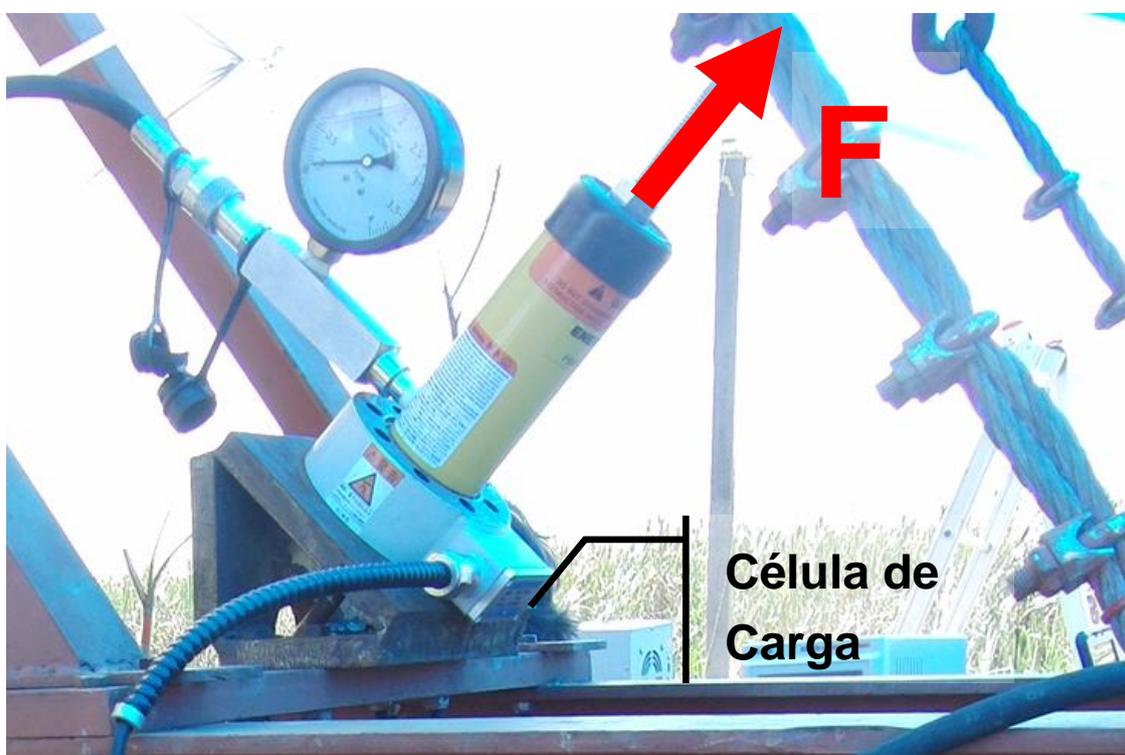


Figura 5.46 – Detalhe da célula de carga posicionada no sistema de cravação

## 6 Apresentação dos Resultados

### 6.1 Previsão pelo Método de MEYERHOF (1973)

A partir do que foi exposto no item 2.2 do presente trabalho, foi aplicado o método de MEYERHOF (1973) para estimativa da carga última a 45° aplicada na estaca-torpedo modelo com 2,15 metros de profundidade enterrada, possibilitando assim que fosse feita posteriormente uma análise de previsão versus desempenho.

Para aplicação do método de MEYERHOF (1973) na estaca-torpedo modelo, foram necessários, além dos parâmetros geotécnicos do solo em questão, apresentados no item 3, algumas considerações quanto à definição das larguras equivalentes que seriam utilizadas, devido à geometria não convencional da estaca-torpedo modelo.

Para o caso de argilas saturadas tem-se  $\phi = 0$ . Isto leva a um valor de  $K'_b = 0$ , valor obtido através dos ábacos representados nas figuras 2.4 e 2.5 do item 2.2 do presente trabalho.

Para o coeficiente  $K'_c$  tem-se os valores de  $K'_c = \pi$ , para solicitações verticais, e  $K'_c = 1$ , para estacas curtas solicitadas horizontalmente. Para o carregamento estudado, carga a 45°, foi utilizada a média dos valores de  $K'_c$ , ou seja,  $\frac{1+\pi}{2} \cong 2,07$ , considerando que os valores de  $K'_c$  variam da mesma maneira que  $K'_b$ , ou seja, de forma aproximadamente linear.

De posse destes valores, foi então aplicado o método fazendo-se diferentes hipóteses quanto à largura equivalente da estaca-torpedo modelo.

I. Diâmetro do fuste da estaca (limite inferior)

Na primeira largura equivalente proposta a estaca-torpedo modelo foi analisada como um cilindro de diâmetro igual ao diâmetro do fuste da estaca, desconsiderando-se a presença das aletas, como pode ser observado na Figura 6.1.

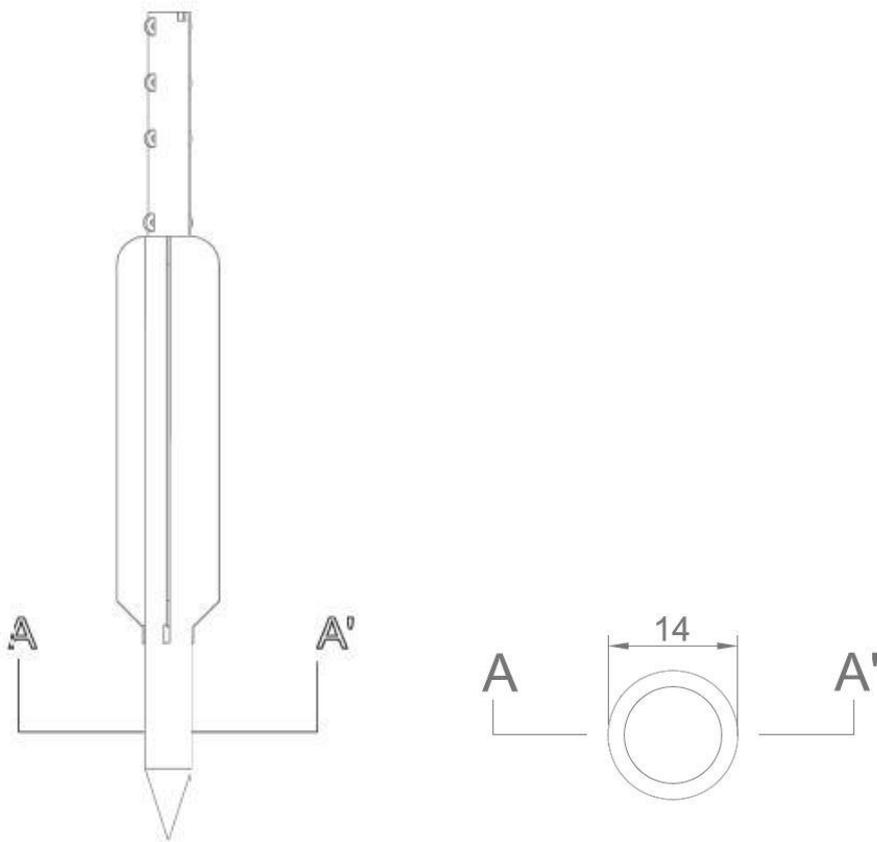


Figura 6.1 – Diâmetro do fuste da estaca torpedo modelo (cotas em cm)

Sendo o diâmetro do fuste = largura equivalente = 14 cm

II. Diâmetro = lado do menor quadrado que envolve a seção da estaca com as aletas

A partir do critério de ruptura apresentado no item 2.3, foi considerado também a utilização da largura equivalente encontrada a partir do lado do menor quadrado que circunscreve a estaca-torpedo modelo numa seção com a presença das aletas, que pode ser melhor entendido a partir da Figura 6.2

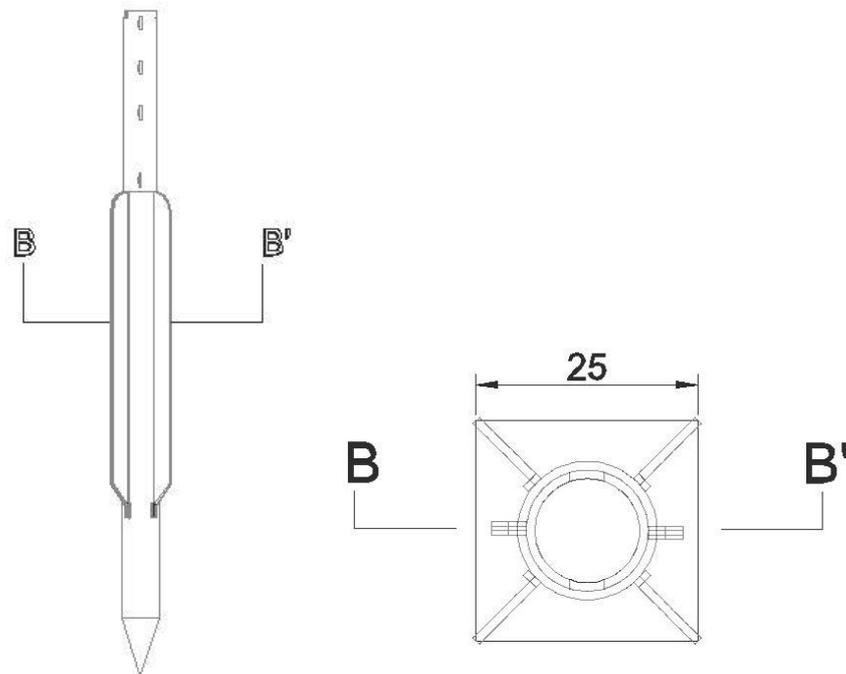


Figura 6.2 Seção da estaca-torpedo modelo inscrita num quadrado de lado L (cotas em cm)

Sendo o lado do quadrado = a largura equivalente = 25 cm

III. Diâmetro equivalente, através do cálculo do diâmetro de um cilindro hipotético que apresente a mesma área de superfície da estaca-torpedo modelo.

Para o cálculo da área equivalente, foi primeiramente calculada a área da superfície enterrada da estaca-torpedo modelo, e então calculado o diâmetro equivalente que será = largura equivalente considerada para aplicação do método de MEYERHOF (1973). A largura equivalente é apresentada na Figura 6.3. Os cálculos utilizados para encontrar a largura adotada encontram-se no Anexo-A do presente trabalho.

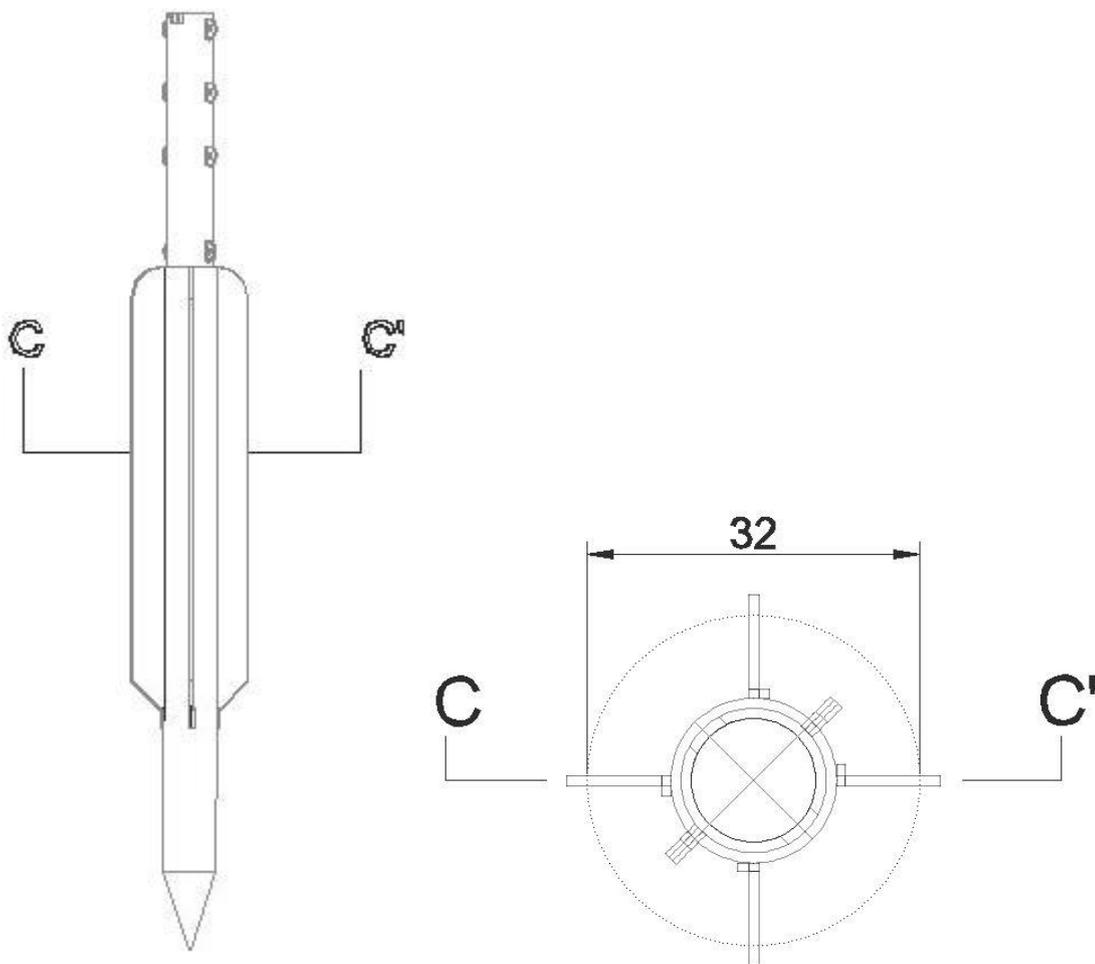


Figura 6.3 – Seção da estaca-torpedo modelo com a marcação do diâmetro equivalente (cotas em cm)

Sendo o diâmetro equivalente = largura equivalente = 32 cm

IV. Diâmetro do círculo que circunscribe a seção da estaca com as aletas.

A última largura equivalente adotada para utilização no método de MEYERHOF (1973) foi escolhida a partir da consideração de que a estaca torpedo modelo se comporta como um cilindro de diâmetro igual ao do círculo que circunscribe a seção da estaca-torpedo modelo com as aletas. Na Figura 6.4 é apresentada a largura equivalente encontrada através dessa última abordagem proposta.

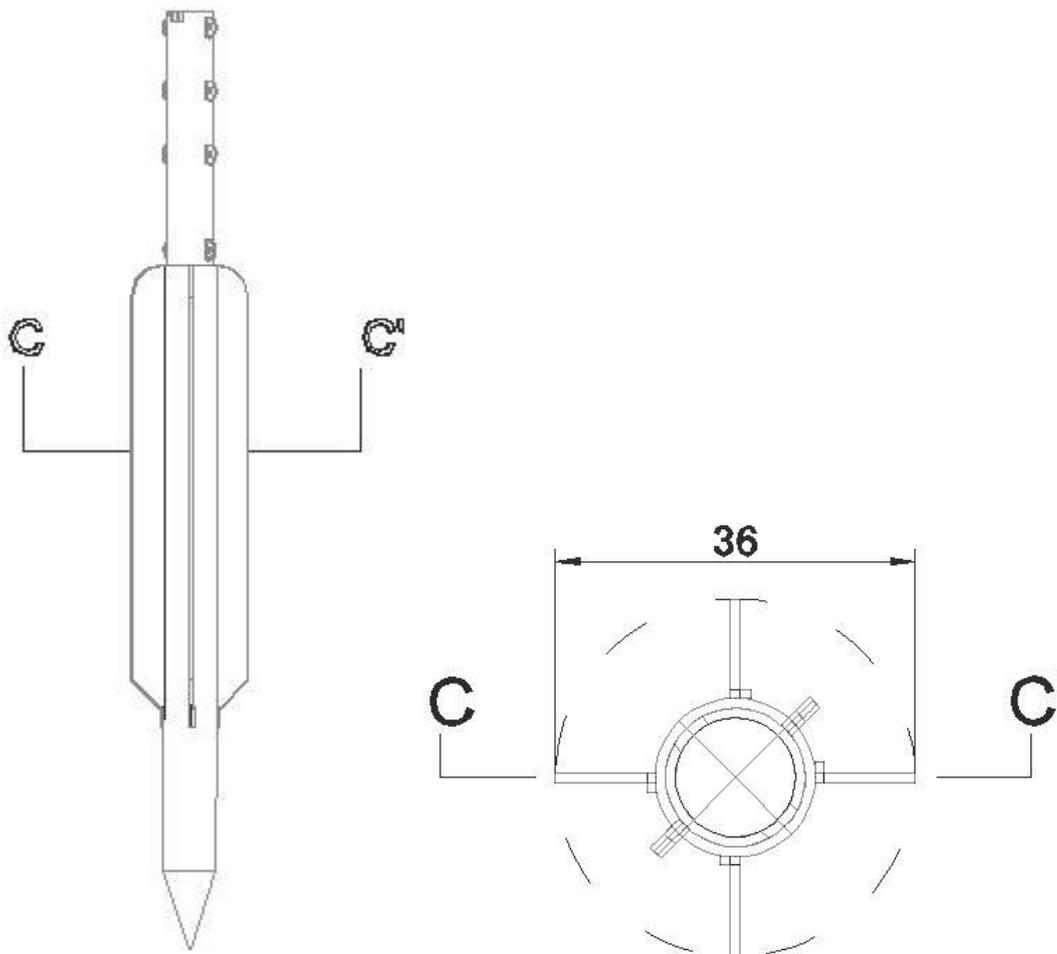


Figura 6.4 – Vista da seção da estaca-torpedo modelo circunscrita (cotas em cm)

Dados necessários para aplicação do Método de MEYERHOF (1973):

- Prova de carga a tração inclinada a  $45^\circ$   
 $\alpha = 45^\circ$
- Peso da estaca:  
1,60 kN.
- Peso da estaca considerando a parcela da estaca submersa (2,41 m):

$$W = 1,45 \text{ kN.}$$

- Resistência não drenada ( $S_u$ ) obtida a partir dos seguintes ensaios:

$$\text{DSS} - 4,5 \text{ kPa;}$$

$$\text{VANE} - 8,0 \text{ kPa.}$$

Foi considerado um perfil de  $S_u$  constante com a profundidade.

- Profundidade enterrada

$$D = 2,15 \text{ metros}$$

- Coeficiente do método  $K'_c$

$$K'_c = 2,07$$

- Valores de B utilizados (largura equivalente)

$$B_1 = 0,14 \text{ m}$$

$$B_2 = 0,25 \text{ m}$$

$$B_3 = 0,32 \text{ m}$$

$$B_4 = 0,36 \text{ m}$$

- Equação proposta por MEYERHOF(1973).

$$Q_u = \left( S_u \times K'_c \times D + \gamma \times D^2 \times K'_b \times \frac{1}{2} \right) \times B + W \cos(\alpha)$$

Como visto no item 2.2 o parâmetro  $K'_b = 0$  para argila saturada o que reduz a equação a:

$$Q_u = (S_u \times K'_c \times D) \times B + W \cos(\alpha)$$

Os valores de  $Q_u$  para os valores de  $S_u$  considerados e calculados para cada diâmetro abordado são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 6.1 – Valores, das cargas últimas, obtidos através da aplicação do método de MEYERHOF (1973).

| $\alpha=45$      | <b>D = 2,15 m</b> |                  | e $K'c = 2,07$       |     | kN |
|------------------|-------------------|------------------|----------------------|-----|----|
| <b>Inclinada</b> | <b>Su= 4,5</b>    | <b>B1 = 0,14</b> | $\rightarrow$ Qu 1 = | 3,8 |    |
|                  | <b>Su= 4,5</b>    | <b>B2 = 0,25</b> | $\rightarrow$ Qu 2 = | 5,5 |    |
|                  | <b>Su= 4,5</b>    | <b>B3 = 0,32</b> | $\rightarrow$ Qu 3 = | 4,8 |    |
|                  | <b>Su= 4,5</b>    | <b>B4 = 0,36</b> | $\rightarrow$ Qu 4 = | 5,8 |    |
|                  | <b>Su= 8,0</b>    | <b>B1 = 0,14</b> | $\rightarrow$ Qu 5 = | 6,0 |    |
|                  | <b>Su= 8,0</b>    | <b>B2 = 0,25</b> | $\rightarrow$ Qu 6 = | 8,9 |    |
|                  | <b>Su= 8,0</b>    | <b>B3 = 0,32</b> | $\rightarrow$ Qu 7 = | 7,8 |    |
|                  | <b>Su= 8,0</b>    | <b>B4 = 0,36</b> | $\rightarrow$ Qu 8 = | 9,5 |    |

## 6.2 Desempenho (prova de carga)

A partir dos dados obtidos na prova de carga foram traçados diversos gráficos que foram subdivididos em duas partes do trabalho, na primeira, apresentação dos resultados serão mostrados os gráficos deslocamento versus tempo e carga versus tempo, na segunda parte, análise dos resultados, serão apresentados os gráficos trabalhados que permitiram tirar conclusões sobre o que foi encontrado a partir da prova de carga realizada.

Na Figura 6.5 é apresentado o esquema da estaca-torpedo modelo submetida a tração inclinada com as indicações da célula de carga, assim como a direção e sentido do carregamento aplicado.

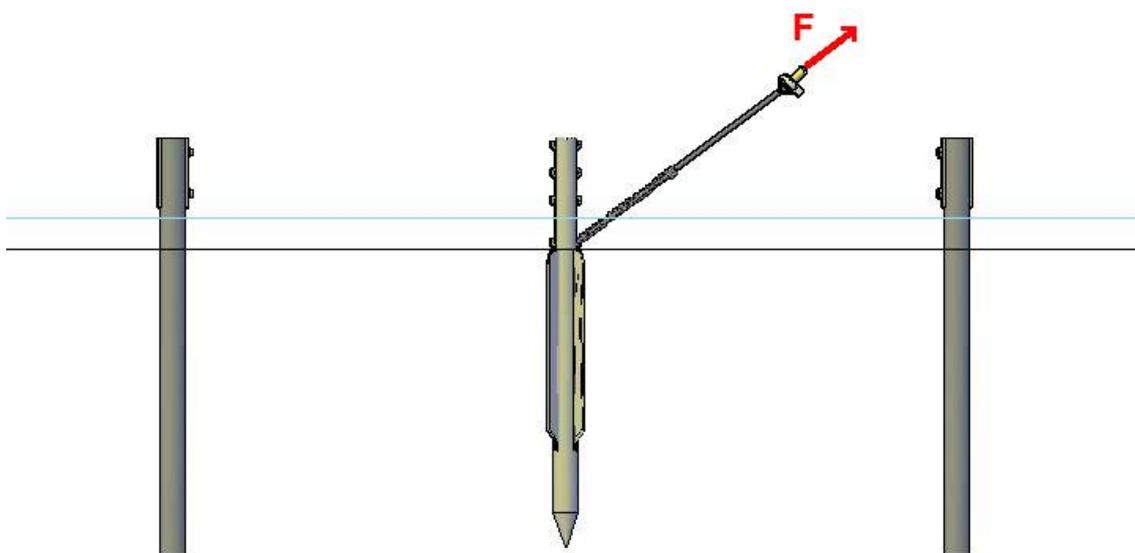


Figura 6.5 – A Estaca-torpedo modelo submetida a tração inclinada

Para um melhor entendimento dos gráficos apresentado a seguir é apresentada novamente a Figura 5.39 com a disposição dos LVDT's durante a prova de carga a tração inclinada, sendo os LVDT's de número 1 a 4 medidores de deslocamentos horizontais, enquanto os LVDT's de 5 a 8 adquirem dados referentes aos deslocamentos verticais da estaca-torpedo modelo.

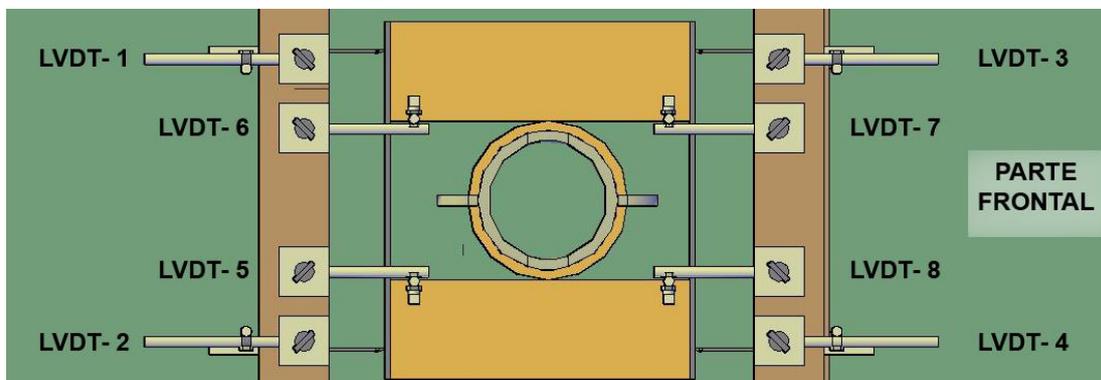


Figura 5.39 – Arranjo dos LVDT's durante a prova de carga

### 6.2.1 Deslocamento Horizontal versus Tempo

Na Figura 6.8 são apresentados os deslocamentos horizontais ao longo do tempo, da estaca-torpedo modelo medidos pelos LVDT's de 1 a 4.

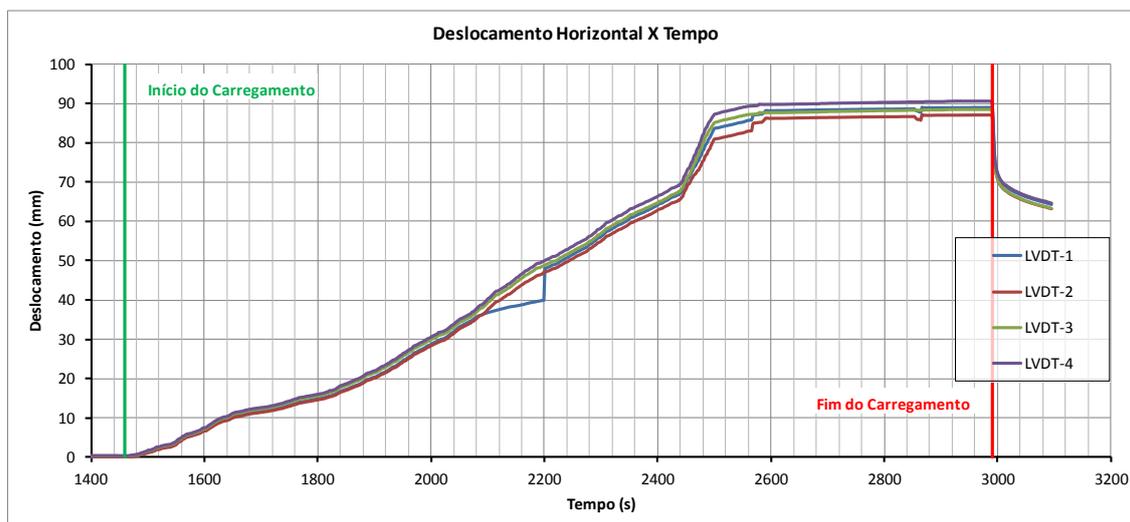


Figura 6.8 – Deslocamentos horizontais ao longo do tempo

Na Figura 6.9 é apresentado o gráfico dos deslocamentos horizontais medidos pelos LVDT's 1 e 2 além da média entre os valores medidos por estes.

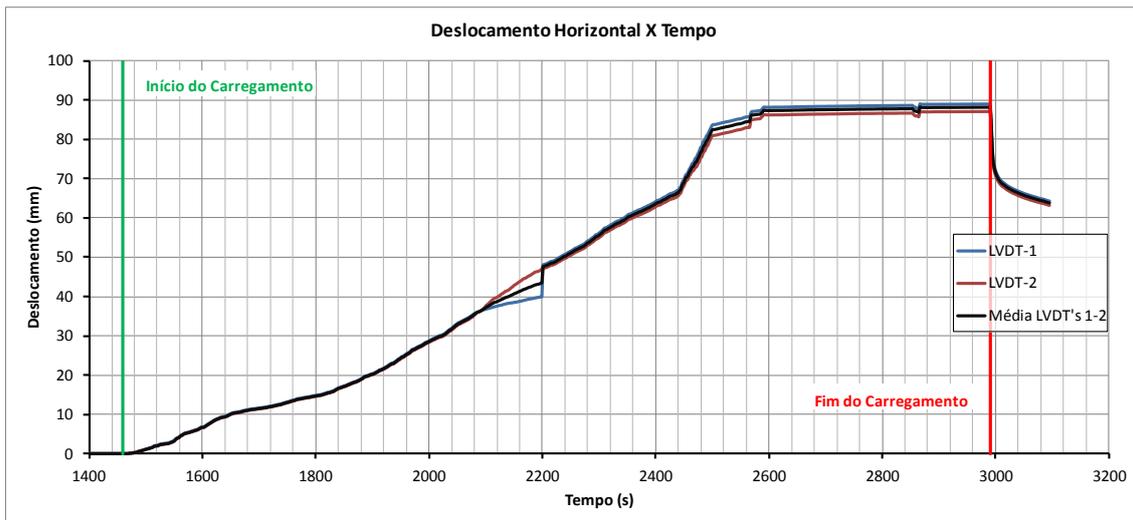


Figura 6.9 – Deslocamento dos LVDT's 1 e 2 além da média entre eles

Na Figura 6.10 é apresentado o gráfico dos deslocamentos horizontais medidos pelos LVDT's 3 e 4 além da média entre os valores medidos por estes.

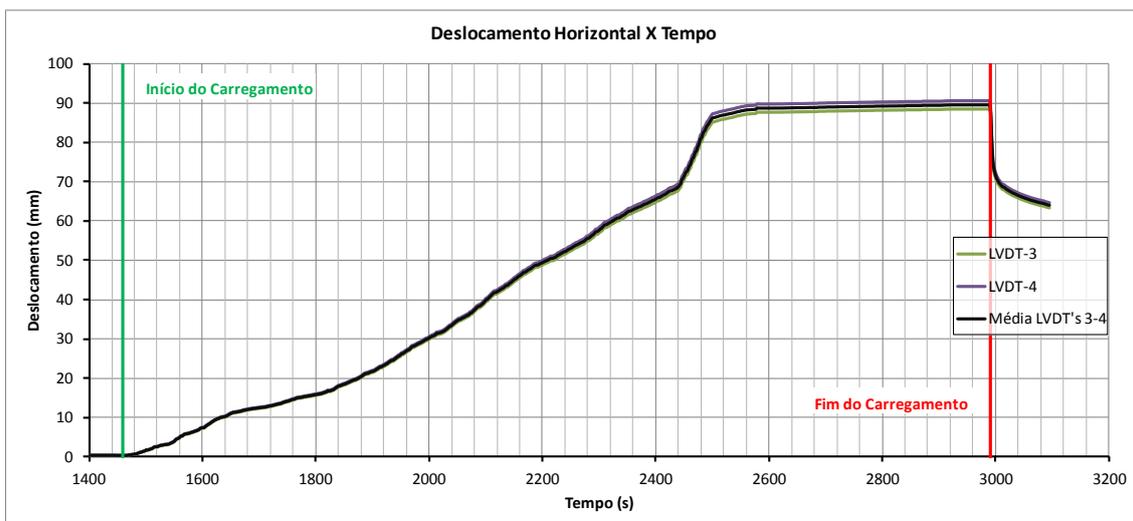


Figura 6.10 – Deslocamento dos LVDT's 3 e 4 além da média entre eles

## 6.2.2 Carga Vertical Versus Tempo

Na Figura 6.11 é apresentado o gráfico dos deslocamentos verticais medidos pelos LVDT's 5 a 8 ao longo do tempo.

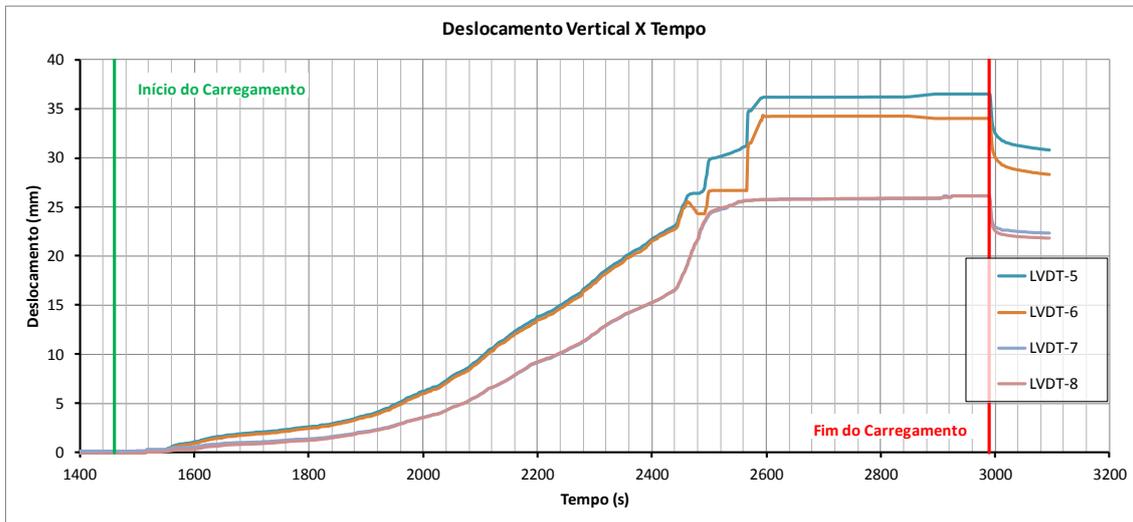


Figura 6.11 – Deslocamento Vertical dos LVDT's 5 a 8

Na Figura 6.12 é apresentado o gráfico dos deslocamentos verticais medidos pelos LVDT's 5 e 6 além da média entre os valores medidos por estes.

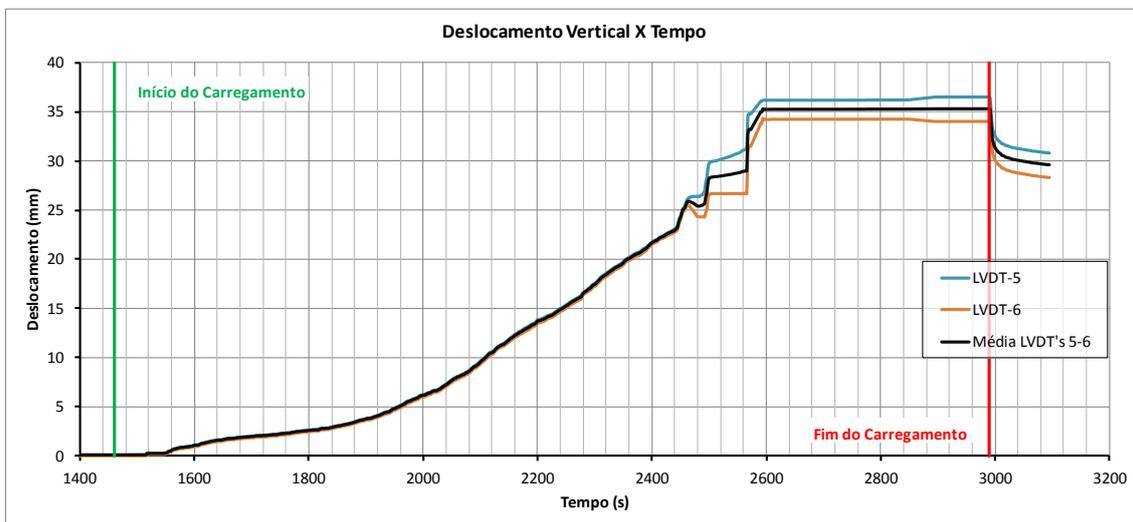


Figura 6.12 – Deslocamento dos LVDT's 5 e 6 além da média entre eles

Na Figura 6.13 é apresentado o gráfico dos deslocamentos verticais medidos pelos LVDT's 7 e 8 além da média entre os valores medidos por estes.

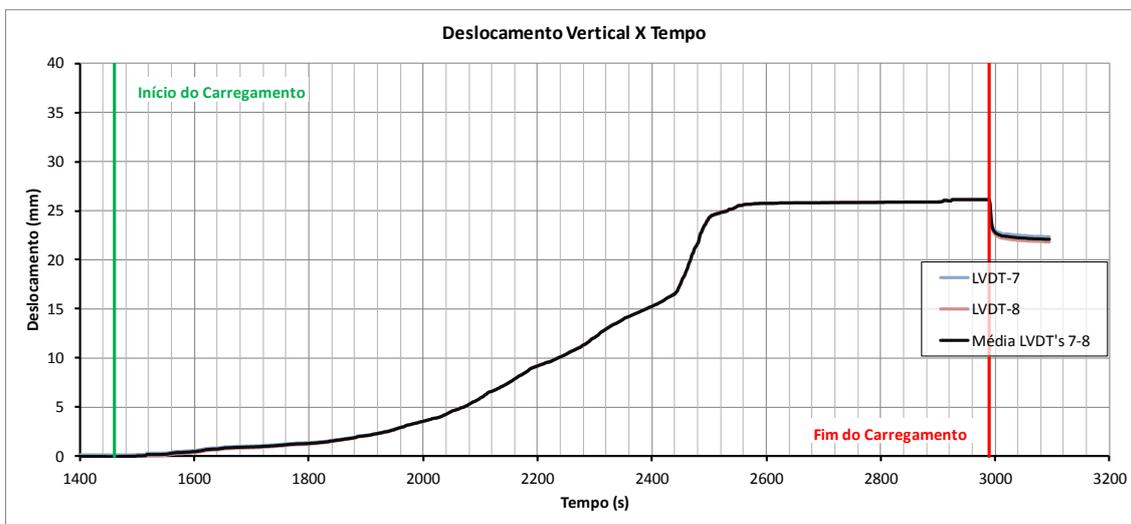


Figura 6.13 – Deslocamento dos LVDT's 7 e 8 além da média entre eles

### 6.2.3 Carga versus Tempo

Na Figura 6.14 é apresentado o gráfico carga (a 45°) versus tempo, que plota os valores medidos pela célula de carga versus tempo.

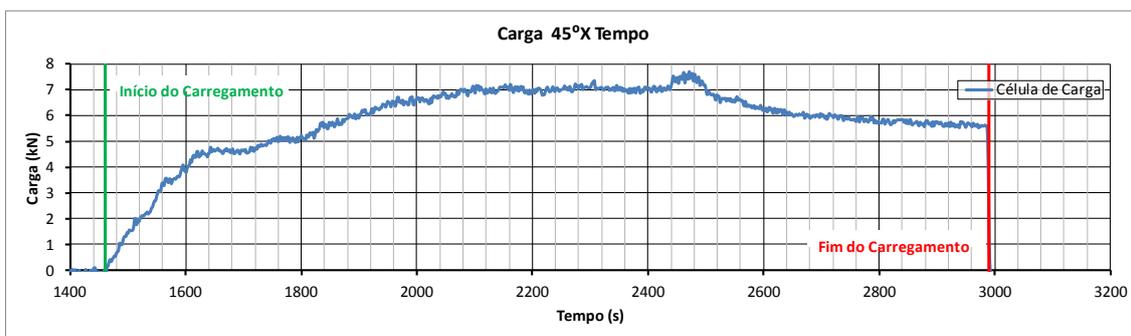


Figura 6.14 – Carregamento em kN versus tempo em segundos

## **7 Análise Conjunta dos Resultados**

### **7.1 Composição dos deslocamentos**

A seguir são apresentadas quatro figuras representando a maneira escolhida para se tratar os deslocamentos da estaca em termos de média, que representa o deslocamento de um ponto na linha de centro da estaca-torpedo modelo na altura em que foram medidos os deslocamentos.

#### **7.1.1 Composição dos Deslocamentos Horizontais**

Para possibilitar a visualização do modo como a estaca torpedo se deslocou, no plano horizontal, foram marcados os pontos de medição inicial de cada um dos LVDT's, de 1 a 4. Foram traçadas duas linhas verdes, que se interceptam no ponto que representa a posição do centro da estaca na altura de medição dos deslocamentos, de modo a ilustrar o posicionamento inicial deste ponto.

Em seguida foram marcados os deslocamentos medidos por cada um dos LVDT's ao final da aplicação do carregamento. Foram traçadas retas vermelhas que se interceptam no ponto que representa o deslocamento do centro da estaca na altura de medição dos deslocamentos. Este procedimento está apresentado nas figuras 7.1 e 7.2

## Compatibilidade de Deslocamentos Horizontais

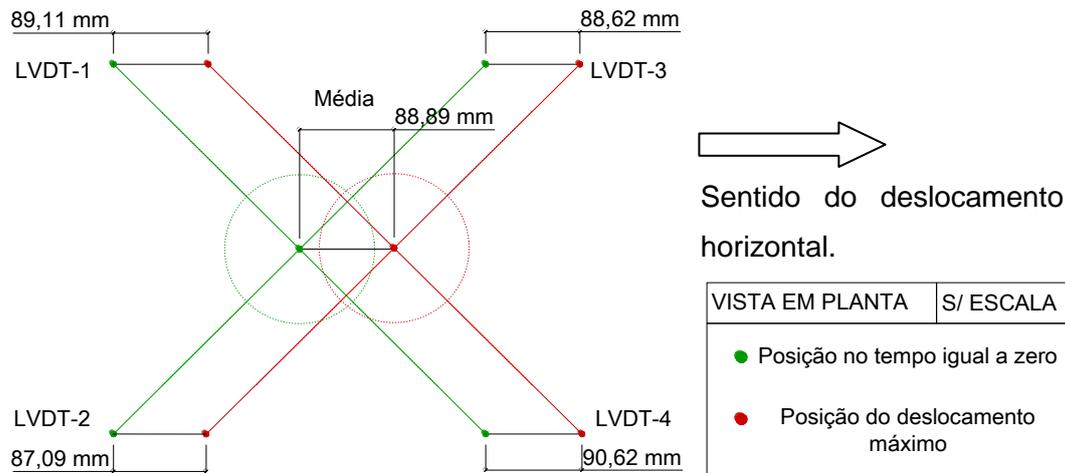


Figura 7.1 – Vista 1 – compatibilidade de deslocamentos horizontais

## Compatibilidade de Deslocamentos Horizontais

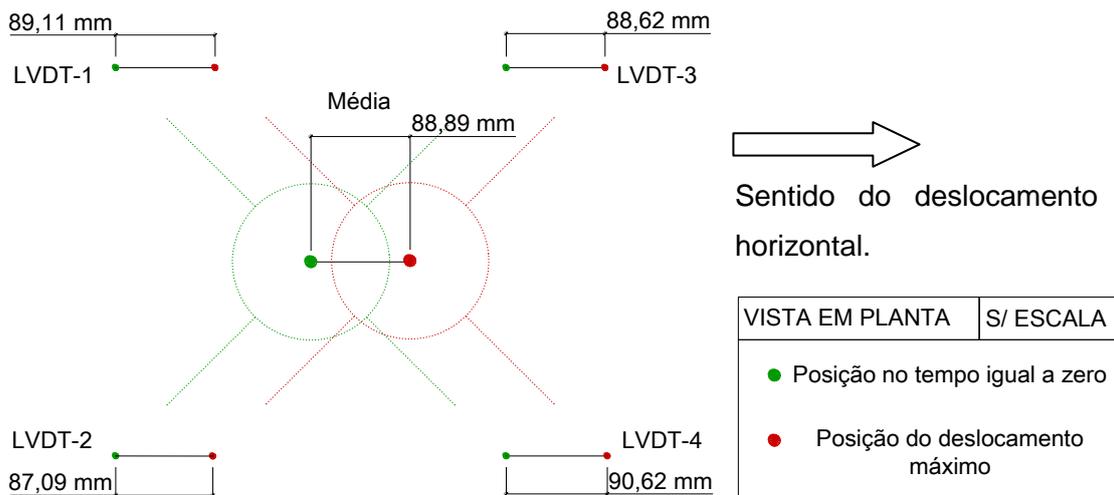


Figura 7.2 – Vista 2 – compatibilidade de deslocamentos horizontais sem as linhas que definem o centro da estaca

### 7.1.2 Composição dos Deslocamentos Verticais

Seguindo o mesmo raciocínio explicado no item 7.1.1 foram então traçadas as figuras 7.3 e 7.4 apresentando os deslocamentos encontrados para os LVDT's, 5 a 8, medidores de deslocamentos verticais.

# Compatibilidade de Deslocamentos Verticais

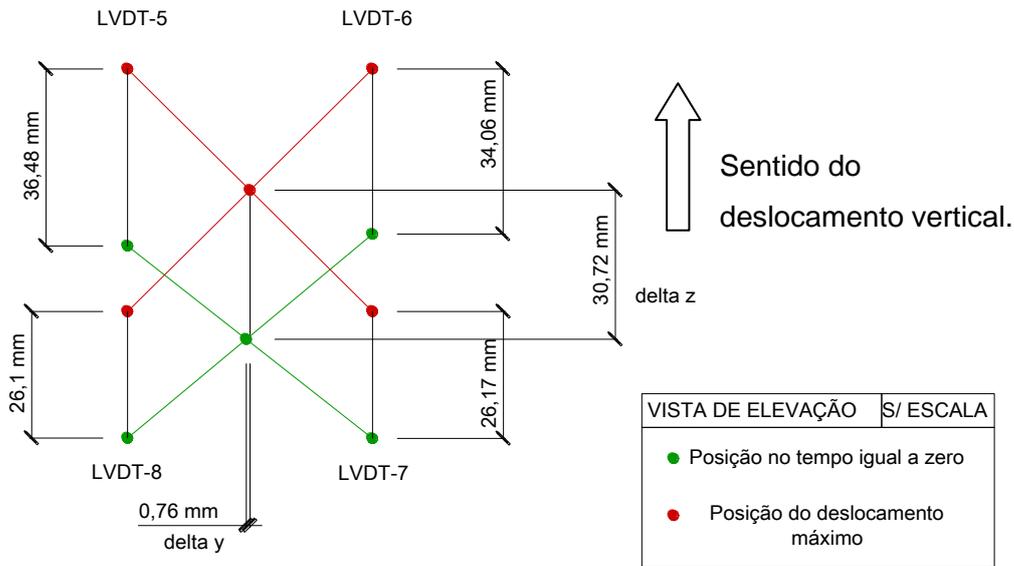


Figura 7.3 – Vista 1 – compatibilidade de deslocamentos verticais

# Compatibilidade de Deslocamentos Verticais

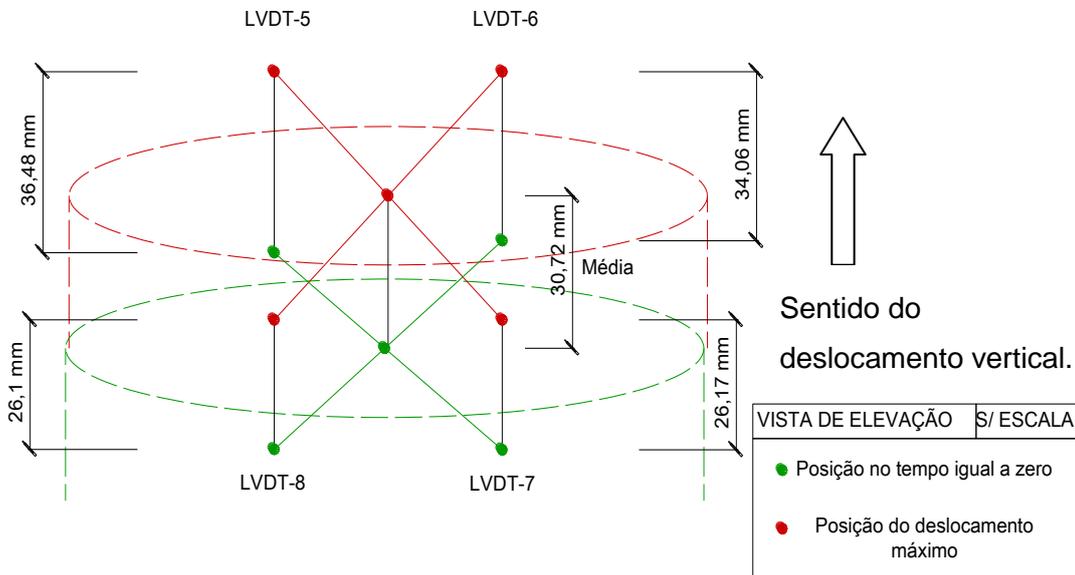


Figura 7.4 – Vista 2 – compatibilidade de deslocamentos verticais

A partir da análise das médias foi possível verificar que mesmo para os deslocamentos máximos da estaca, deslocamentos estes apresentados nas figuras anteriores, o valor da média aproximava-se muito do deslocamento no centro da

estaca. Tomando este fato como premissa foi possível fazer algumas análises em relação as médias calculadas, podendo assim estimar uma componente dos deslocamentos para o mesmo plano de aplicação do carregamento, plano 45°.

## 7.2 Deslocamento Horizontal versus Tempo

A seguir, a Figura 7.5 mostra o gráfico dos deslocamentos horizontais, além da média entre os valores dos quatro LVDT's de 1 a 4 ao longo do tempo. Este valor da média foi realizado com base no conceito visto anteriormente sobre a compatibilidade dos deslocamentos.

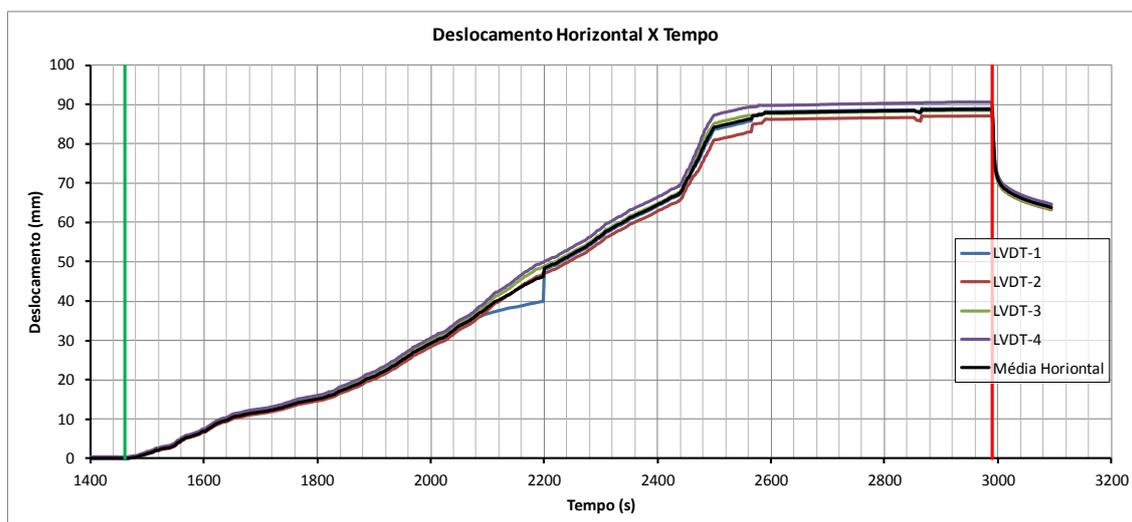


Figura 7.5 – Deslocamento horizontal ao longo do tempo

Na Figura 7.5 observa-se que os quatro LVDT's apresentam curvas praticamente coincidentes a partir do início da aplicação do carregamento até o instante de 1640 segundos, que equivale a um deslocamento de aproximadamente de 10 mm.

De 1640 segundos em diante estas curvas começam a se distanciar. Observa-se que as curvas dos LVDT's 1 e 2 continuam praticamente coincidentes, enquanto as dos LVDT's 3 e 4 se distanciam das curvas dos LVDT's 1 e 2 mas também se mantêm próximas.

Este fato é explicado por uma pequena rotação ocorrida com a estaca-torpedo modelo. Quando o deslocamento alcança um valor próximo a 30 mm as curvas passam a se distanciar mais ainda.

No instante de 2080 segundos, ou seja, quando o deslocamento é da ordem de 36 mm, os valores medidos pelo LVDT 1 apresentam alguma incoerência. Este comportamento anômalo pode ser atribuído a algum tipo de problema com o instrumento, por exemplo, o travamento da haste do LVDT. Ressalta-se, porém, que a partir do instante de 2200 segundos o comportamento do LVDT 1 volta ao normal seguindo praticamente a mesma tendência anterior.

Logo após o instante de 2500 segundos os quatro LVDT's têm valores nitidamente distintos. A maior diferença entre seus valores chega a ser de 6 mm. O valor máximo de deslocamento horizontal é da ordem de 90 mm.

É importante observar que ao final do carregamento da prova de carga, perto do instante de 3000 segundos os valores dos deslocamentos caíram bruscamente até cerca de 70 mm, após inicia-se um movimento de queda, mas com velocidade inferior, chegando a cerca de 64 mm aos 3090 segundos quando as medições foram interrompidas.

Ao analisar-se a curva da média dos deslocamentos horizontais (curva preta) observa-se que esta média acompanha perfeitamente as outras quatro curvas como era esperado. Esta curva facilita a visualização da inclinação dos diferentes trechos da curva deslocamento horizontal versus tempo.

Constata-se que existem cinco inclinações bem definidas ao longo do tempo de realização da prova de carga inclinada (desconsiderando o patamar final).

A primeira delas está compreendida entre o início da aplicação do carregamento até o instante de 1640 segundos, que corresponde a um deslocamento de 10 mm.

A segunda inclinação, um pouco mais abatida, é observada entre 1640 e 1840 segundos, correspondendo uma variação no deslocamento horizontal de 10 mm até 16 mm respectivamente.

A terceira delas, que é a mais duradoura e mais inclinada que as duas primeiras, está compreendida entre o intervalo de 1840 e 2440 segundos, correspondendo uma variação no deslocamento horizontal de 16 mm até 69 mm respectivamente.

A quarta é a mais inclinada de todas e a de menor tempo de duração estando compreendida entre os intervalos de 2440 e 2500 segundos, correspondendo uma variação no deslocamento horizontal de 69 mm até 85 mm respectivamente.

Já a quinta, e última, volta a ser mais abatida e tem curta duração, entre 2500 e 2600 segundos. Logo após este instante a curva entra no patamar final dos deslocamentos e se mantém constante.

### 7.3 Deslocamento Vertical Versus Tempo

A seguir, na Figura 7.8 é apresentado o gráfico dos deslocamentos verticais, além da média entre os valores dos quatro LVDT's de 5 a 8 ao longo do tempo. Este valor da média foi realizado com base no conceito visto anteriormente sobre a compatibilidade dos deslocamentos.

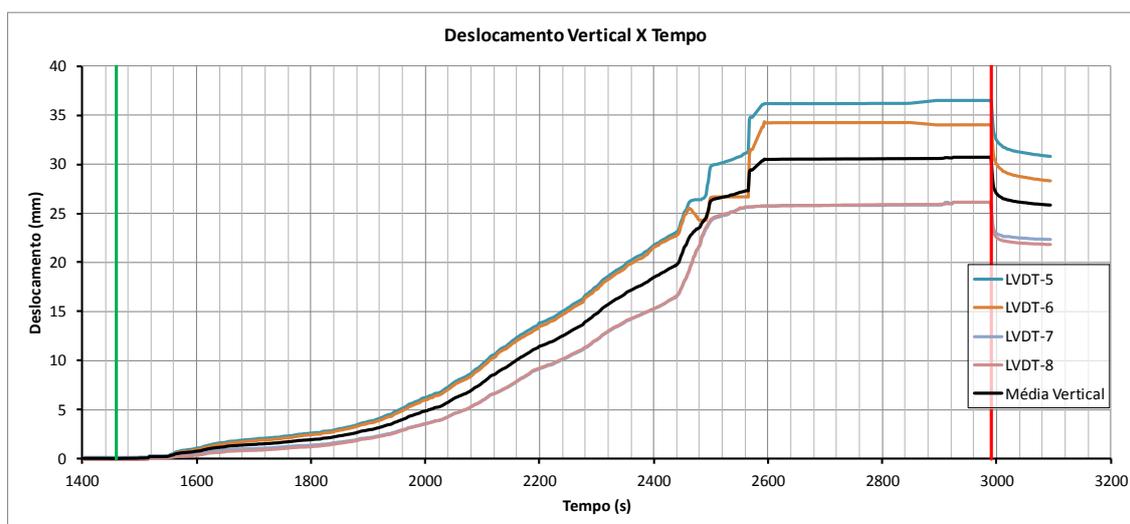


Figura 7.6 – Deslocamento Vertical em mm ao longo do tempo em segundos

Na Figura 7.6 observa-se que os quatro LVDT's possuem os valores medidos praticamente nulos desde o início da aplicação do carregamento até o instante de 1530 segundos. A partir deste instante os valores começam a se distanciar em pares.

Diferentemente dos deslocamentos horizontais, neste caso dos deslocamentos verticais, já era esperado que os pares de medidas dos LVDT's 5 e 6 e os pares de valores dos LVDT's 7 e 8 não caminhassem juntos. Este fato ocorre devido ao movimento de inclinação e ascensão da estaca-torpedo modelo quando submetida ao carregamento de tração inclinada, ou seja, os LVDT's 5 e 6, que estão na parte frontal

da estaca tendem a ter um deslocamento maior que os LVDT's 7 e 8 que estão na parte traseira. Esta diferença é crescente ao longo da prova de carga, chegando a ser da ordem de 8 mm no final da aplicação do carregamento.

Por outro lado observa-se que o par de LVDT's 5 e 6 tiveram valores semelhantes desde o início da aplicação do carregamento até o instante de 2450 segundos. Neste instante algum problema ocorreu com o LVDT 6 e, conseqüentemente, seus valores passaram a não ser mais confiáveis. Este problema também pode ter sido ocasionado por um travamento da haste do LVDT ou algum obstáculo.

A partir do instante 2560 segundos o LVDT 6 volta a ter um comportamento próximo ao esperado, provavelmente devido a alguma defasagem no retorno da haste.

Os LVDT's 7 e 8 também apresentaram um comportamento muito parecido durante toda a realização da prova de carga. Esta semelhança no comportamento entre os pares dos LVDT's demonstra que a estaca-torpedo modelo não tendeu a ter um movimento de rotação expressivo, em torno do próprio eixo, para fins práticos. Os deslocamentos verticais máximos variaram de 26 mm até 36 mm para os pares dos LVDT's 5 e 6 e LVDT's 7 e 8 respectivamente.

Também é importante observar que ao final do carregamento da prova de carga, perto do instante de 3000 segundos os valores dos deslocamentos caíram bruscamente até cerca de 33 mm para os LVDT 5 (já que o valor do LVDT 6 não é mais confiável) e para 23 mm para os LVDT's 7 e 8. Após o movimento de queda é bem sutil mais ainda visível, chegando a cerca de 31 mm para o LVDT 5 e para 22 mm para os LVDT's 7 e 8 com 3090 segundos quando as medidas foram interrompidas.

Outra indicação que também pode ser observada na Figura 7.6 diz respeito à inclinação dos diferentes trechos da curva deslocamento vertical versus tempo. Nesta análise, diferentemente da análise anterior será considerada para visualização da inclinação os pares de curvas distintos entre os LVDT's 5 e 6 e LVDT's 7 e 8, ao invés da curva das médias dos deslocamentos.

Constata-se que existem cinco inclinações bem definidas ao longo do tempo de realização da prova de carga (desconsiderando o patamar final).

A primeira delas está compreendida entre o instante de 1530 segundos até 1960 segundos, que corresponde a um deslocamento de 0 até 3-4 mm, LVDT's 5 e 6 e LVDT's 7 e 8 respectivamente.

A segunda inclinação, um pouco mais inclinada, é observada entre 1960 e 2440 segundos, correspondendo uma variação no deslocamento horizontal de 3-4 mm até 15-25 mm.

A terceira é a mais inclinada de todas e a de menor tempo de duração estando compreendida entre os intervalos de 2440 e 2500 segundos, correspondendo uma variação no deslocamento vertical de 15-25 mm até 25-30 mm.

A quarta delas também tem curta duração e volta a ser mais abatida, tendo sua inclinação compreendida entre a primeira e segunda inclinação citada com valores de deslocamento de 20-25 mm até 24-27 mm.

A quinta inclinação volta a crescer até o instante de 2600 segundos mas não supera a terceira que foi a maior de todas. Logo após este instante a curva entra no patamar final dos deslocamentos e se mantém constante.

#### 7.4 Deslocamento Horizontal e Vertical versus Tempo

Na Figura 7.7 são apresentados os deslocamentos medidos pelos 8 LVDT's ao longo do tempo utilizados durante a prova de carga. Os LVDTs de 1 a 4 medem os deslocamentos horizontais e os LVDTs 5 a 8 os deslocamentos verticais.

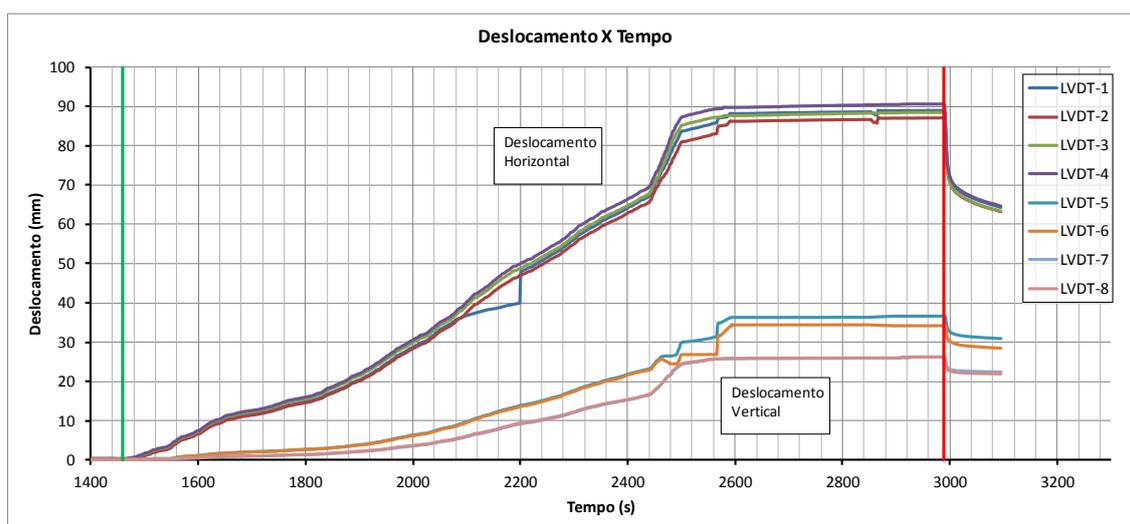


Figura 7.7 – Medidas de deslocamento em milímetros ao longo do tempo em segundos.

Na Figura 7.7 observa-se que, a partir do início da aplicação do carregamento da prova de carga inclinada, ou seja, no instante de aproximadamente 1450 segundos, as curvas dos deslocamentos horizontais (LVDT's 1 a 4) e dos deslocamentos verticais (LVDT's 5 a 8) começam a se distanciar.

A fim de quantificar este fato, pode-se dizer que nos primeiros 400 segundos de prova de carga a diferença foi da ordem de 8 vezes, ou seja, o deslocamento horizontal foi 8 vezes maior que o deslocamento vertical ( $t = 1600$  segundos, deslocamento vertical  $\cong 1$  mm e horizontal  $\cong 8$  mm). À medida que a carga vai aumentando a disparidade entre os deslocamentos vai diminuindo, até que quando atingida a carga máxima, ou seja, no instante de aproximadamente 2200 segundos esta diferença se torna praticamente constante e aproximadamente igual a 3 ( $t = 2400$  segundos, deslocamento vertical  $\cong 20$  mm e horizontal  $\cong 65$  mm).

Ainda nesse contexto, vale ressaltar que no trecho inicial do carregamento, ou seja, nos primeiros 150 segundos ( $t$  entre 1400 e 1550 segundos) o deslocamento vertical é praticamente nulo, enquanto que o deslocamento horizontal tem uma tendência de aumento linear.

## **7.5 Movimento da Estaca**

Na Figura 7.8 é apresentado um gráfico relacionando as médias dos deslocamentos horizontais dos LVDT's 1 a 4, versus, as médias dos deslocamentos verticais dos LVDT's 5 a 8. Este gráfico dá um indício de como a estaca se deslocou ao longo da prova de carga inclinada.

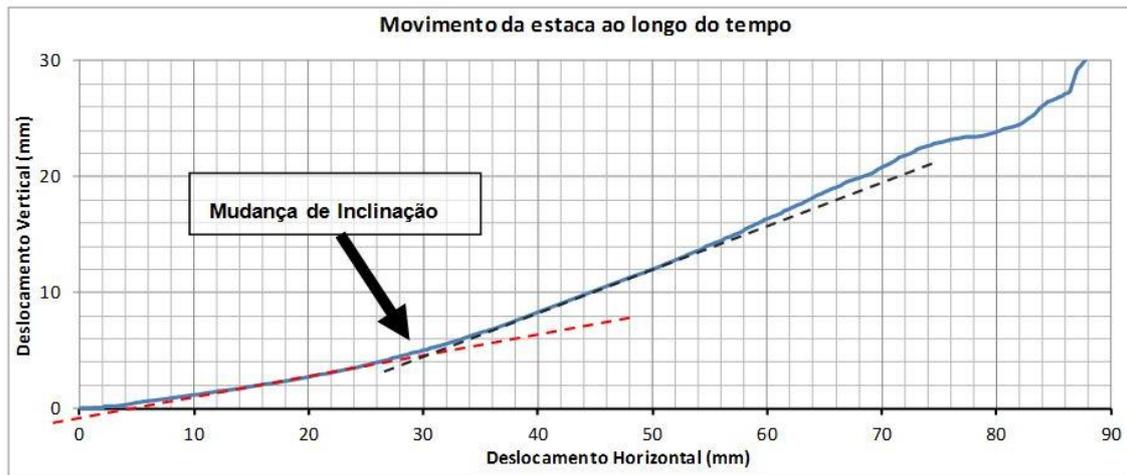


Figura 7.8 – Movimento da estaca ao longo do tempo

Na Figura 7.8 é possível verificar uma mudança no comportamento da curva apresentada quando o deslocamento horizontal é da ordem de 29 mm e o vertical é da ordem de 4 mm. Foram incorporadas duas retas tracejadas, uma vermelha e uma preta, mostrando as duas inclinações diferentes consideradas.

## 7.6 Deslocamento Inclinado versus Tempo

Na Figura 7.9 é apresentado o gráfico do deslocamento no plano inclinado ( $45^\circ$ ) versus tempo, o deslocamento inclinado foi estimado a partir da composição das parcelas vertical e horizontal decompostas para o plano  $45^\circ$ . Embora o deslocamento da estaca-torpedo modelo não seja a  $45^\circ$  para que fosse possível realizar uma análise através do deslocamento inclinado versus o carregamento inclinado este tipo de abordagem foi necessário. De fato, a inclinação da estaca-torpedo modelo foi muito pequena durante a realização da prova de carga, cerca de  $3^\circ$ . Sendo assim, essa pequena diferença será desconsiderada nas análises que se sucedem.

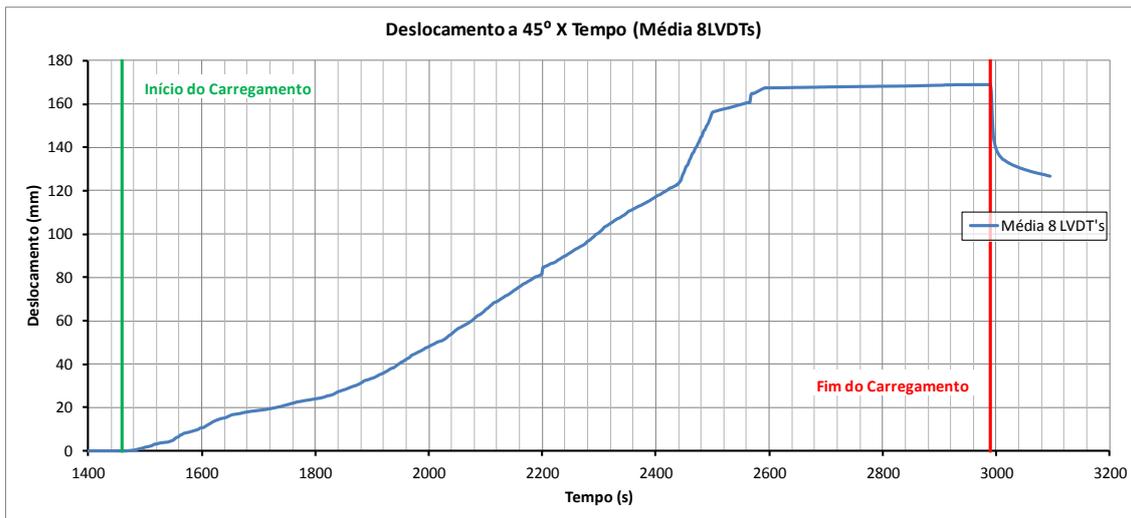


Figura 7.9 – Deslocamento inclinado versus Tempo

Na Figura 7.9 observa-se que existem cinco inclinações bem definidas ao longo do tempo de realização da prova de carga inclinada (desconsiderando o patamar final).

A primeira delas está compreendida entre o início da aplicação do carregamento até o instante de 1640 segundos, que corresponde a um deslocamento de 20 mm.

A segunda inclinação, um pouco mais abatida, é observada entre 1640 e 1840 segundos, correspondendo uma variação no deslocamento de 20 mm até 25 mm respectivamente.

A terceira inclinação, que é a mais duradoura e mais inclinada que as duas primeiras, está compreendida entre o intervalo de 1840 e 2440 segundos, correspondendo uma variação no deslocamento de 25 mm até 122 mm respectivamente.

A quarta é a mais inclinada de todas e a de menor tempo de duração estando compreendida entre os intervalos de 2440 e 2500 segundos, correspondendo uma variação no deslocamento horizontal de 122 mm até 155 mm respectivamente.

Já a quinta, e última, volta a ser mais abatida e tem curta duração, entre 2500 e 2600 segundos. Logo após este instante a curva entra no patamar final dos deslocamentos e se mantém constante com um deslocamento máximo da ordem de 168 mm.

## 7.7 Carga inclinada a 45° X Tempo

A Figura 7.10 apresenta a curva carga a 45° versus tempo. O valor da carga foi obtido através da célula de carga da instrumentação da prova de carga.

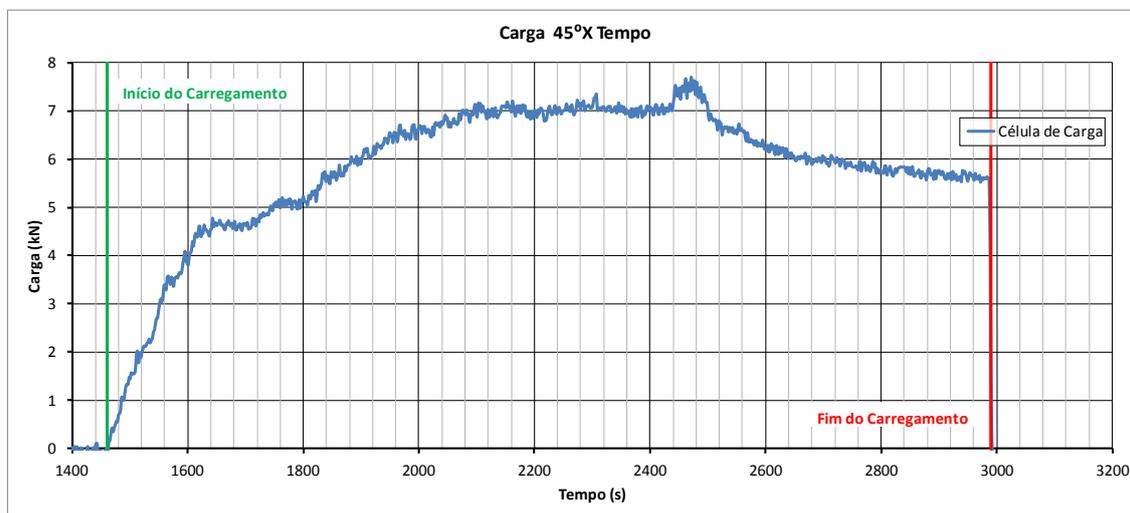


Figura 7.10 – Carga versus Tempo

É possível observar na Figura 7.10 que a curva carga a 45° versus tempo apresenta um patamar bem definido quando o tempo atinge aproximadamente 2100 segundos, sendo o valor da carga de 7,0 kN.

Vale observar que outros dois pequenos patamares se formaram anteriormente. O primeiro deles com uma curta duração entre o intervalo de 1640 e 1710 segundos e o segundo deles entre o intervalo de 1760 e 1810 segundos. A carga em que o primeiro patamar se estabilizou foi de aproximadamente 4,6 kN, enquanto para o segundo patamar foi de 5,1 kN.

Observa-se também que a curva apresenta pontos notáveis em mais dois instantes, 1530 e 1570 segundos. As cargas referentes há estes instantes são 2,0 kN e 3,5 kN respectivamente.

Após o último patamar a curva apresenta uma tendência de formação de um pico entre os instantes 2440 e 2500 segundos, com a carga chegando a 7,5 kN. Depois disso inicia um movimento de queda praticamente linear até cerca de 3000 segundos quando o sistema foi descarregado por completo.

Outra indicação que também pode ser observada na Figura 7.10 diz respeito à inclinação dos diferentes trechos da curva carga 45° versus tempo. Constata-se que existem seis inclinações bem definidas ao longo do tempo de realização da prova de

carga (desconsiderando os patamares). Neste caso existem quatro inclinações com sentido crescente e outras duas com sentido decrescente.

A primeira delas está compreendida entre o início da aplicação do carregamento até o instante de 1640 segundos, que corresponde a uma carga de 4,5 kN.

A segunda inclinação, um pouco mais abatida, é observada entre 1640 e 1710 segundos, correspondendo uma variação na carga de 4,6 kN até 5,7 kN.

A terceira delas que tem praticamente a mesma inclinação que a anterior, está compreendida entre o intervalo de 1810 e 2100 segundos, correspondendo uma variação na carga de 5,1 kN até 7,0 kN. Após o patamar a última inclinação positiva se dá na formação de um pico na curva entre os instantes de 2440 e 2500 segundos, com a carga chegando a 7,5 kN. Depois deste pico inicia-se um movimento de inclinação negativa em dois níveis: o primeiro entre os intervalos de 2500 e 2640 segundos com a carga chegando a cerca de 6 kN e depois até cerca de 3000 segundos quando o sistema foi descarregado por completo com a carga chegando a zero.

## 7.8 Carga a 45° versus Deslocamento a 45°

Na figura 7.11 é apresentado o gráfico, carga 45° versus deslocamento a 45°, este deslocamento foi estimado através da soma das componentes a 45° das médias de deslocamento horizontal e vertical.

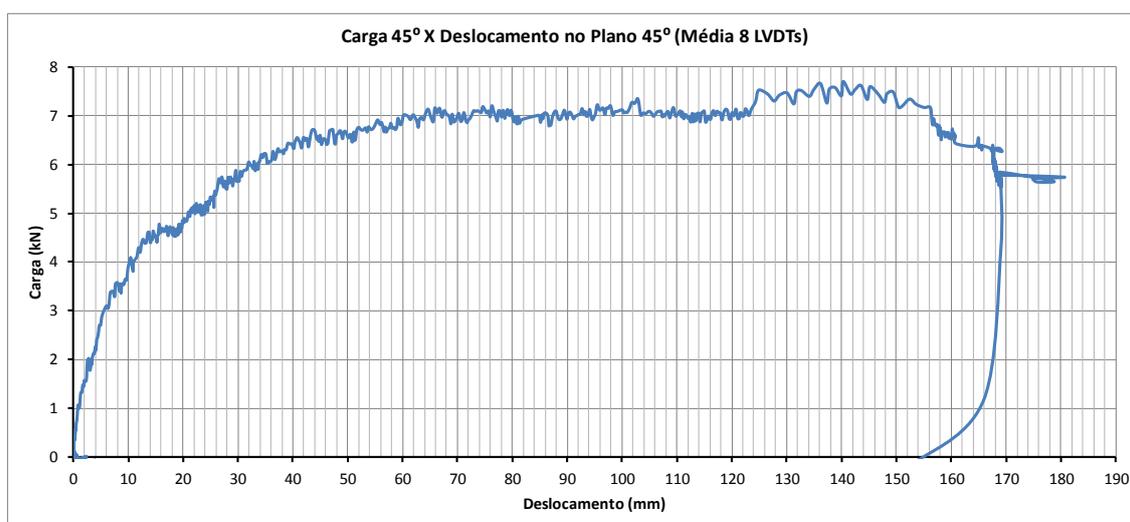


Figura 7.11 – Curva carga versus deslocamento

É possível observar na Figura 7.11 que a curva carga a 45° versus deslocamento a 45° apresenta um patamar bem definido quando a carga atinge cerca de 7 kN. O deslocamento observado para essa carga é da ordem de 60 mm. Vale observar que outros dois pequenos patamares se formaram anteriormente. O primeiro deles com uma curta duração entre os deslocamentos de 13 a 19 mm e o segundo deles entre os deslocamentos de 23 e 26 mm. A carga em que o primeiro patamar se estabilizou foi de aproximadamente 4,6 kN, enquanto para o segundo patamar foi de 5,1 kN.

Observa-se também que a curva apresenta pontos notáveis em mais dois deslocamentos, 4 e 9 mm. As cargas referentes há estes instantes são 2,0 kN e 3,5 kN respectivamente.

Após o último patamar a curva apresenta uma tendência de formação de um pico quando atinge um deslocamento de 120 mm, com a carga chegando a 7,5 kN. Depois disso, quando os deslocamentos atingem 140 mm, inicia um movimento de queda praticamente linear até cerca de 6,2 kN quando o sistema foi descarregado por completo. Vale ressaltar que o deslocamento máximo observado foi de 168 mm.

Ressalta-se, ainda, que no descarregamento a carga cai de 6,2 kN até 2,0 kN instantaneamente, sem haver muita variação nos deslocamentos. Após essa carga de 2,0 kN o sistema tende a ser descarregado até zero e os deslocamentos retornam cerca de 12 mm, ou seja, até 156 mm.

Outra indicação que também pode ser observada na Figura 7.11 diz respeito à inclinação dos diferentes trechos da curva carga 45° versus deslocamento a 45°. Constata-se que existem cinco inclinações bem definidas ao longo da realização da prova de carga (desconsiderando os patamares).

## **7.9 Retroanálise dos Resultados**

Para a retroanálise serão utilizados em conjunto os dados da instrumentação da prova de carga, os parâmetros geotécnicos da argila mole do Sarapuí II, a metodologia de MEYERHOF (1973) e a consideração da largura equivalente.

Conforme mencionado anteriormente a carga de ruptura obtida através da curva carga versus deslocamento é 7 kN. Retroanalizando o método de MEYERHOF foi possível estabelecer larguras equivalentes para os dois parâmetros de resistência não drenada utilizados.

Dados necessários para aplicação do Método de MEYERHOF (1973):

- Prova de carga a tração inclinada a  $45^\circ$   
 $\alpha = 45^\circ$
  - Peso da estaca:  
 $W = 1,60 \text{ kN}$ .
  - Peso da estaca considerando a parcela da estaca submersa (2,15+0,26 = 2,41 m):  
 $W' = 1,45 \text{ kN}$ .
  - Resistência não drenada ( $S_u$ ) obtida a partir dos seguintes ensaios:  
DSS – 4,5 kPa;  
Palheta elétrica – 8,0 kPa.
  - Profundidade enterrada  
 $D = 2,15 \text{ metros}$
  - Coeficiente do método  $K'_c$   
 $K'_c = 2,07$
- Equação proposta por MEYERHOF(1973).

$$[1] Q_u = \left( S_u \times K'_c \times D + \gamma \times D^2 \times K'_b \times \frac{1}{2} \right) \times B + W \cos(\alpha)$$

Como visto no item 2.2 o parâmetro  $K'_b = 0$  para argila saturada o que reduz a equação a:

$$[3] Q_u = (S_u \times K'_c \times D) \times B + W \cos(\alpha)$$

Desta forma temos que:

$$[4] B = \frac{Q_u - W \cos(\alpha)}{(S_u \times K'_c \times D)}$$

Com  $Q_u=7,0$  kN, foram encontrados os seguintes valores para a largura equivalente:

Tabela 7.1 – Larguras equivalentes encontradas através da retroanálise

| $\alpha=45$ | $K'_c=2,07$             |                               |        | m    |
|-------------|-------------------------|-------------------------------|--------|------|
| Inclinada   | $D=2,15m$ $S_u=4,5$ kPa | $\rightarrow Q_{u2} = 7,0$ kN | $B5 =$ | 0,30 |
|             | $D=2,15m$ $S_u=8,0$ kPa | $\rightarrow Q_{u8} = 7,0$ kN | $B6 =$ | 0,17 |

A partir do valor de resistência não drenada obtido através do ensaio de DSS, a largura equivalente calculada foi de 30 cm. Enquanto para o valor de  $S_u$  obtido pelo ensaio de palheta elétrica a largura equivalente é de 17 cm. Estes valores se aproximam respectivamente dos calculados anteriormente através da área lateral efetiva ( $B3=0,32m$ ) e do diâmetro do cilindro desconsiderando as aletas ( $B1=0,14m$ ).

### 7.10 Critério de ruptura

A partir do que foi apresentado no item 2.3 deste trabalho, o critério de ruptura utilizado na indústria *offshore* será aplicado para a curva carga versus deslocamento traçada a partir dos resultados obtidos com a instrumentação da prova de carga.

A seguir é apresentada novamente a Figura 2.7 com a medida utilizada para obtenção dos 10%, adotado como critério de ruptura neste capítulo.

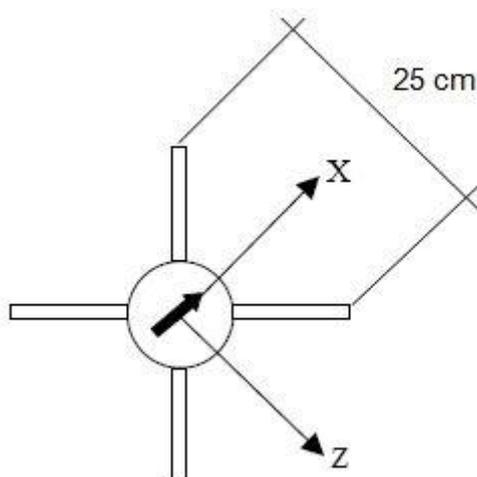


Figura 2.7 – Largura adotada para definição do critério de ruptura

Com a largura equivalente  $L=25$  cm é obtido um deslocamento = 2,5 cm = 25mm, sendo assim a carga última ( $Q_{ult}$ ) encontrada para um deslocamento de 25 mm é igual a 5,3 kN como pode ser observado a partir da Figura 7.12.

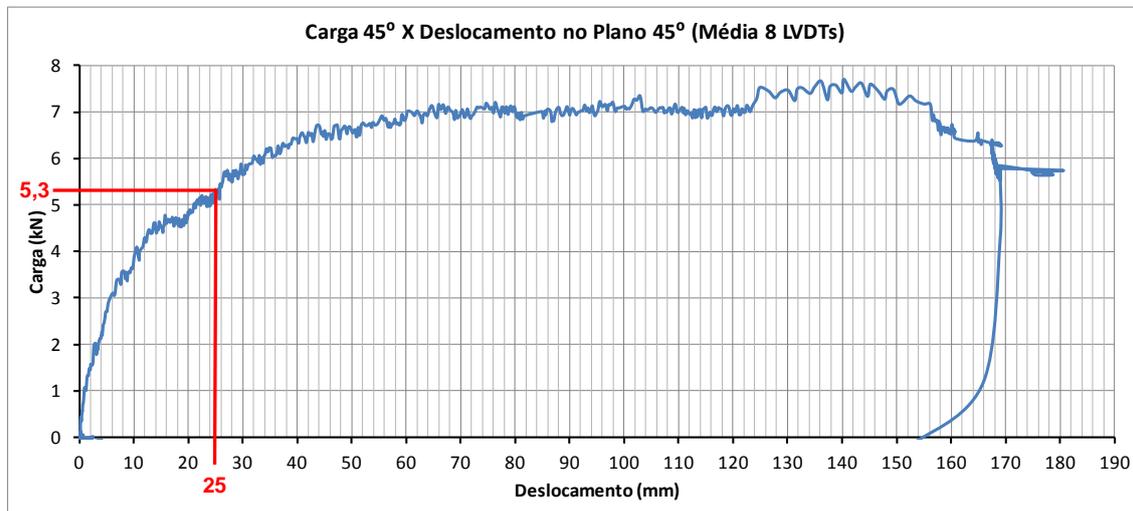


Figura 7.12 – Utilização do critério de ruptura no gráfico carga versus deslocamento

Observa-se na Figura 7.13 que a carga encontra-se bem abaixo do patamar apresentado pela curva em 7 kN. Sendo assim conclui-se que o critério de ruptura utilizado foi conservativo.

## 8 Conclusões e sugestões para futuras pesquisas

### 8.1 Conclusões

Uma prova de carga a tração inclinada em estaca-torpedo modelo foi realizada, até a ruptura, em campo experimental de argila mole no estado do Rio de Janeiro em área próxima à REDUC. As propriedades do campo experimental, conhecido como Sarapui II, são conhecidas e semelhantes às existentes no cenário *offshore*, onde as estacas-torpedo são utilizadas na prática.

São apresentados e analisados em conjunto os dados da instrumentação da prova de carga composta por LVDT's e célula de carga. Os deslocamentos foram medidos nos eixos verticais e horizontais pelos LVDT's e a carga a 45° pela célula de carga. É apresentado um gráfico mostrando a tendência de movimento da cabeça da estaca-torpedo modelo durante a realização da prova de carga inclinada.

A metodologia de MEYERHOF (1973) foi utilizada para estimar a capacidade de carga inclinada da estaca-torpedo modelo.

Um critério de ruptura utilizado na prática de projetos deste tipo de fundação é utilizado para fins de comparação com a curva carga a 45° versus deslocamento 45°.

No que concerne a prova de carga, os deslocamentos horizontais máximos foram da ordem de 90 mm, enquanto os deslocamentos verticais máximos foram da ordem de 35 mm. O deslocamento máximo composto para o plano inclinado a 45° foi da ordem de 168 mm. Com base nos dados obtidos através dos LVDTs foi possível observar que houve uma pequena rotação da estaca-torpedo modelo no plano horizontal e, no plano vertical esta rotação foi desprezível, pois apresentou valores muito pequenos. Este fato deve-se a alguma excentricidade ocasionada pela instalação da estaca-torpedo modelo.

A curva carga a 45° versus deslocamento a 45° apresentou um comportamento típico com um patamar bem definido. A carga de ruptura foi de 7 kN e o deslocamento no início da ruptura foi da ordem de 60 mm.

Devido à geometria não convencional da estaca-torpedo modelo foi necessário estabelecer hipóteses com relação à largura equivalente a ser utilizada para a estimativa de capacidade de carga de ruptura. As larguras consideradas foram: 0,14 m (limite inferior), 0,25 m, 0,32 m e 0,36 m (limite superior).

A aplicação da metodologia de MEYERHOF (1973) para previsão da capacidade de carga de ruptura para as diferentes proposições de largura equivalente e para o  $S_u$  do ensaio de cisalhamento simples (4,5 kN) forneceram valores que variaram de 3,8 kN até 8,2 kN, enquanto para o  $S_u$  do ensaio de palheta elétrica forneceram valores entre 6,0 e 13,8 kN.

É possível, para  $S_u$  de 4,5 kN, verificar que a capacidade de carga estimada que mais se aproxima do valor encontrado pela prova de carga é o valor referente à largura equivalente de 0,32 m, sendo cerca de 7% maior (7,5 kN contra 7,0 kN). Já para  $S_u$  de 8 kN o valor da capacidade de carga prevista que mais se aproxima é referente a largura equivalente de 0,14 m, sendo cerca de 14% menor (6,0 kN contra 7,0 kN).

Retroanalizando os valores das larguras equivalentes a partir do valor da carga de ruptura obtida através da curva carga versus deslocamento, conclui-se que para o valor de  $S_u$  de 4,5 kN a largura equivalente seria de 0,30 m. Já para o  $S_u$  de 8,0 kN o valor da largura equivalente seria de 0,17 m.

O critério de ruptura utilizado apresentou uma carga de ruptura (5,3 kN) abaixo da obtida através do desempenho da instrumentação da prova de carga (7,0 kN), podendo ser considerado conservativo para o caso em questão em 24%.

## 8.2 Sugestões para futuras pesquisas

- a) Analisar os dados da instrumentação da estaca-torpedo modelo (células de tensão total, transdutores de poro-pressão e sensores de inclinação);
- b) Utilizar outras metodologias para estimativa de capacidade de carga inclinada;
- c) Realizar provas de carga inclinada em estaca de geometria simples;
- d) Analisar o comportamento da curva carga versus deslocamento ( $45^\circ$ ) nos planos horizontal e vertical, através da decomposição do carregamento;
- e) Estimar a capacidade de carga através de análise em termos de tensões efetivas.

## Referências bibliográficas

ALVES, A.M.L., 2004, A influência da Viscosidade do Solo e do Tempo após a Cravação na Interação Dinâmica Estaca-solo em Argilas, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

BIARREZ, J. e BARRAUD, Y., 1968, Adaptation des Foundation de Pilône au Terrain par les Méthodes de La Mécanique des Sols, Rapport 22-06 de la C.I.G.R.E., Paris.

BRINCH HANSEN, J. 1961. The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces. Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Bull. No. 12, pp. 5-9.

BROMS, B.B., 1964b, Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol. 90(3), pp. 123-156.

CAQUOT, A., e KERISEL, L. 1949. Traité de Mécanique des Sols. Gauthier-Villars, Paris.

CONDE DE FREITAS, A., GUIMARÃES, G.V.M., DANZIGER, F.A.B., HENRIQUES JUNIOR, P.R.D., GENZANI, R.G.B.C., E PORTO, E.C. 2012. Instrumentação de Estaca-Torpedo Modelo, XVI COBRAMSEG, Porto de Galinhas.

CONDE DE FREITAS, A., 2013, Comportamento a Tração de Estaca Torpedo Modelo em Argila Mole, Seminário de Qualificação de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

COSTA, R. G. B., 2008, Análise paramétrica das condições de ancoragem de plataformas offshore utilizando estacas torpedo a partir de modelos em elementos finitos, Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE.

GUIMARÃES, G.V.M., CONDE De FREITAS, A., SANTANA, C.M., DANZIGER, F.A.B., GENZANI, R.G.B.C., HENRIQUES JUNIOR, P.R.D. e PORTO, E.C. 2012, Provas de Carga em Estaca-Torpedo Modelo Instrumentada, XVI COBRAMSEG, Porto de Galinhas.

GUIMARÃES, G. V. M., 2013; Comportamento de Estacas Rígidas Instrumentadas em Provas de Carga Horizontal em Argila Mole, Tese de D.Sc. em elaboração.

HENRIQUES JUNIOR, P. R. D. ; PORTO, E. C. ; MEDEIROS JUNIOR, C. J. ; FOPPA, D. ; COSTA, R. G. B. ; FERNANDES, J. V. V. ; DANZIGER, F. A. B. ; JANNUZZI, G. M. F. ; GUIMARÃES, G. V. M. ; SILVA JUNIOR, S. P., 2010 . O Desenvolvimento do Piezocone-Torpedo: Finalidades do Ensaio, Desafios e Primeiros Testes. In: XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), 2010, Gramado.

HOPE, A. C. 1969. Uplift resistance of vertical bulbous piles under inclined loads in sand. M.Eng. Thesis, Nova Scotia Technical College, Halifax, N. S.

JANNUZZI, G. M. F. 2009, Caracterização de solo mole de Sarapuí II através de ensaios de campo. Dissertação de M.Sc., UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro.

JANNUZZI, G. M. F.; DANZIGER, F. A. B.; GUIMARÃES, G. V. M.; SILVA JUNIOR, S. P.; HENRIQUES JUNIOR, P. R. D.; PORTO, E. C.; MEDEIROS JUNIOR, C. J.; FOPPA, D. ; COSTA, R. G. B. ; FERNANDES, J. V. V., 2010a, Primeiros Resultados com o Piezocone-Torpedo em Terra: os Ensaios em Sarapuí II. In: XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), 2010, Gramado.

JANNUZZI, G. M. F.; DANZIGER, F. A. B.; MARTINS, I. S. M.; GUIMARAES, G. V. M., 2010b. A detecção de regiões influenciadas por aterros sobre argilas moles através de ensaios de campo. In: XV COBRAMSEG - XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Gramado - RS. XV COBRAMSEG, 2010.

JANNUZZI, G. M. F., 2013, Comunicação Pessoal.

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

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

MEYERHOF, G. G., 1973, The Uplift Capacity of Foundations Under Oblique Loads, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 10, No. 1: pp 64-70.

MEYERHOF, G. G., and ADAMS, J. I., 1968, The Ultimate Uplift Capacity of Foundations. Canadian Geotechnical Journal, 5, pp. 225-244.

POULOS, H. G., 1988, Marine Geotechnics, London, Unwyn Hyman Ltd.

RANJAN, G. 1970. The Bearing Capacity of Batter Piles Under Inclined Loads in Sand. Ph.D. Thesis, Nova Scotia Technical College, Halifax, N.S.

SANTANA, C. M. 2013, Comunicação Pessoal.

SOKOLOWSKII, V. V. 1965, Statics of Granular Media. Pergamon Press, London.

VALLIAPPAN, p. 1970. Uplift Resistance of Vertical Bulbous Piles Under Inclined Loads in Clay. M.Eng. Thesis, Nova Scotia Technical College, Halifax, N.S.

## Anexos

### Anexo A

Cálculo da largura equivalente para um cilindro de área lateral igual à área calculada para a estaca-torpedo modelo

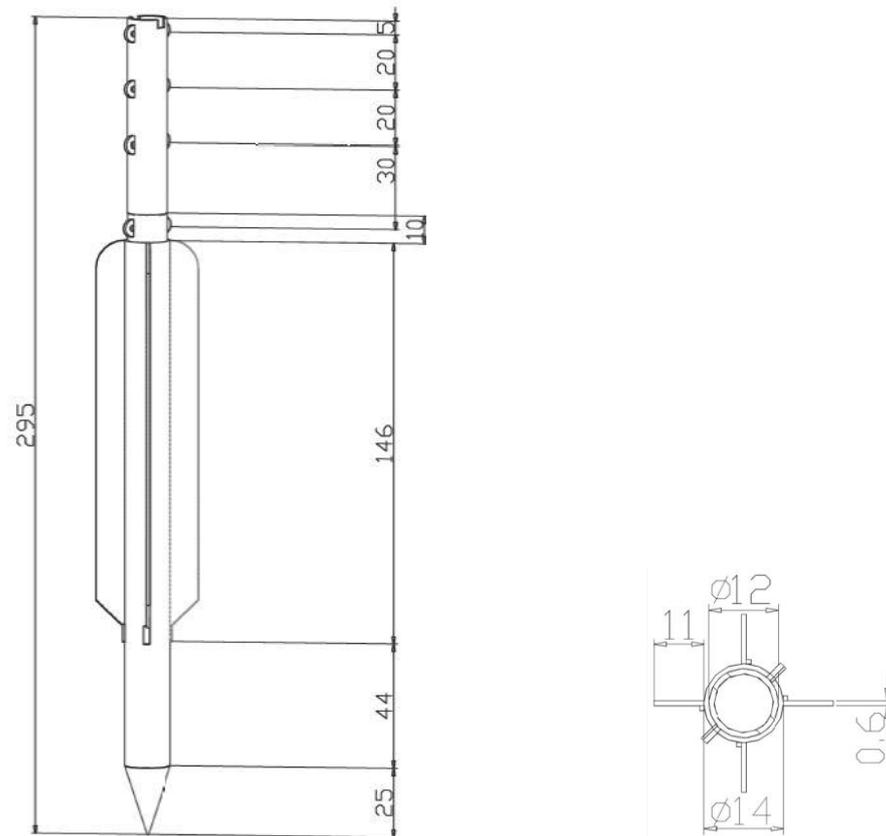


Figura A.1 – Dimensões que serão utilizadas nos cálculos do diâmetro equivalente (cotas em cm)

Área 1 = área do cone – Área 2 = área do cilindro – Área 3 = área das aletas

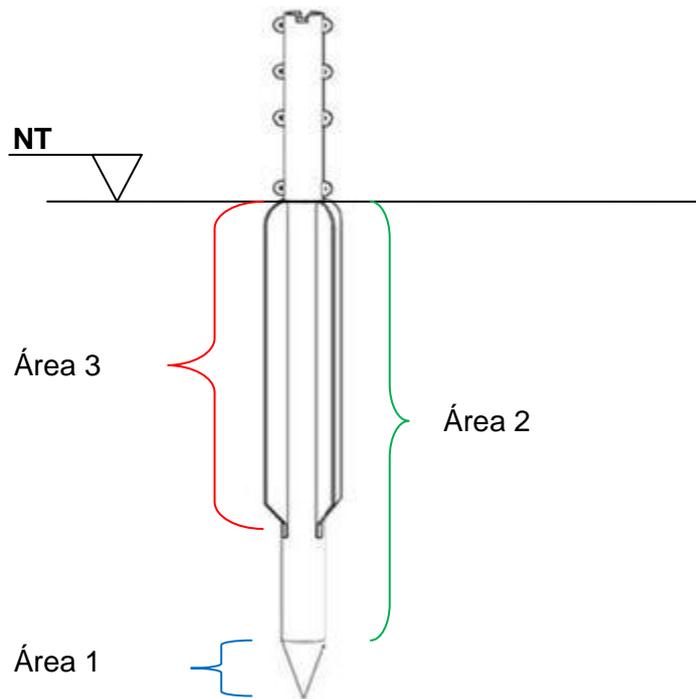


Figura A.2 – Esquema para cálculo da área lateral total da estaca

a. Área 1 (A1) – área lateral do cone (em metros)

Propriedades do cone:

Diâmetro da base – 0,14m

Altura ( $h_{cone}$ ) – 0,25m

$$A1 = \pi r g$$

$$r = \frac{\text{diâmetro da base}}{2} = \frac{0,14}{2} = 0,07 ; \quad g = \sqrt{r^2 + h_{cone}^2} = 0,26$$

$$A1 = \pi r g = \pi \times r \times g = \pi \times 0,07 \times 0,26 \cong 0,06 \text{ m}^2$$

b. Área 2 (A2) – área do cilindro (fuste)

Propriedades do cilindro (fuste)

Diâmetro do cilindro – 0,14m = 2r

Altura ( $h_{fuste}$ ) – 0,44 + 1,46 = 1,90m

$$A2 = 2r \pi h_{fuste} = \text{diâmetro do cilindro} \times \pi \times h_{fuste}$$

$$A2 = 0,14 \times \pi \times 1,90 \cong 0,84 \text{ m}^2$$

c. Área lateral das aletas (A3)

Propriedades das aletas

Largura(L) – 0,11m

Altura ( $h_{aleta}$ ) – 1,46m

Perímetro de uma aleta =  $0,11 + 0,11 = 0,22 \text{ m}$

A espessura da aleta 0,06 metros não entrou neste cálculo pois ela foi considerada quando foi feito o cálculo do cilindro ao longo de todo seu comprimento, no item apresentado anteriormente.

Perímetro das 4 aletas =  $4 \times 0,22 = 0,88 \text{ m}$

$A3 = \text{perímetro das 4 aletas} \times h_{aleta}$

$A3 = 0,88 \times 1,46 = 1,28 \text{ m}^2$

Assim temos a área lateral total da estaca:

$A1 + A2 + A3 = 0,06 + 0,84 + 1,28 = 2,18 \text{ m}^2$

A partir da área lateral encontrada foi então encontrado o valor do diâmetro de um cilindro de área lateral equivalente, este diâmetro foi chamado diâmetro equivalente ( $B_{eq}$ )

Área do cilindro equivalente (A4)

Altura do cilindro equivalente = altura enterra = 2,15m

$A4 = 2,18 \text{ m}^2 = B_{eq} \times \pi \times H \Rightarrow B_{eq} = \frac{2,18}{\pi \times 2,15} \cong 0,32 \text{ m}$

Diâmetro equivalente –  $B_{eq} = 0,32m$

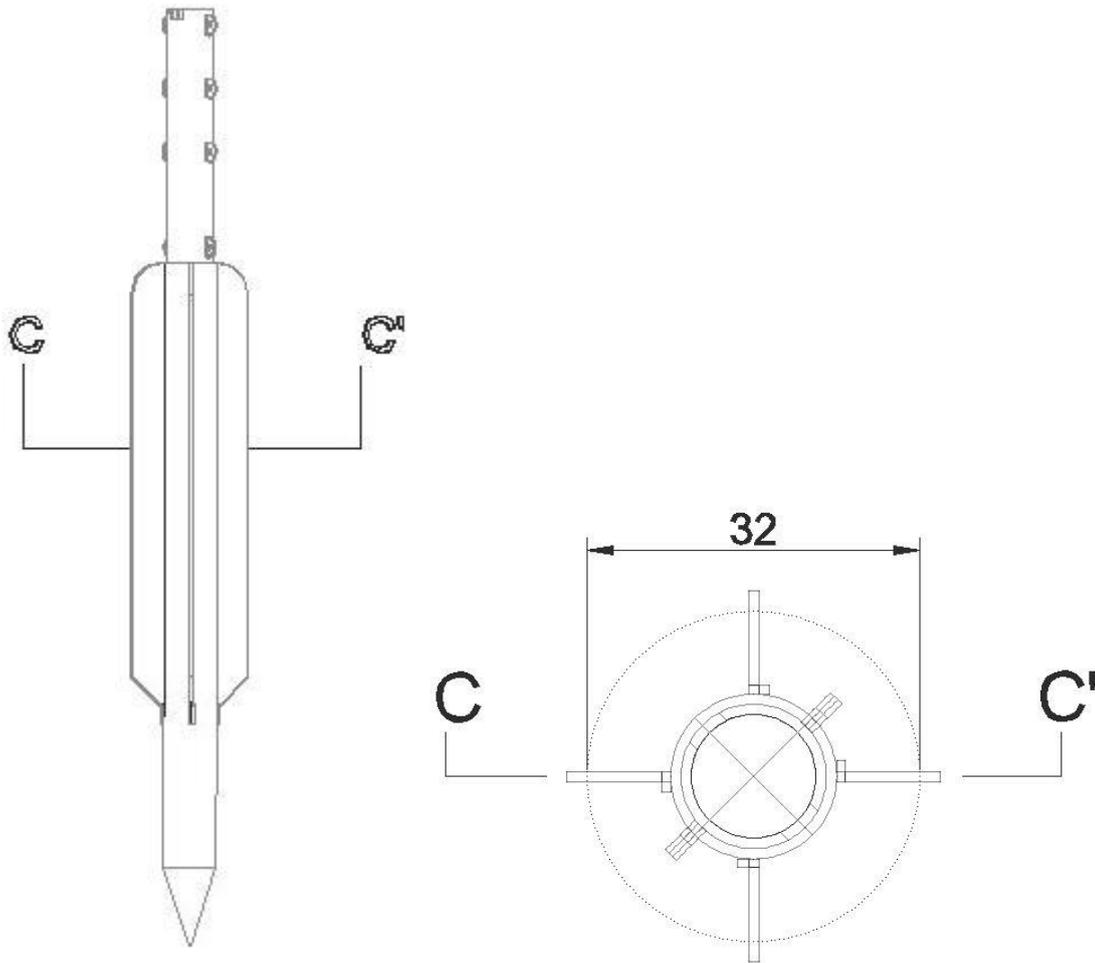


Figura 6.3 – Seção da estaca-torpedo modelo com a marcação do diâmetro equivalente (cotas em cm)

Sendo o diâmetro equivalente = largura equivalente = 32 cm

## Anexo B

A seguir são apresentados na figura 1 os deslocamentos de cada um dos LVDT's, os LVDT's 1 e 2 apresentam valores negativos devido a seu posicionamento durante a prova de carga.

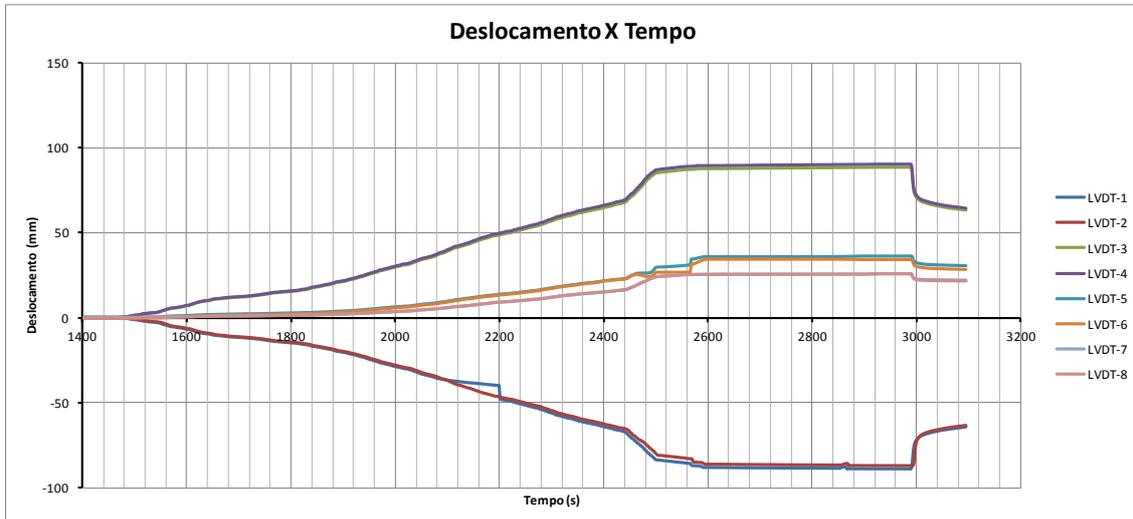


Figura 1 – Todos LVDT's versus tempo

A seguir serão apresentados nas figuras 2 a 17 as medidas encontradas pra cada um dos LVDT's durante a prova de carga, nos gráficos os LVDT's 1 e 2 já tiveram seus valores corrigidos para que apresentassem valores positivos.

Medidores de deslocamento horizontal, LVDT's 1 a 4.

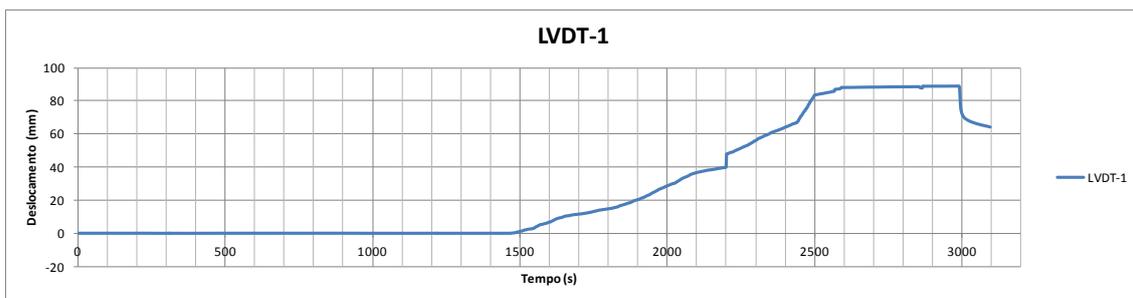


Figura 2 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=0 s)

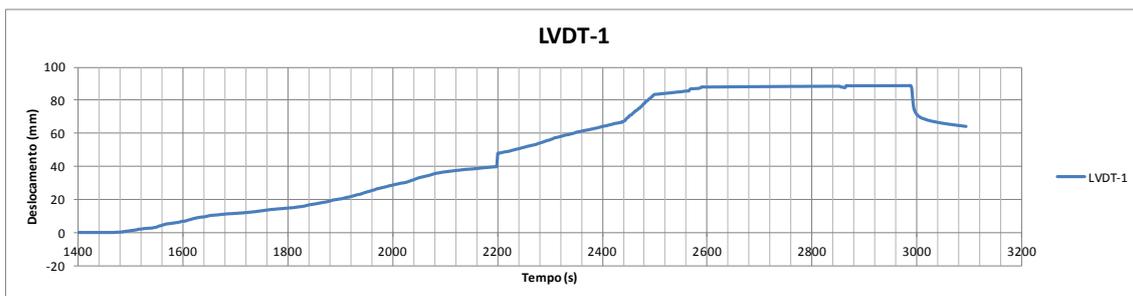


Figura 3 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=1400 s)

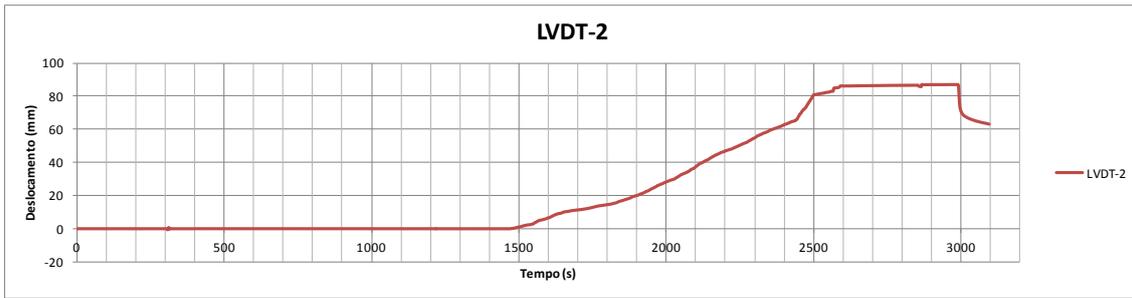


Figura 4 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=0 s)

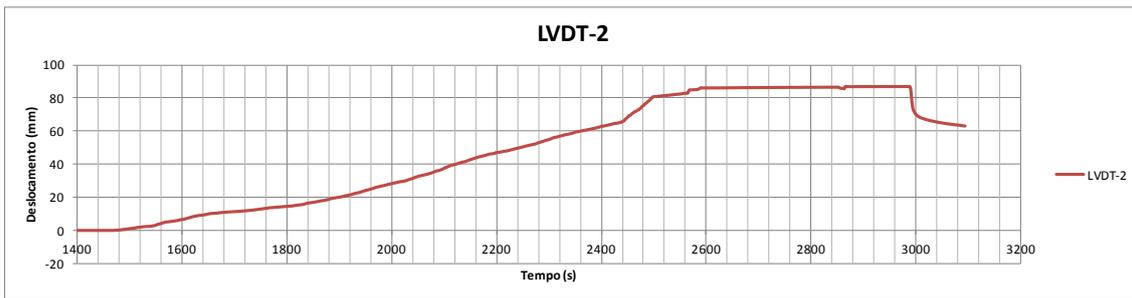


Figura 5 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=1400 s)

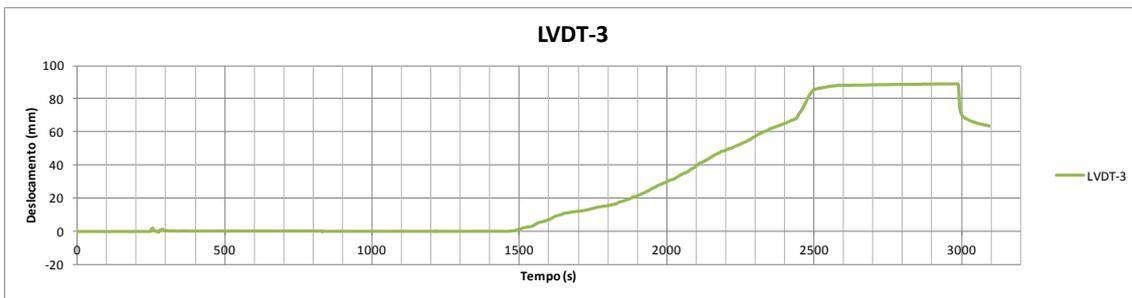


Figura 6 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=0 s)

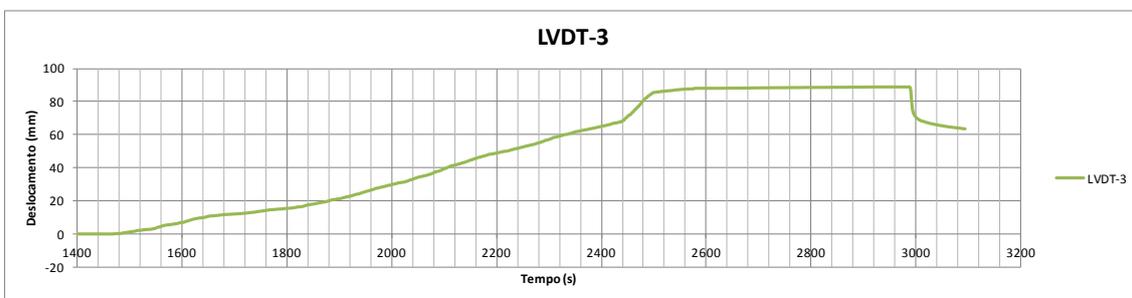


Figura 7 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=1400 s)

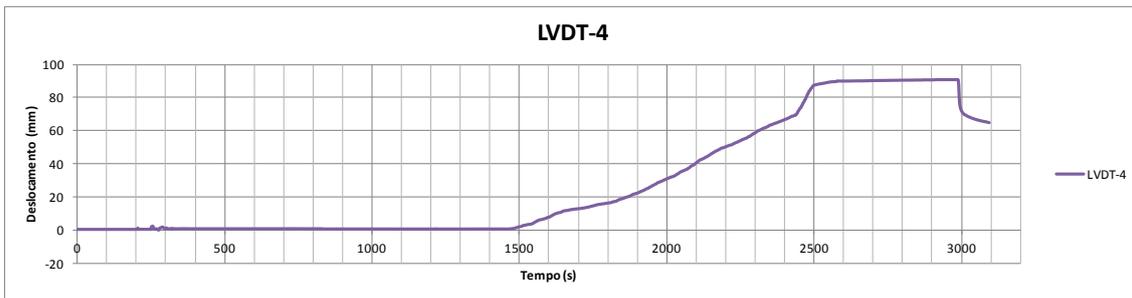


Figura 8 – Deslocamento versus tempo (iniciando em  $t=0$  s)

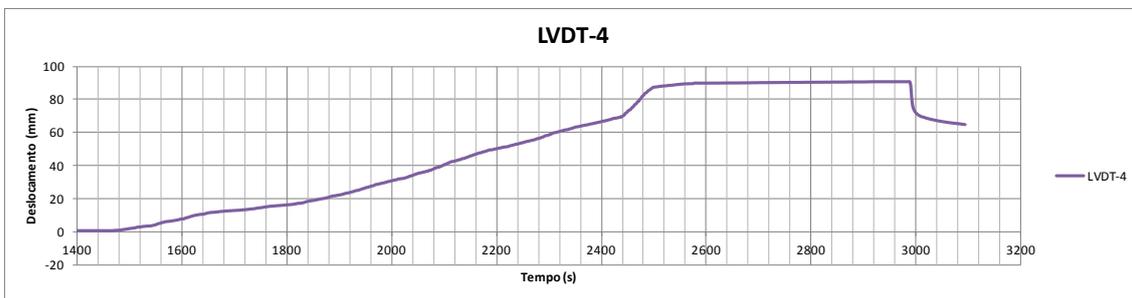


Figura 9 – Deslocamento versus tempo (iniciando em  $t=1400$  s)

Medidores de deslocamento vertical, LVDT's 5 a 8.

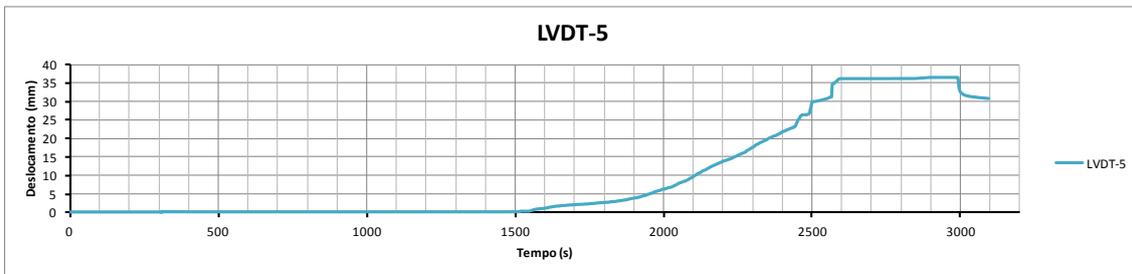


Figura 10 – Deslocamento versus tempo (iniciando em  $t=0$  s)

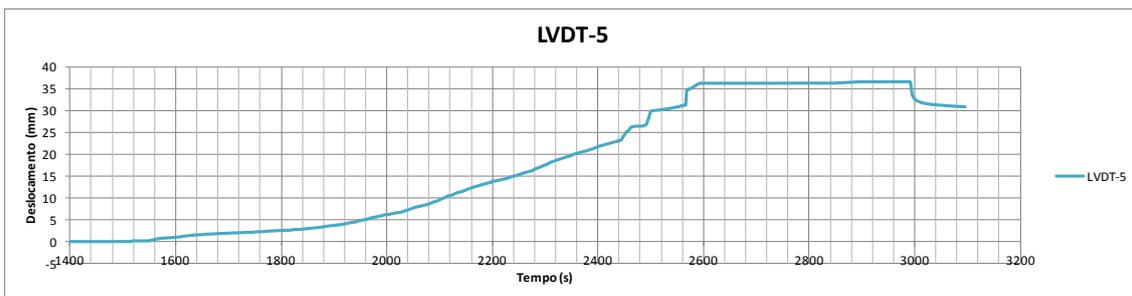


Figura 91 – Deslocamento versus tempo (iniciando em  $t=1400$  s)

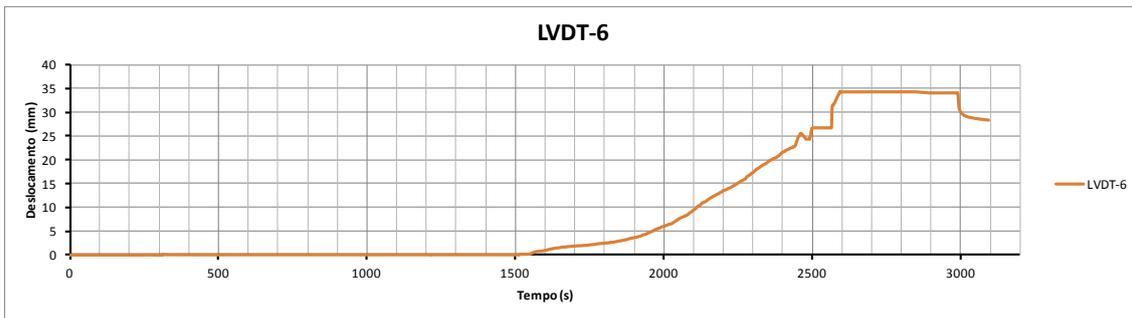


Figura 102 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=0 s)

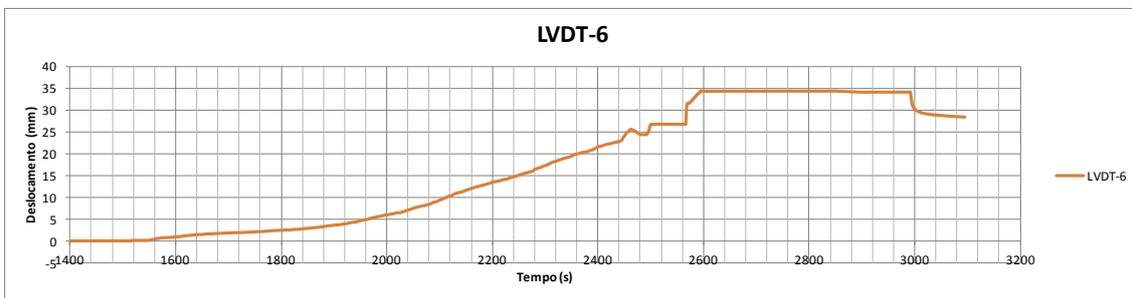


Figura 113 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=1400 s)

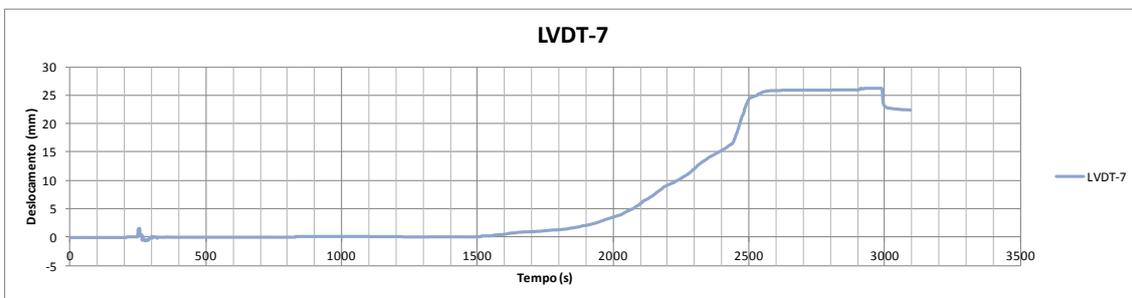


Figura 12 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=0 s)

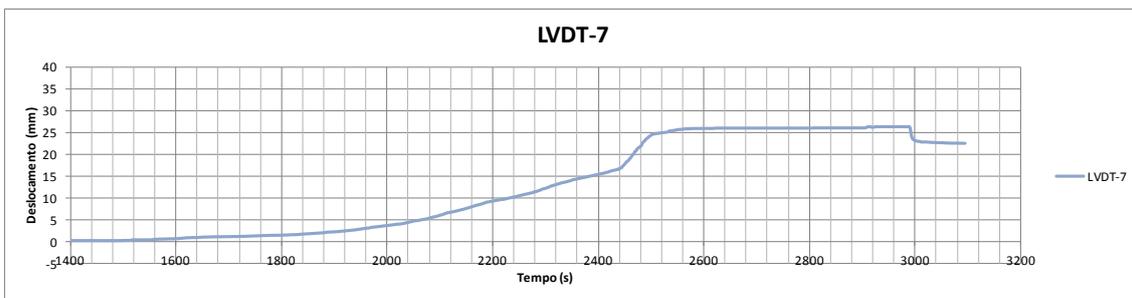


Figura 135 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=1400 s)

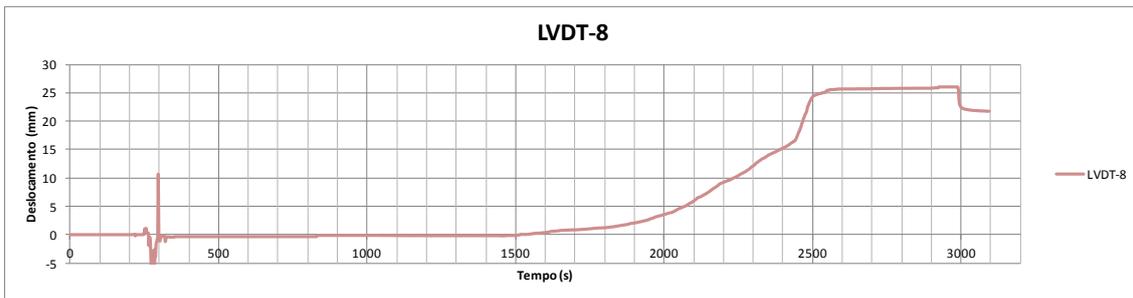


Figura 14 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=0 s)

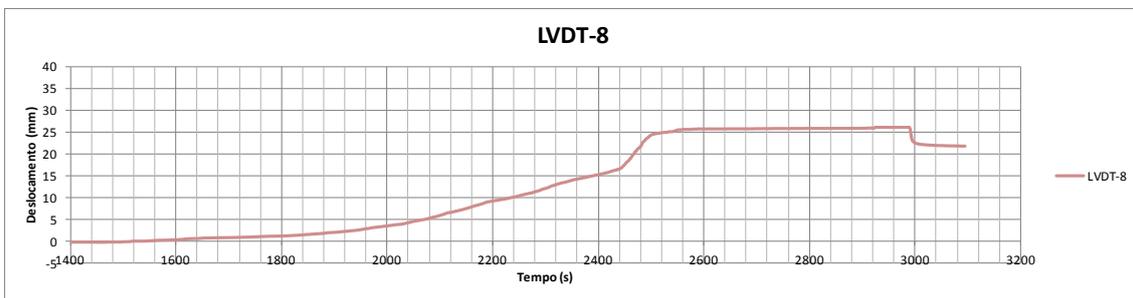


Figura 157 – Deslocamento versus tempo (iniciando em t=1400 s)

## Anexo C

### Calibração dos LVDT's

Nas figuras 18 a 25 são apresentadas as curvas de calibração encontradas para cada um dos 8 LVDT's utilizados na prova de carga.

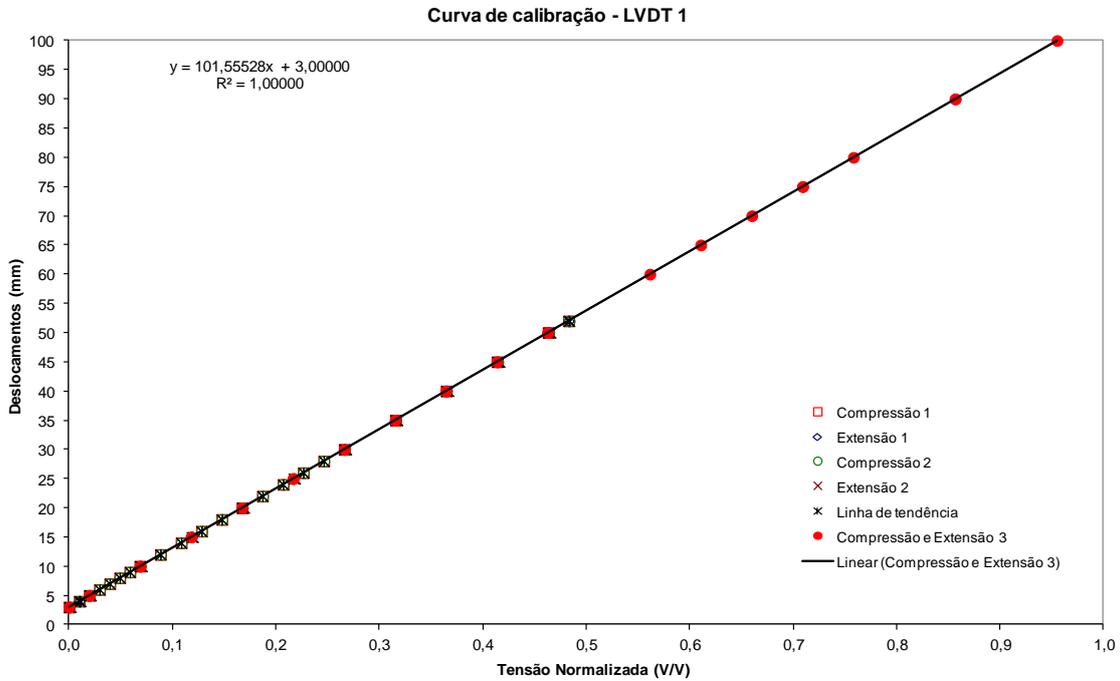


Figura 18 – Curva de calibração do LVDT-1

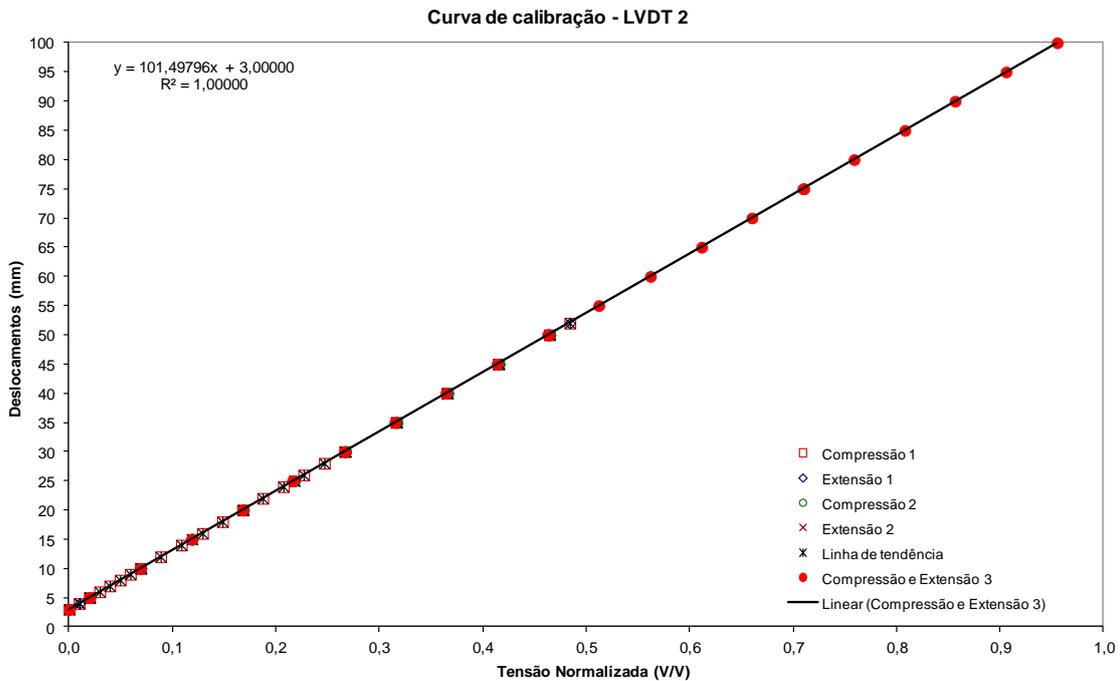


Figura 19 – Curva de calibração do LVDT-2

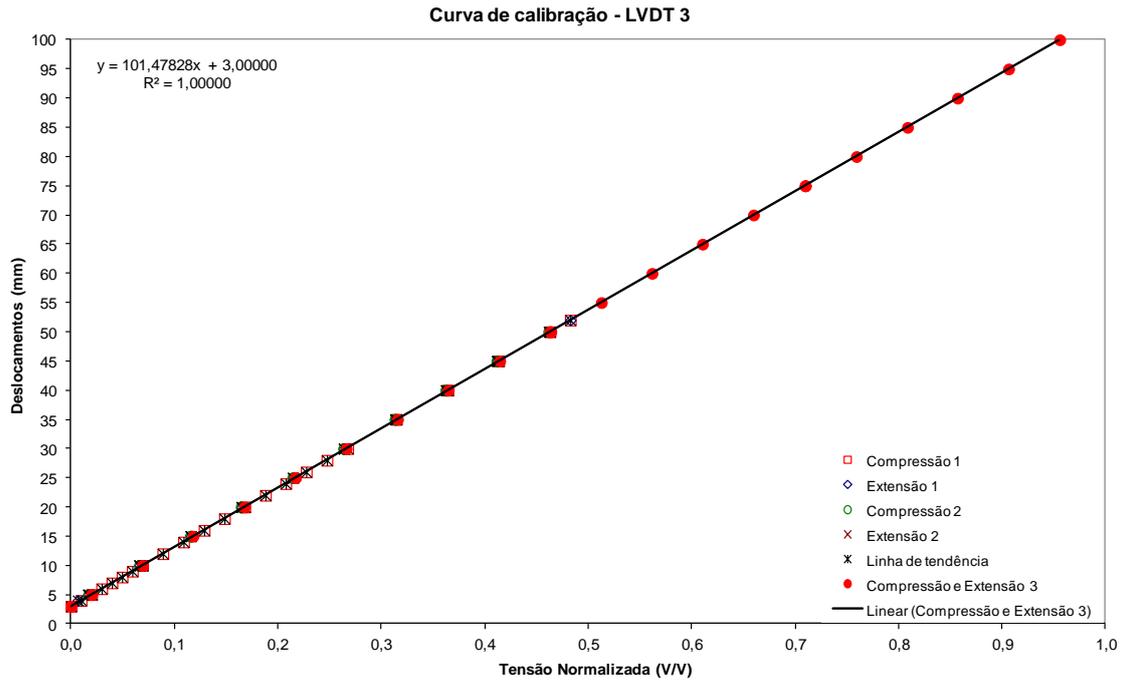


Figura 20 – Curva de calibração do LVDT-3

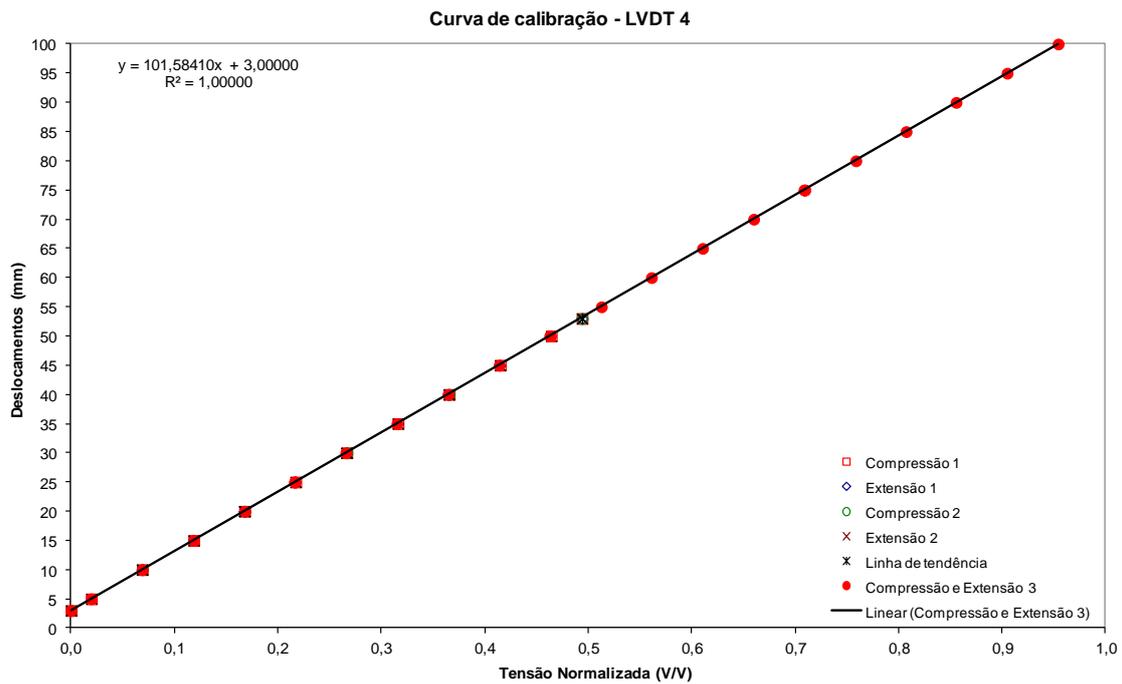


Figura 21 – Curva de calibração do LVDT-4

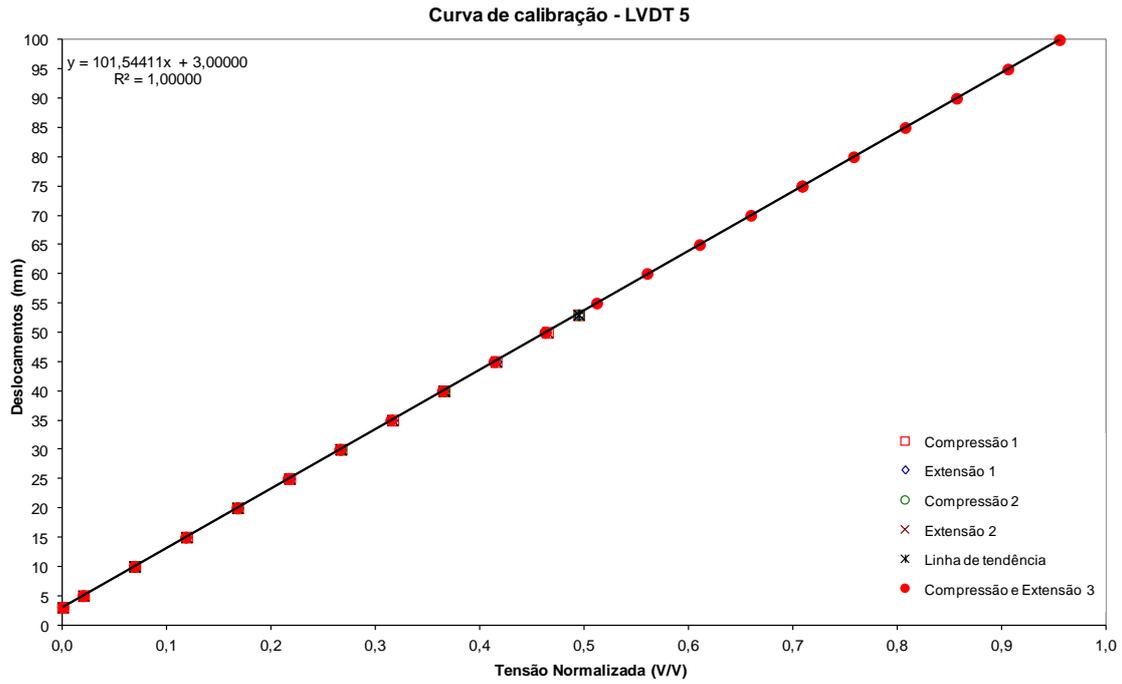


Figura 22 – Curva de calibração do LVDT-5

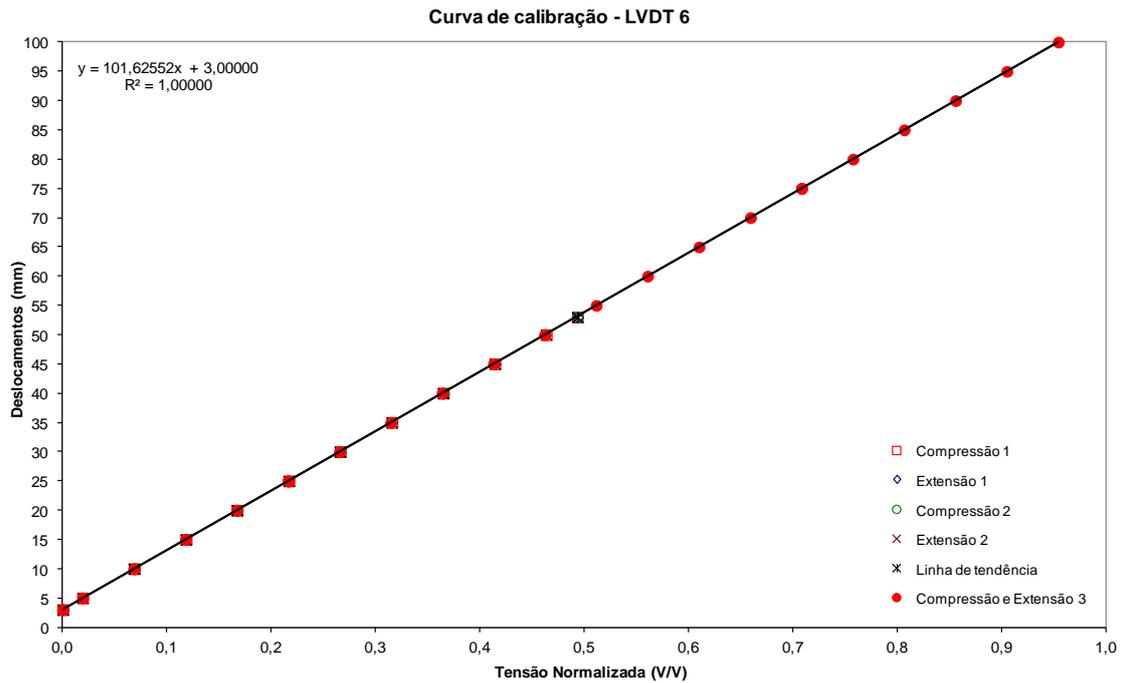


Figura 23 – Curva de calibração do LVDT-6

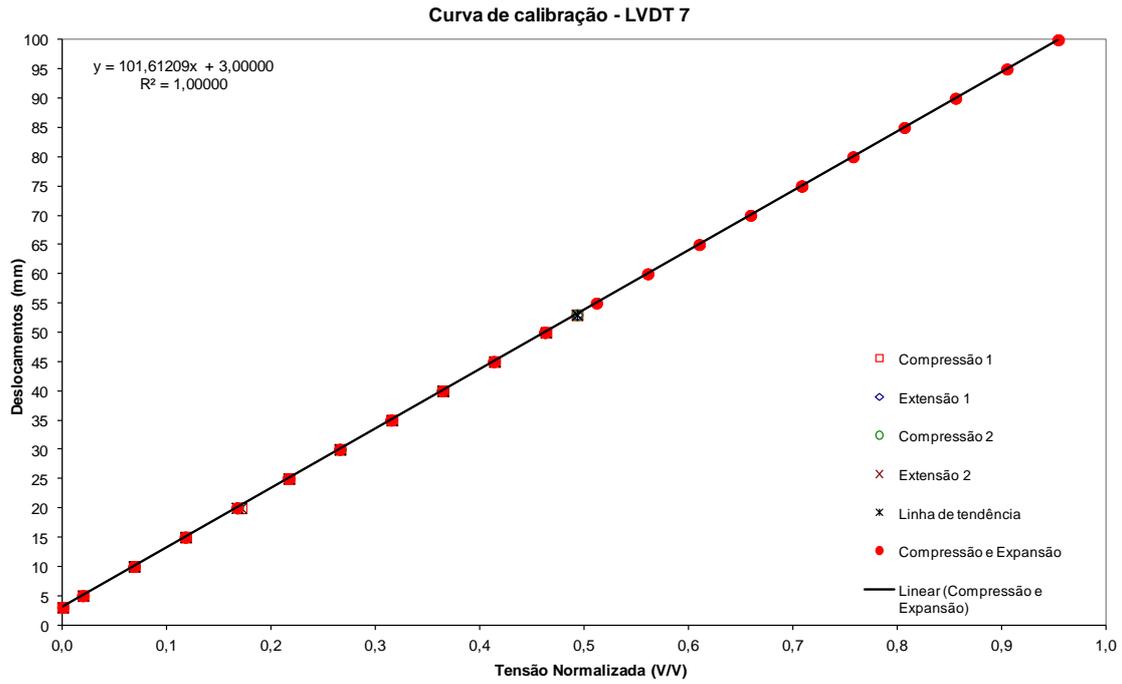


Figura 24 – Curva de calibração do LVDT-7

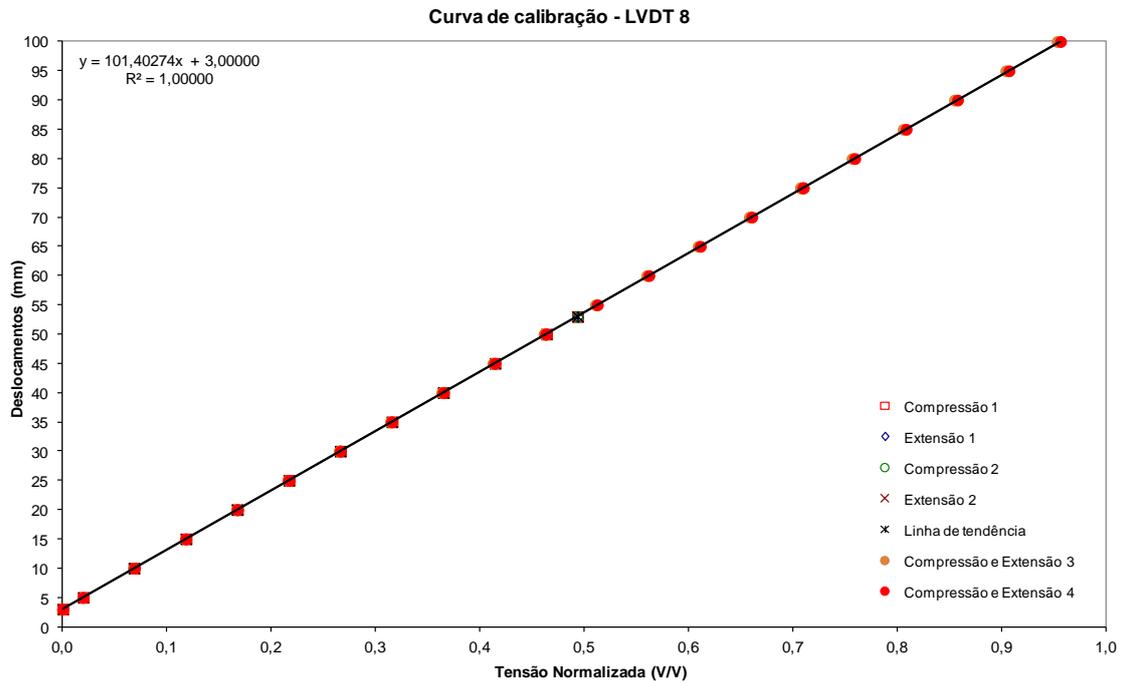


Figura 16 – Curva de calibração do LVDT-8