

RUBENS RAMIRES SOBRINHO

**INSTRUMENTAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO
COMPORTAMENTO DE ESTACAS DE SUÇÃO EM
SISTEMAS OCEÂNICOS UTILIZANDO CENTRÍFUGA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

**São Paulo
2002**

**CONSULTA
FD-3072**

RUBENS RAMIRES SOBRINHO

**INSTRUMENTAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO
COMPORTAMENTO DE ESTACAS DE SUÇÃO EM
SISTEMAS OCEÂNICOS UTILIZANDO CENTRÍFUGA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Toshi-ichi Tachibana

São Paulo
2002

(Salmos 119, vers. 105 – 160)

*Lâmpada para os meus pés é a tua palavra, e luz
para o meu caminho. Tu és o meu refúgio e o meu
escudo. Maravilhosos são os teus testemunhos,
por isso minha alma os guarda. Pois tua palavra
é a verdade desde o princípio, e cada um dos teus
juízos dura para sempre.*

Dedico este trabalho às pessoas que são a razão e incentivo para o meu aperfeiçoamento pessoal e técnico:

João Baptista Ramires (*in memoria*),
e Edith Fonseca, meus queridos pais;

Eliane Iara Corá Ramires, minha amada esposa, e

Camila Corá Ramires, minha filha querida.

AGRADECIMENTOS

A realização desta pesquisa tornou-se possível devido à participação e colaboração de pessoas muito importantes, às quais o autor deseja expressar seus sinceros agradecimentos.

Ao amigo e orientador Professor Dr. Toshi-ichi Tachibana que confiou e acreditou no meu potencial apresentando-me ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP, pelo apoio e ensinamentos indiscutivelmente essenciais para minha pesquisa e consciência científica.

Ao amigo Dr. Luiz Shiro Tachibana que contribuiu no meu ingresso a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e incentivou-me na continuidade de minha carreira acadêmica.

Ao amigo Dr. Sussumu Niyama pela sua incansável disposição, seus preciosos ensinamentos e, sem deixar de mencionar, os incentivos na realização desta pesquisa.

Aos futuros engenheiros Eduardo Toshiyuki Adachi Ohmishi e Marcelo Serigo pela colaboração indispensável na realização dos ensaios.

Aos colegas Tecnólogos Francisco Uema Ikeda, Nelson Fukasawa e o Técnico Luiz Pedro Rodrigues pelo apoio e sugestões úteis durante a realização dos experimentos.

A Secretária Luzia Matricô Nagase que ajudou na organização dos assuntos administrativos, sem o qual não seria possível concretizar as atividades relacionadas aos ensaios.

Ao amigo Professor Mário Antonio Reis pela colaboração indispensável na verificação e correção deste texto.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, que muito contribuiu para minha educação, cultura, conduta pessoal e profissional, verdadeiramente uma fonte de inspiração. Instituição esta que representa para mim, indiscutivelmente, motivo de admiração, orgulho e respeito.

A Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A. por ter cedido fotografias e material técnico para o enriquecimento deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

Finalmente, agradecer de todo meu coração ao meu DEUS por propiciar a oportunidade de conquistar mais uma etapa importante na minha vida.

Por outro lado, alguns países introduziram a técnica de modelagem física em centrífugas devido aos recursos técnicos e o baixo custo em comparação com o acompanhamento em campo, ou ainda por evitar problemas de interpretação das tensões e deformações nos ensaios em laboratório de modelos físicos com aceleração gravitacional normal. No Brasil, existe escassez de trabalhos empregando esta tecnologia. Este trabalho foi realizado através do equipamento para ensaios de modelos reduzidos, que foi desenvolvido no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. com o apoio financeiro da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, com o propósito de realizar modelagem matemática e física.

Este tema tem sido bastante discutido em literaturas internacionais, desde estudos de fadiga dos materiais estruturais que compõem as plataformas fixas ou flutuantes submetidas a esforços laterais provenientes de mares, ventos e impactos de navios, até o comportamento durante sua instalação, sua capacidade de carga e sua interação com o solo sob influência destas forças. Estes estudos têm sido realizados pelo acompanhamento de instrumentação do protótipo em campo, ou pela

O presente trabalho pretende apresentar um estudo de caso de uma fundação denominada estaca de sucção, *suction pile*, que é utilizada como sistema de ancoragem para plataformas ou sistemas flutuantes instaladas em águas profundas, e como fundação direta para plataformas fixas instaladas em águas rasas.

RESUMO

ensaios de modelos geotécnicos e contribuir na solução de problemas geotécnicos na engenharia offshore.

ABSTRACT

This thesis presents a case study on suction pile, a type of foundation used as anchor system for deep water platforms or flotation systems and also foundation for shallow water platforms.

This theme has been discussed in the international literatures, such as studies of fatigue on structural materials of the platforms piles submitted to lateral forces due to the tides, winds and impacts, studies of its behaviour during the installation, as well as the aspects of capacity and soil-pile interaction. These studies have been performed by use of instrumentation on the prototypes in the field, or by mathematical and physical modelling.

On the other hand, some countries introduced the technique of centrifuge physical modelling due to the facilities and low cost comparing with the field tests, and also to avoid problems related tensions and deformations analysis of physical modelling tests at 1g. In Brazil, unfortunately, small experiences exist using this technology.

In this work, tests were conducted using the small centrifuge, developed at IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A. with support from the Research Financial Agent FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
LISTA DE SIMBOLOS	
RESUMO	
ABSTRACT	
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO GERAL	pg.001
Capítulo 2 – HISTÓRIAS DAS CENTRÍFUGAS	pg.012
Capítulo 3 - CENTRÍFUGA IPT/FAPESP	pg.017
3.1. Introdução	pg.017
3.2. Características Mecânicas	pg.018
3.3. Características Elétricas	pg.020
3.4. Sistema de Controle Central	pg.021
3.5. Subistema de Aquisição de Dados de Instrumentação	pg.021
3.5.1. Módulo de Tratamento e Condicionamento de Sinais	pg.022
3.5.2. <i>Slip Ring</i> (Elétrico e Eletrônico)	pg.025
3.5.3. Barramento Analógico Interno	pg.027
3.5.4. Barramento Analógico Externo (Sistema SCXI)	pg.028
3.5.5. Placa Conversora A/D AT-MIO-64F-5	pg.030
3.6. Subistema de Controle de Rotação da Centrífuga	pg.031
3.6.1. Motor	pg.031
3.6.2. Inversor de Frequência Diginverter VG3	pg.031
3.6.3. Tacômetro Digital	pg.033

pg.035	3.7.Subsistema de Aquisição e Tratamento de Imagens
pg.035	3.7.1.Sistema de Lâmpadas Estroboscópicas
pg.037	3.7.2.Máquina Fotográfica
pg.038	3.7.3.Scanner
pg.038	3.7.4.Mesa Digitalizadora
pg.039	3.8.Ajustes e Calibrações do Sistema da Centrífuga
pg.040	3.8.1.Cálculo da Rotação da Centrífuga
pg.042	Capítulo 4 – CONCEITOS DE MODELAGEM
pg.042	4.1.Introdução
pg.043	4.2.Modelagem Física
pg.046	4.3.Modelagem Física Convencional
pg.049	4.4.Modelagem Física em Centrífuga
pg.052	4.4.1.Relações de Escala
pg.054	4.4.2.Efeitos de Escala
pg.066	Capítulo 5 – ESTACAS DE SUÇÃO
pg.066	5.1.Introdução
pg.070	Capítulo 6 - MODELO FÍSICO DE ESTACAS DE SUÇÃO NA CENTRÍFUGA IPT/FAPESP
pg.070	6.1.Introdução
pg.071	6.2.Características do Modelo Físico de Estacas de Sucção
pg.073	6.3.Características do Modelo Físico do Solo
pg.073	6.4.Instrumentação Eletrônica
pg.074	6.4.1.Instrumentos para Medidas de Poro - Pressões
pg.076	6.4.2.Célula de Carga
pg.077	6.4.3.Micro Motor e Encoder

pg.078	6.4.4.Atuador de Nível D'água
pg.079	6.4.5.Programa de Aquisição de Dados
pg.080	6.5. Ensaio Realizados
pg.080	6.5.1.Montagem dos Ensaio
pg.083	6.5.2.Procedimentos Empregados
pg.084	6.5.3. Ensaio Complementares
pg.084	6.6. Resultados Obtidos
pg.084	6.6.1. Primeira Série de Ensaio
pg.089	6.6.2. Segunda Série de Ensaio
pg.090	6.7. Análise dos Resultados
pg.090	6.7.1. Fatores Intervenientes nos Ensaio
pg.093	6.7.2. Comparação das Medidas de Poro – Pressão
pg.094	6.7.3. Capacidade de Carga das Estacas Modelo
pg.095	6.7.4. Ensaio de Arrancamento Adicionais
pg.097	6.8. Considerações Finais
pg.099	Capítulo 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS
pg.100	Capítulo 8 – SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS
pg.101	Capítulo 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
	Anexo 1 – Ensaio Laboratoriais
	Anexo 2 – Calibrações da Instrumentação
	Anexo 3 – Fotos das Etapas de Ensaio
	Anexo 4 – Comportamento dos Modelos durante a Cravação e Arrancamento
	Anexo 5 – Comportamento dos Modelos durante o Arrancamento
	Apêndice 1 - Trabalhos Desenvolvidos com Modelos Físicos de Estacas de Sucção

LISTA DE FIGURAS

- Figura 01 – Sistemas de Ancoragem
- Figura 02 – Instalação de Plataformas Fixas com Estacas de Sucção
- Figura 03 – Plataforma *SIP I* de Auto Instalação
- Figura 04 – Plataforma *SIP II* de Auto Instalação
- Figura 05 – Instalação de Plataforma *SIP II* em Angola - África
- Figura 06 – Plataforma Flutuante P19 usa Estacas de Sucção (fotografia cedida pela Plataforma Flutuante – Fotógrafo Geraldo Falção)
- Figura 07 – Plataforma Flutuante P26 usa Estacas de Sucção (fotografia cedida pela Plataforma Flutuante – Fotógrafo Geraldo Falção)
- Figura 08 – Navio *FPSO P33* usa Estacas de Sucção (fotografia cedida pela Plataforma Flutuante – Fotógrafa Eliana Fernandes)
- Figura 09 – Navio *FPSO P35* usa Estacas de Sucção (fotografia cedida pela Plataforma Flutuante – Fotógrafo Geraldo Falção)
- Figura 10 – Instalação da Estacas de Sucção *in locu*
- Figura 11 – Centrifuga – Universidade da Califórnia, Davis - USA
- Figura 12 – Centrifuga *Deft Geotechnics* na Holanda
- Figura 13 – Centrifuga do Laboratório *Central Des Ponts et Chaussées*
- Figura 14 – Centrifuga da *Public Works Research Institute*, Japão
- Figura 15 – Centrifuga IPT/FAPESP
- Figura 16 – Eixo Central da Centrifuga
- Figura 17 – Esquema Geral dos Sistemas da Centrifuga IPT/FAPESP
- Figura 18 – Tensões no Modelo e no Protótipo apud Taylor (1995)
- Figura 19 – Comparação da Variação de Tensões com a Profundidade do Modelo

- e o Protótipo apud Taylor (1995)
- Figura 20 - Modelagem de modelos (Ko, 1988)
- Figura 21 - Efeito de Coriolis (Taylor, 1995)
- Figura 22 - Forma de uma Estaca de Sucção
- Figura 23 - Comportamento do Fluxo Hidráulico Provocado pela Sucção
- Figura 24 - Modelos de Estacas de Sucção
- Figura 25 - Sensores de Pressão
- Figura 26 - Condicionadores de Sinais IB3INA e Fontes de Alimentação
- Figura 27 - Célula de Carga
- Figura 28 - Micro Motor e *Encoder*
- Figura 29 - Atuador de Nível D'água
- Figura 30 - Painel Frontal do Programa de Aquisição de Dados
- Figura 31 - Montagem de um Ensaio Teste
- Figura 32 - Amostra *Shelby* Extraída do Cesto da Centrífuga
- Figura 33 - Ensaio de Penetração de Cone
- Figura 34 - Posição dos Sensores Durante os Ensaios
- Figura 35 - Cargas de Ruptura Medidas nos Ensaios de Cravação e Arrancamento
- Figura 36 - Cargas de Ruptura Medidas nos Ensaios de Arrancamento
- Figura 37 - Esquema Geral dos Ensaios de Estacas de Sucção
- Figura A1 - Montagem do Ensaio (Fuglsang, 1991)
- Figura A2 - Tipos de Ensaios (Fuglsang, 1991)
- Figura A3 - Curvas de Carga x Deflexão (Fuglsang, 1991)
- Figura A4 - Poro Pressão no Topo da Estaca de Sucção (Fuglsang, 1991)
- Figura A5 - Modelo de Estaca (Renzi, 1991)

- Figura A6 - Diagrama Esquemático do Equipamento de Ensaio (Renzi, 1991)
- Figura A7 - Programa de Carregamento (Renzi, 1991)
- Figura A8 - Diagrama do *Container* para Ensaio (Allersma, 1997)
- Figura A9 - Apresentação Gráfica do Curso de Pressão e Deslocamento no Tempo (Allersma, 1997)
- Figura A10 - Concepção de Estaca de Sucção Empregada (Narasimha, 1997)
- Figura A11 - Curvas de Carga de Arrancamento x Deslocamento da Estaca de Sucção (Narasimha, 1997)
- Figura A12 - Formas de Rupturas (Narasimha, 1997)
- Figura A13 - Diagrama Esquemático da Drenagem da Amostra sob Adensamento (El-Gharbawy, 1998)

- Tabela 01 - Configuração dos Canais do *Slip Ring* Elétrico
- Tabela 02 - Fatores de Escala Associados à Modelagem Física em Centrifuga
- Tabela 03 - Características Geométricas das Estacas de Sucção
- Tabela 04 - Resumo dos Ensaios Realizados
- Tabela 05 - Força Peso das Estacas de Sucção
- Tabela 06 - Excesso de Poro – Pressões Medidas
- Tabela 07 - Resultados dos Ensaios de Arrancamento
- Tabela 08 - Forma de Ruptura nos Ensaios de Arrancamento
- Tabela 09 - Resultados dos Ensaios de Arrancamento Adicionais
- Tabela 10 - Correspondência das Cargas de Ruptura entre Modelos e Protótipos
- Tabela 11 - Fatores de Correção das Pressões

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	-	<i>Ampère</i>
AC	-	<i>(Alternate Current)</i> corrente alternada
A/D	-	analógico/digital
BNC	-	padrão de conector
<i>Butterworth</i>	-	padrão de filtros ativos
CMR	-	<i>(Common Mode Rejection)</i> rejeição de modo comum
CV	-	cavalo a vapor
cm	-	centímetros
cm/s	-	centímetros por segundo
°C	-	grau <i>Celsius</i>
DMA	-	<i>(Direct Memory Access)</i> acesso direto a memória
<i>drift</i>	-	oscilação
DSP	-	<i>(Digital Signal Processing)</i> processamento digital de sinais
<i>F/Fa</i>	-	relação entre força de resistência e força de arrancamento
FPSO	-	<i>(Floating Production, Storage and Offloading System)</i> Sistema Flutuante de Produção, Armazenagem e Descarregamento.
°F	-	grau <i>Fahrenheit</i>
Gb	-	<i>gigabyte</i>
g	-	aceleração da gravidade 9, 81 m/s ²
g. ton	-	aceleração máxima (g) multiplicada pelo peso do modelo (ton.)

<i>gain user</i>	-	ganho do usuário
<i>GΩ/pF-</i>	-	gigaohm por picofaraday
<i>HD</i>	-	(<i>Hard Disk</i>) disco rígido de computador
<i>Hz</i>	-	<i>Hertz</i>
<i>HP</i>	-	<i>horse power</i>
<i>I/O</i>	-	(<i>INPUT/OUTPUT</i>) entrada/saída
<i>ISSMGE</i>	-	(<i>International Society Soil Mechanics and Geotechnical Engineering</i>) Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
<i> jumper</i>	-	grampo para curto circuito
<i>kΩ</i>	-	quiloohm
<i>KHz</i>	-	quiloherzt
<i>kN</i>	-	quilonewton
<i>kN/m²</i>	-	quilonewton por metro quadrado
<i>kN/s</i>	-	quilonewton por segundo
<i>kPa</i>	-	kilopascal
<i>kW</i>	-	quilowatts
<i>l*</i>	-	comprimento, relação entre modelo e protótipo
<i>L/D</i>	-	relação entre comprimento e diâmetro
<i>LabVIEW</i>	-	programa para gerenciamento de sinais
<i>Loop</i>	-	laço lógico ou elétrico
<i>LVDT</i>	-	(<i>Linear Variable Differential Transformer</i>) transformador diferencial de variação linear
<i>mm</i>	-	milímetros

mm/s	-	milímetros por segundo
m	-	metros
<i>mA</i>	-	<i>milliampère</i>
<i>Mb</i>	-	<i>megabytes</i>
m/h	-	metros por hora
mmHg	-	milímetros de mercúrio
<i>MHz</i>	-	<i>megahertz</i>
<i>MN</i>	-	<i>megawatt</i>
ms	-	milissegundo
N	-	Newton
offset	-	desvio do zero
Pa	-	<i>Pascal</i>
<i>RAM</i>	-	(<i>Random Access Memory</i>) memória de acesso aleatório
rpm	-	rotações por minuto
SAD	-	sistemas de aquisição de dados
<i>SCXI</i>	-	padrão de condicionadores de sinais da <i>National Instruments</i>
<i>SIP I</i>	-	(<i>Self Installation Platform I</i>) Plataforma de Auto Instalação I
<i>SIP II</i>	-	(<i>Self Installation Platform II</i>) Plataforma de Auto Instalação II
<i>Slip Ring</i>	-	anel coletor deslizante
<i>Strain gage</i>	-	extensômetro elétrico
t	-	tempo
t/D	-	espessura por diâmetro
TFE	-	tetrafluoretileno
<i>TLP</i>	-	(<i>Tension Leg Platform</i>) plataforma de pernas tensionadas

<i>TTL</i>	-	padrão de nível de voltagem de 0 a 5V geralmente nível lógico
ton.	-	tonelada
<i>USA</i>	-	(<i>United State of America</i>) Estados Unidos da América
<i>V</i>	-	<i>Volt</i>
<i>VAC</i>	-	(<i>Voltage Alternate Current</i>) voltagem de corrente alternada
<i>VDC</i>	-	(<i>Voltage Direct Current</i>) voltagem de corrente contínua
<i>VI</i>	-	(<i>Virtual Instrumentation</i>) instrumentação virtual
<i>VLA</i>	-	(Vertical Load Anchors) âncora de carga vertical
<i>VLCC</i>	-	(<i>Vary Large Crude Carrier</i>) Transportador de Material Bruto Muito Largo (navio tanque)
<i>Wheatstone</i>	-	configuração circuito elétrico para extensômetros elétricos

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	-	<i>ohm</i>
μV	-	<i>microvolt</i>
$\mu V^{\circ}C$	-	<i>microvolt por grau Celsius</i>
ηs	-	nanossegundos
σ^*	-	tensão, relação entre modelo e protótipo
ρ^*	-	massa específica, relação entre modelo e protótipo
γ^*	-	peso específico, relação entre modelo e protótipo

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

Em sistemas de exploração de óleo e gás em campos *offshore*, em sua grande maioria, até pouco tempo, eram empregadas estruturas de gravidade apoiadas em fundações diretas ou estruturas, tipo jaqueta, fixadas através de estacas em águas rasas e profundas, até cerca de 200m.

Mas, com o passar do tempo, as empresas petrolíferas passaram a explorar campos cada vez mais distantes do continente em lâminas d'água cada vez maiores em razão das descobertas de grandes reservas em águas profundas e ultra profundas (até 3000m de lâmina d'água).

Assim, se fez necessário que as empresas buscassem novas tecnologias e novos sistemas de exploração, pois em se tratando de águas profundas e ultra profundas, ficaria inviável o emprego de plataformas fixas estaqueadas, surgindo então a utilização de sistemas flutuantes com ancoragem como uma alternativa favorável.

Desta forma, foi necessário desenvolver também sistemas de ancoragem cada vez mais eficientes para suportar os esforços dos sistemas flutuantes e contribuir na diminuição do raio de ancoragem, evitando o congestionamento de cabos e correntes na região. As ancoragens desenvolvidas (Figura 1) constituem principalmente de fundações como estacas de sucção, estacas torpede e, mais recentemente, a *VLA* desenvolvida pela *Vryhof Ankers BV* denominada *Stevmantia*®. As estacas de sucção têm sido aplicadas na engenharia *offshore* já há alguns anos (Wang et al., 1978, Semper et al., 1982) em águas profundas.

Estas estacas foram desenvolvidas para serem aplicadas em águas profundas, e atualmente são utilizadas como fundações diretas para plataformas fixas em águas rasas.

Na Figura 2 é mostrada uma estrutura tipo jaqueta sendo instalada. As plataformas de auto instalação da *Suction Pile Technology* são exemplos claros de aplicação.

FIGURA 2 – INSTALAÇÃO DE PLATAFORMAS FIXAS COM ESTACAS DE SUÇÃO

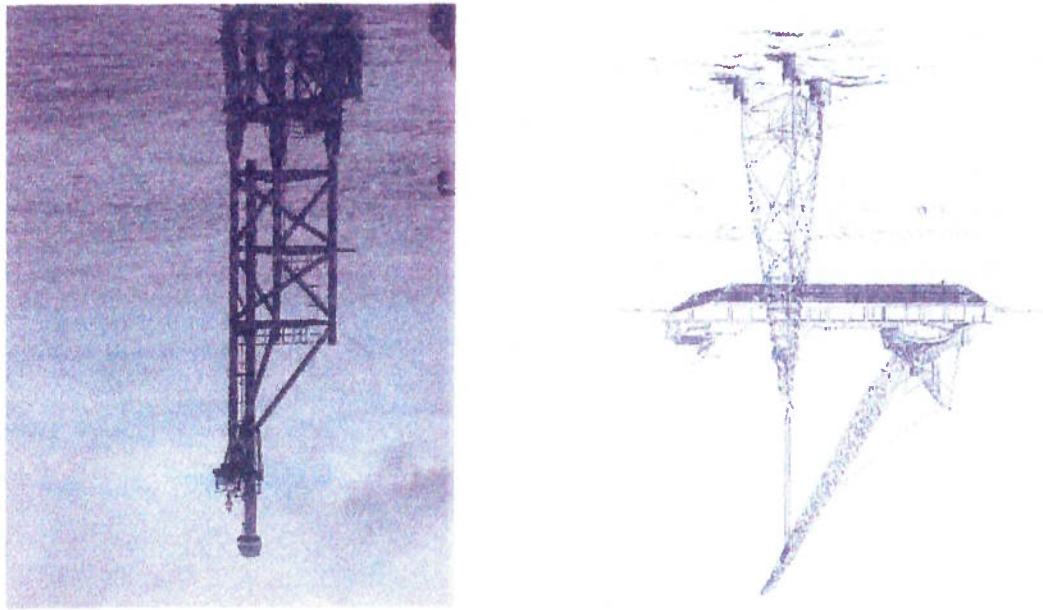
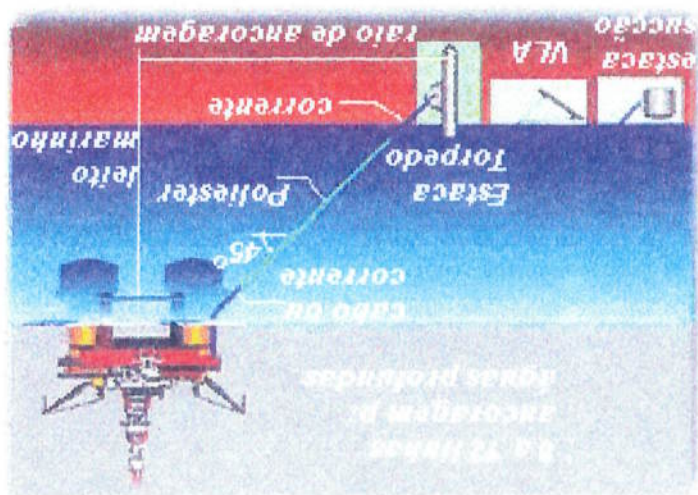


FIGURA 1 – SISTEMAS DE ANCORAGEM



Esta empresa desenvolveu duas plataformas denominadas *SIP I* e *SIP II*, além de um sistema de ancoragem que usa a mesma tecnologia de instalação de estacas de sucção.

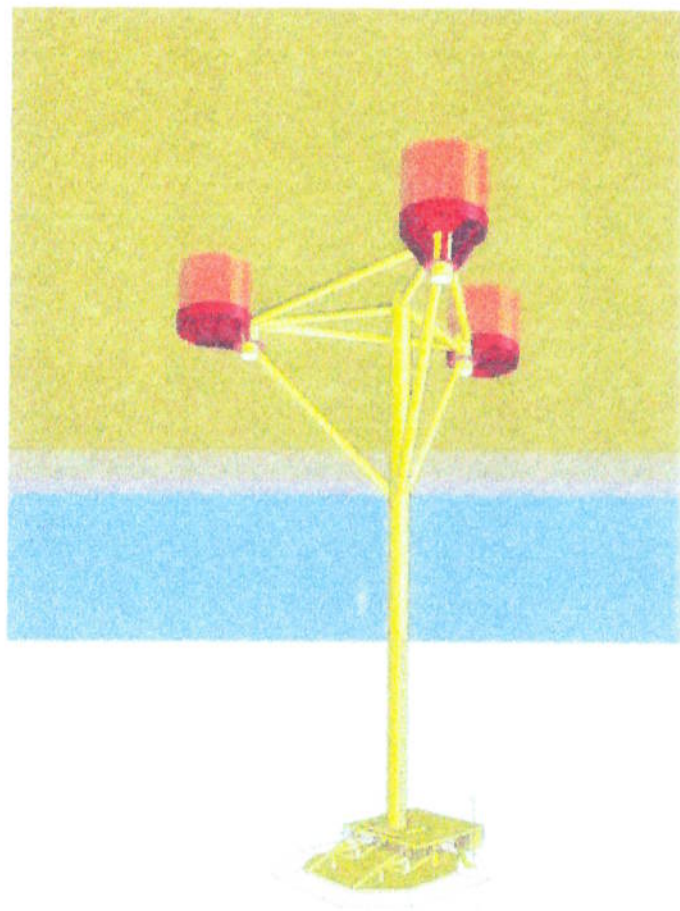


FIGURA 3 – PLATAFORMA *SIP I* DE AUTO INSTALAÇÃO

A *SIP I* é uma plataforma de auto instalação, que com o auxílio de um rebocador ou navio pode ser transportada até o local de sua instalação através de bóias flutuadoras acopladas na parte superior das estacas de sucção. A concepção desta plataforma é bastante simples: o convés está sobre uma estrutura de aço tipo jaqueta que por sua vez apoia-se sobre três estacas de sucção, Figura 3.

Quando a plataforma está posicionada no local da instalação, o sistema de bóias provisórias auxiliam no rebaixamento da estrutura e das estacas de sucção até o leito marinho. Este rebaixamento é alcançado por uma combinação de lastro e liberação

da cadeia de correntes que operam em conjunto com as bóias. Após a colocação das estacas na superfície do solo, as bóias são retiradas e em seguida procede-se à sucção para a penetração simultânea das três estacas. A outra vantagem deste sistema é que pode ser retirado e transportado para outro local. A *SIP I* pode ser instalada em locais cuja a lâmina d'água é de até 100m e o seu peso total é de 300 toneladas.

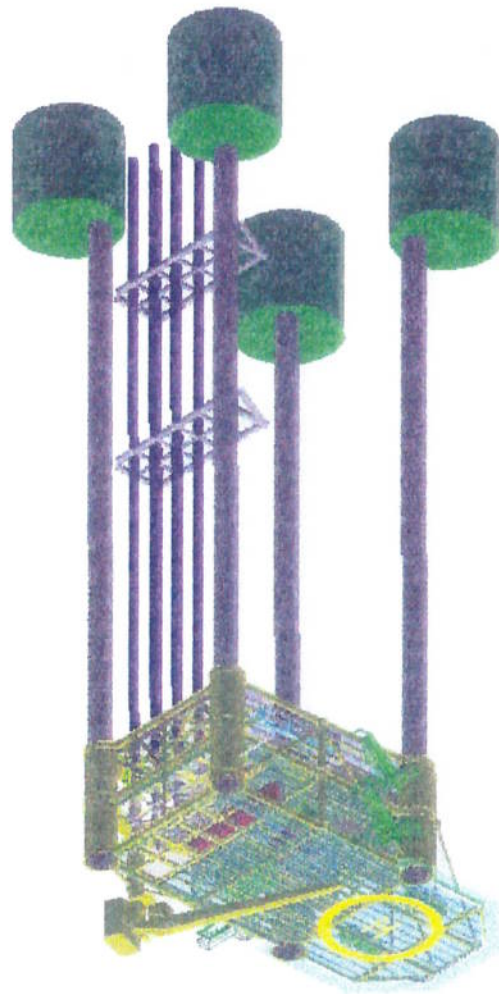


FIGURA 4 – PLATAFORMA *SIP II* DE AUTO INSTALAÇÃO

A *SIP II* é rebocada e instalada com o auxílio de uma barcaça ou balsa rebocável. Após a sua chegada no campo, as quatro pernas são rebaixadas usando uma cadeia de correntes até que as estacas se apoiem no leito marinho. A instalação das quatro estacas se dá por sucção e a penetração acontece simultaneamente. No final deste processo a balsa é retirada. A *SIP II* tem peso total de 300 toneladas e pode ser instalada em locais onde a lâmina d'água é de até 60m (Figura 4).

A *Norwegian Geotechnical Institute (NGI)*, empresa norueguesa, desenvolveu diversas geometrias de estacas de sucção empregando materiais como o aço e o

desenvolvidos e bastante difundidos (www.suctionpile.com).

Em águas profundas as estacas de sucção são largamente empregadas principalmente no Mar do Norte e no Golfo do México, onde diversos trabalhos de pesquisas foram

instalações na Figura 5.

9,5m de profundidade em lâminas d'água de 36m, podendo ser observado uma destas 115m em média, e várias plataformas *SIP II* com quatro estacas de 7m de diâmetro e diâmetro e 5,5m de profundidade em cada plataforma, sendo a lâmina d'água de plataformas *SIP I* nos campos de Angola contendo 3 estacas de sucção de 5m de 9m de profundidade em cada plataforma. Entre 1998-1999 foram instaladas diversas 1997, num total de 3 plataformas com quatro estacas de sucção de 9m de diâmetro e em campos petrolíferos nos países baixos, em

FIGURA 5 – INSTALAÇÃO DE PLATAFORMA *SIP II* EM ANGOLA - ÁFRICA



concreto para serem utilizadas no Mar do Norte, Golfo do México, Mar da Noruega e vários países da África. Esta empresa também desenvolveu estacas de sucção no Brasil, ressaltando o reforço da fundação do emissário submarino com diâmetro de 2 metros na praia de Ipanema - Rio de Janeiro, e ancoragem para sistemas flutuantes como os P19, P26, P33 e P35 (www.ngi.no/english/default.htm).

A P19, Figura 6, é uma plataforma que usa integração de cabos de políester e estacas de sucção. Esta plataforma é uma unidade flutuante, convertida para produção a partir de uma plataforma de perfuração semi-submersível, instalada no Campo de Marlim, localizada a nordeste da Bacia de Campos, à distância de 105km da costa, onde a profundidade da água alcança 700m.

É ancorada por sistemas de pernas atriantadas com 16 cabos de políester e estacas de sucção. O seu deslocamento é de 35.000 toneladas e as medidas máximas de seu convés são de 77x65m.

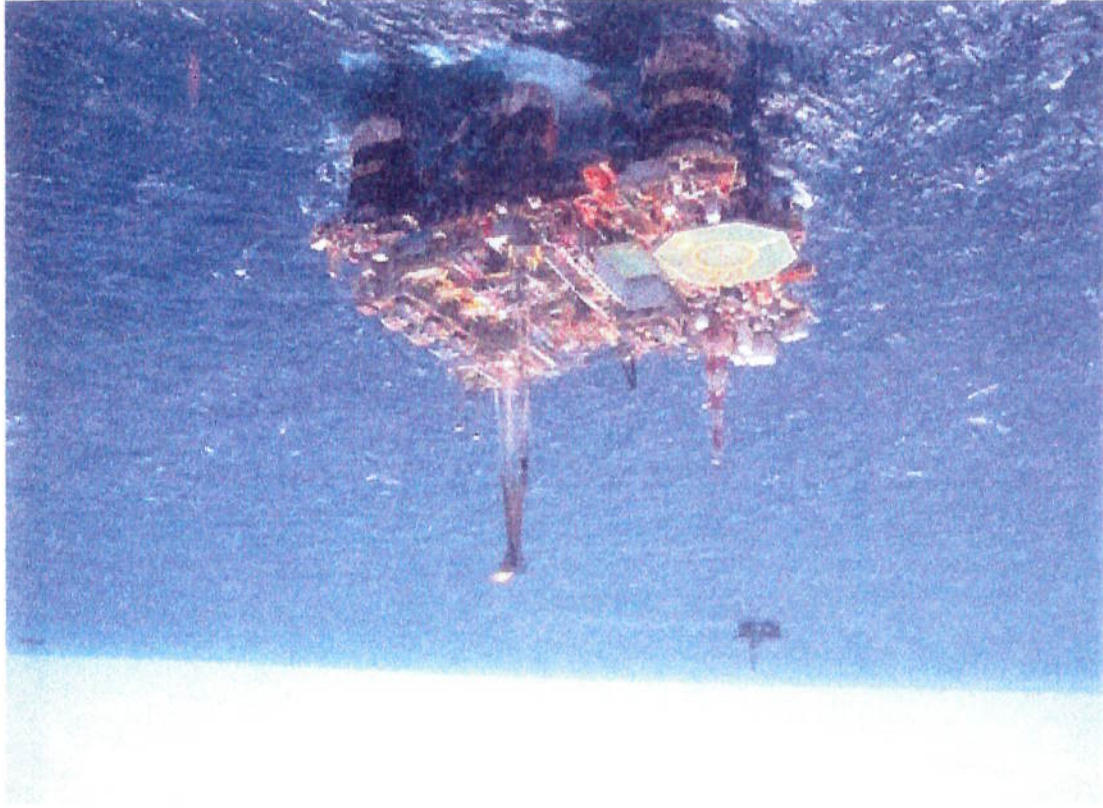


FIGURA 6 – PLATAFORMA FLUTUANTE P19 USA ESTACAS DE SUCCÃO

Esta plataforma é a segunda a ser ancorada com sistema de pernas atrintadas utilizando 16 linhas, compreendendo linhas de ancoragem, cabos de políester e estacas de sucção.

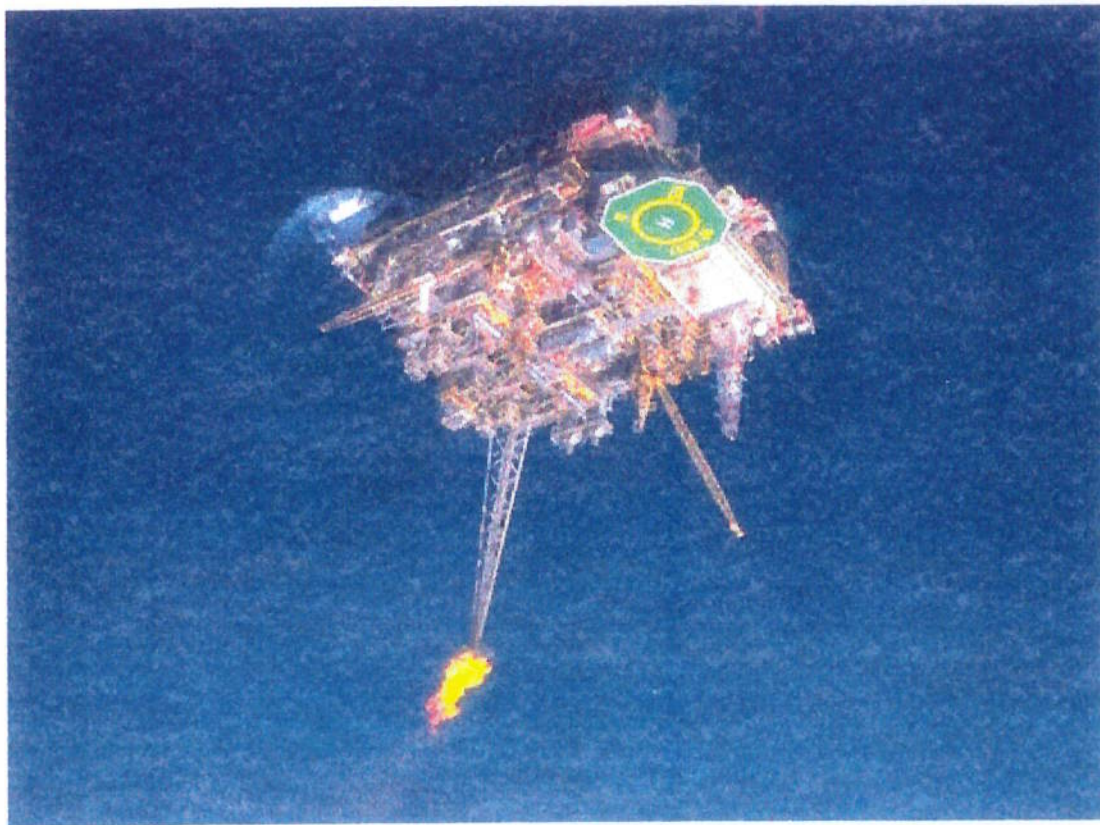
75x75m.

O seu deslocamento é de 35.000 toneladas e as medidas máximas do convés são de

A P26 é uma plataforma semi-submersível, de casco duplo, estabilizada por seis colunas verticais, reforçadas por pontões e tirantes transversais.

A P26 na Figura 7, também é uma plataforma que usa estacas de sucção como sistema de ancoragem, sendo uma plataforma de produção instalada no Campo de Marlim localizada a nordeste da Bacia de Campos, a distância de 120km da costa, onde a profundidade da água alcança 990m. Esta unidade é uma unidade flutuante que foi convertida para produção a partir da sonda semi-submersível "Illiad".

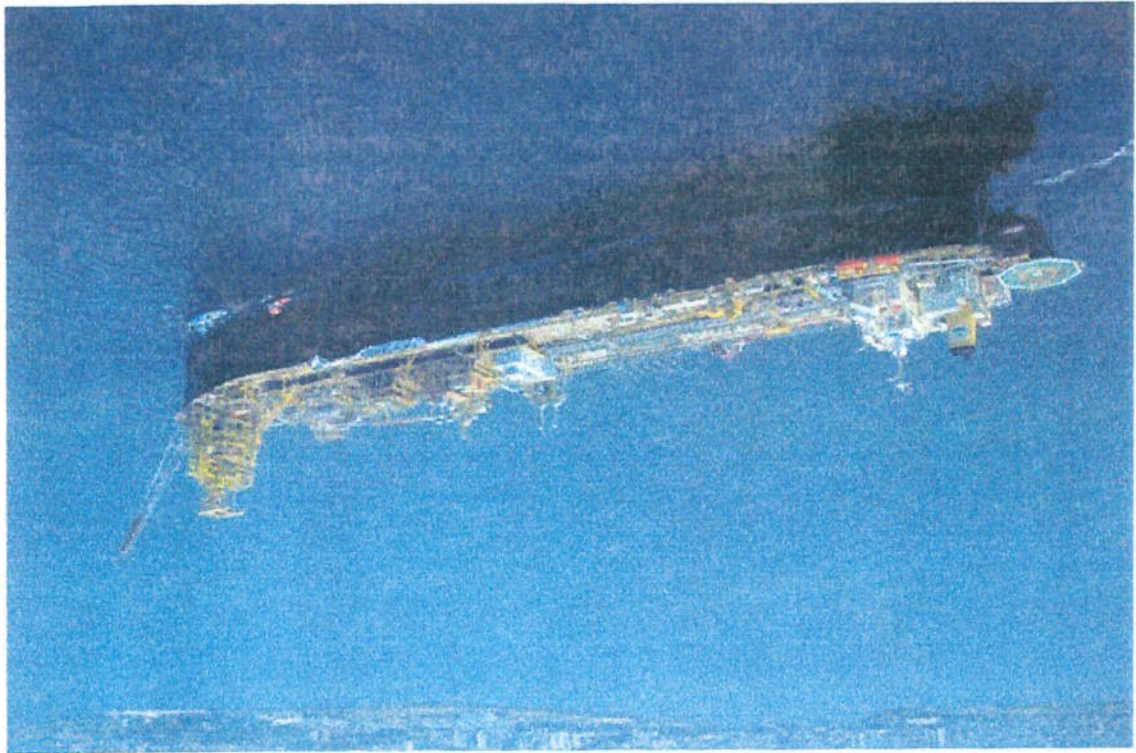
FIGURA 7 – PLATAFORMA FLUTUANTE P26 USA ESTACAS DE SUCCÃO



O P33 é um navio FPSO, Figura 8, instalado no Campo de Marlim ao nordeste da Baía de Campos, à distância de 100km da costa, onde a profundidade da água atinge 780m. O P33 foi convertido para produção a partir do navio WLC "Henrique Dias". O P33 é um FPSO de casco único, deslocamento de 322.000 toneladas, equipado com *turret* interno, cones medindo 320x54m e usa estacas de sucção em lugar de estacas convencionais, o que reduz o raio de ancoragem.

O P35, Figura 9, é um navio FPSO instalado no Campo de Marlim, localizado a nordeste da Baía de Campos, à distância de 115km da costa, onde a água alcança uma profundidade de 850m. Este FPSO foi convertido para produção a partir do WLC "José Bonifácio" e é um mono casco, deslocando 322.000 toneladas, com *turret* interno para conexão dos *risers* de produção. O cones mede 320x54m. O P35 tem o maior *turret* do mundo, usa estacas de sucção em lugar de âncoras, com redução do raio de ancoragem (www2.petrobras.com.br).

FIGURA 8 – NAVIO FPSO P33 USA ESTACAS DE SUÇÃO



Devido ao uso frequente deste tipo de estacas em sistemas *offshore*, verificam-se atualmente vários programas de pesquisas para investigação da capacidade de carga, pesquisas para observar o comportamento destas estacas durante a sua instalação e a interação destas estacas com o solo marinho submetidas a esforços provenientes dos sistemas flutuantes. A Figura 10 ilustra uma estaca de sucção sendo instalada. Alguns dados foram obtidos durante a sua instalação *in locu*, porém, não têm sido suficientes para uma boa investigação, pois, além da instrumentação atrapalhar na operação, é cara.

FIGURA 9 – NAVIO *FPSO P35 USA* ESTACAS DE SUCCÃO

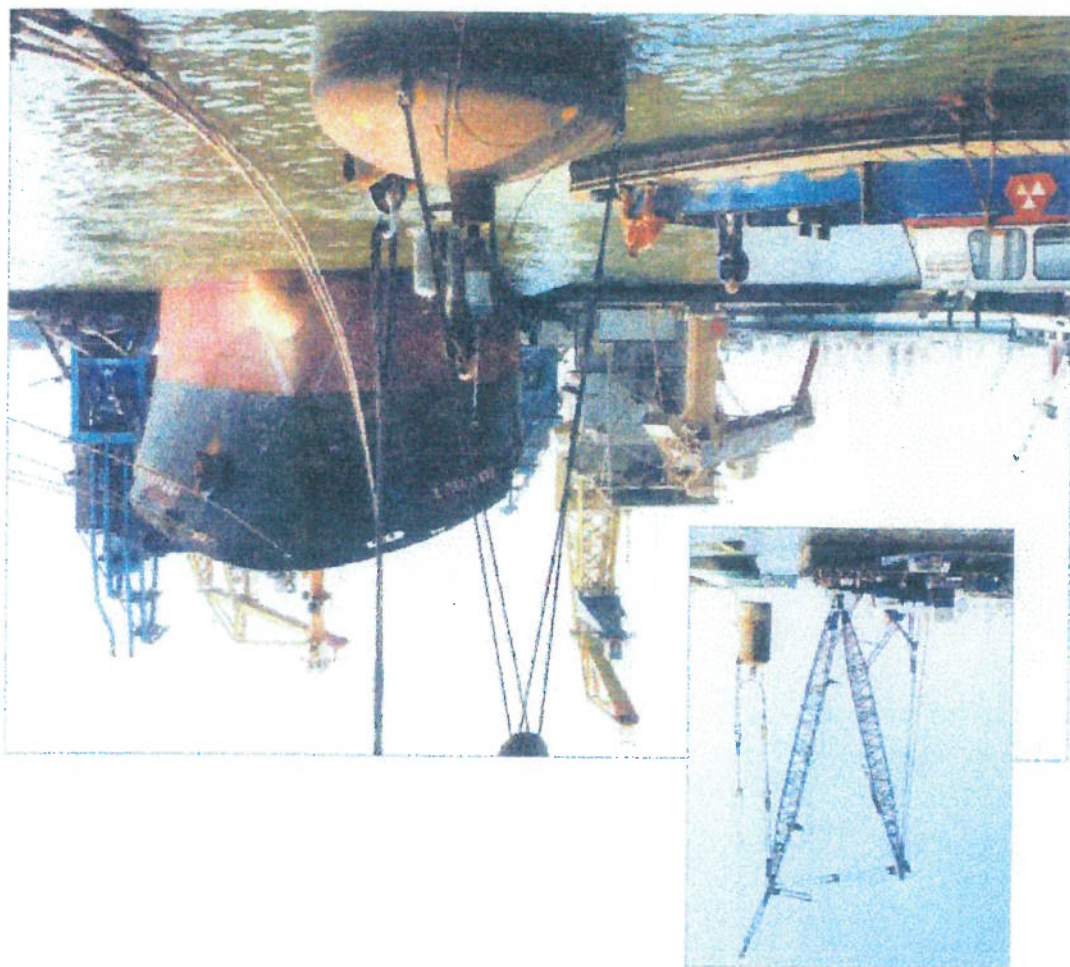


Porém, na modelagem matemática ocorrem dificuldades na definição de parâmetros dos solos, pois estes possuem comportamentos não lineares. A validação de uma

O rápido desenvolvimento dos computadores vem contribuindo há mais de duas décadas na evolução da engenharia. Diversos programas de modelagem matemática tem sido desenvolvidos para prever o comportamento de estruturas geotécnicas principalmente em casos aplicados na engenharia *offshore*.

Por outro lado, vários estudos têm sido feitos, simulando estes fenômenos em laboratório, pela modelagem matemática e/ou física. Na modelagem física convencional, é necessária a redução de escala, e depara-se com dificuldades na interpretação dos parâmetros das tensões e das deformações, pois não há correspondência direta entre o modelo e o protótipo.

FIGURA 10 – INSTALAÇÃO DAS ESTACAS DE SUCCÇÃO “IN LOCU”



hipótese assumida durante o desenvolvimento de um programa computacional é importante na área da engenharia geotécnica devido principalmente a complexidade do comportamento dos solos.

Porém a escassez de informações quando do acompanhamento, bem como dos fenômenos naturais tem dificultado a análise através da modelagem matemática. Com a tecnologia de centrífugas foi possível a melhoria na obtenção e definição de parâmetros utilizados na previsão por modelagem matemática (www.engr.mun.ca/~ccore/cgs/MAIN.HTM). Mais adiante, no Capítulo 4, serão abordadas as vantagens e as desvantagens na utilização de modelagem reduzida em centrífugas.

CAPÍTULO 2 - HISTÓRIA DAS CENTRÍFUGAS

O equipamento de centrifugação empregado em geotecnia é relativamente antigo. Foi apresentado pela primeira vez em uma Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Fundações, em 1936, em Cambridge.

Depois de duas décadas e meia, engenheiros e cientistas russos desenvolveram estudos com este tipo de equipamento. Os americanos optaram em avançar mais nas modelagens matemáticas, passando a desenvolver trabalhos de modelagem física, empregando centrifugas, no início de 1970. Contudo, diversos trabalhos foram realizados na década de 60 em diversos países, notadamente no oeste europeu e no Japão (Yim Ko, 1988). Schofield (Basset; Craig, 1988) foi o primeiro a utilizar esta técnica na Inglaterra, na Universidade de Cambridge, e no Japão, o primeiro foi Mikasa da Universidade Cidade de Osaka (Kimura, 1988).

A partir do início da década de 80 passou a existir um aumento significativo no uso de centrifugas, principalmente pela compreensão dos princípios básicos envolvidos (Schofield, 1988). A instituição do Comitê Técnico (TC2) da ISSMGE sobre Centrifuga em 1982, propiciou diversas conferências internacionais sobre este tema, resultando em dezenas de artigos técnicos.

A conferência internacional intitulada "Centrifuge 91" realizada em Boulder, Colorado - USA, foi a primeira das inúmeras iniciativas da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, seguindo-se outra conferência "Centrifuge 94", realizada em Singapura em agosto de 1994, a conferência "Centrifuge 98", realizada em Tokyo - Japão e a realização da Conferência Internacional de Modelagem Física em Geotecnia no Canadá em 2002.

O grande aumento do emprego de centrifugas, atualmente, se dá pelo fato de possibilitarem avaliar melhor o complexo comportamento dos solos no sentido de aferir e validar as previsões e projetos resultantes da modelagem matemática.

Outra justificativa para o aumento significativo vem das obras de grande porte, onde seria desejável a construção de protótipos em escala natural para obtenção de dados confiáveis, que na maioria dos casos é inviável por razões de custo e tempo.

Atualmente o uso de centrífugas é uma técnica corrente no mundo, existindo mais de 100 máquinas em pleno funcionamento conforme último censo realizado em 1998 e divulgado pela ISSMGE (www.engr.mun.ca/~ccore/cgs/cents.htm), sendo assim constituídos:

- Austrália, Brasil, Dinamarca, Índia, Itália, Coreia, Portugal e Singapura (1);
- Alemanha, França e Israel (2);
- Holanda (3);
- Canadá (4);
- Inglaterra (6);
- China e Rússia (12);
- Estados Unidos da América (21);
- Japão (38);

A configuração destas máquinas em geral tem movimento horizontal e se dá em um plano perpendicular ao eixo vertical de rotação. Existem outros tipos de configuração nas quais o eixo de rotação é horizontal (o movimento dos modelos se dá no plano vertical), ou aquelas que podem operar nos dois planos. São constituídas ainda por braços giratórios acoplados a um eixo possuindo em suas extremidades caixas *container* onde os modelos são acomodados, ou uma caixa *container* com o modelo e a outra como contrapeso no lado oposto.

Estes *containers* são geralmente retangulares e o eixo é movimentado por um motor controlado por sistema eletrônico de rotações com um mecanismo de freio, que auxilia nos controles dos movimentos. Por segurança, estes *containers*, os braços e o eixo são envolvidos por caixas circulares em aço ou então são instalados em salas especiais *bunkers*, geralmente abaixo do solo, onde o operador observa o movimento de modo remoto. O eixo gira os braços em velocidades que permitem atingir

acelerações da ordem de 200 a 300 vezes a força da gravidade, dependendo da capacidade do equipamento.

A nomenclatura usual para indicar a capacidade das centrífugas é expressa em (g ton), que representa a capacidade de aceleração máxima (g) multiplicada pelo peso do *container* com o modelo, instrumentação e atuadores (ton).

Algumas centrífugas são apresentadas neste trabalho, sendo a Figura 11 uma centrífuga da Universidade de *Davis*, Califórnia – *USA*, que possui um braço de 9,10 metros de diâmetro, o peso máximo no *container* é 4,5 toneladas (44kN), a aceleração atinge 50g e a capacidade máxima é de 225g ton (www.engr.ucdavis.edu/~cgm/).

A Figura 12 mostra uma centrífuga da *Delft Geotechnics*, Holanda, sendo o braço de 6 metros de diâmetro, peso máximo no *container* de 5 toneladas (49kN), aceleração máxima de 300g e a capacidade máxima é de 1500g ton. (www.geodelft.nl).

A Figura 13 é a centrífuga do Laboratório *Central des Ponts et Chaussées*, na França, sendo o braço de 1,80 metros, o peso máximo no *container* é de 0,2 toneladas (2kN), a aceleração máxima é de 200g e a capacidade máxima é de 40g ton. (www.lcpc.inrets.fr).

A Figura 14 é a centrífuga do *Public Research Institute*, no Japão, onde o braço atinge 6,6 metros de diâmetro, o peso máximo no *container* é de 5 toneladas (49kN), a aceleração máxima atinge 150g e a capacidade máxima é de 750g ton. (geotech.cv.titech.ac.jp).

FIGURA 12 - CENTRIFUGA DELFT GEOTECHNICS NA HOLANDA

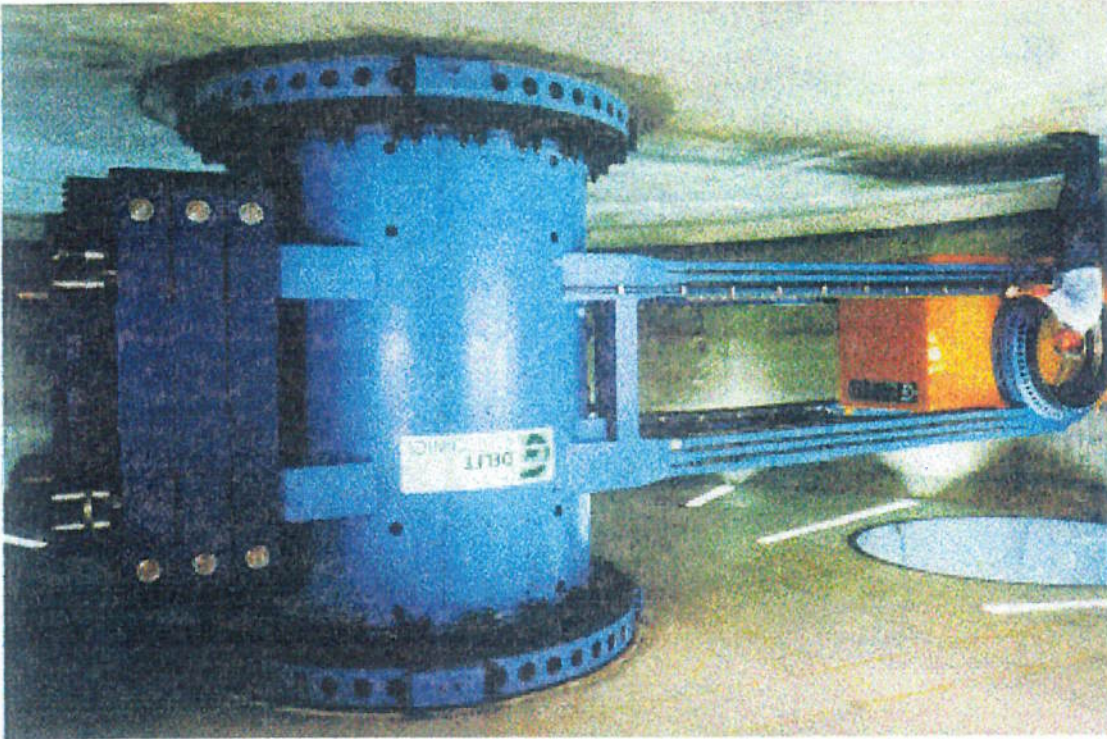


FIGURA 11 - CENTRIFUGA - UNIVERSIDADE DA CALIFORNIA, DAVIS - USA

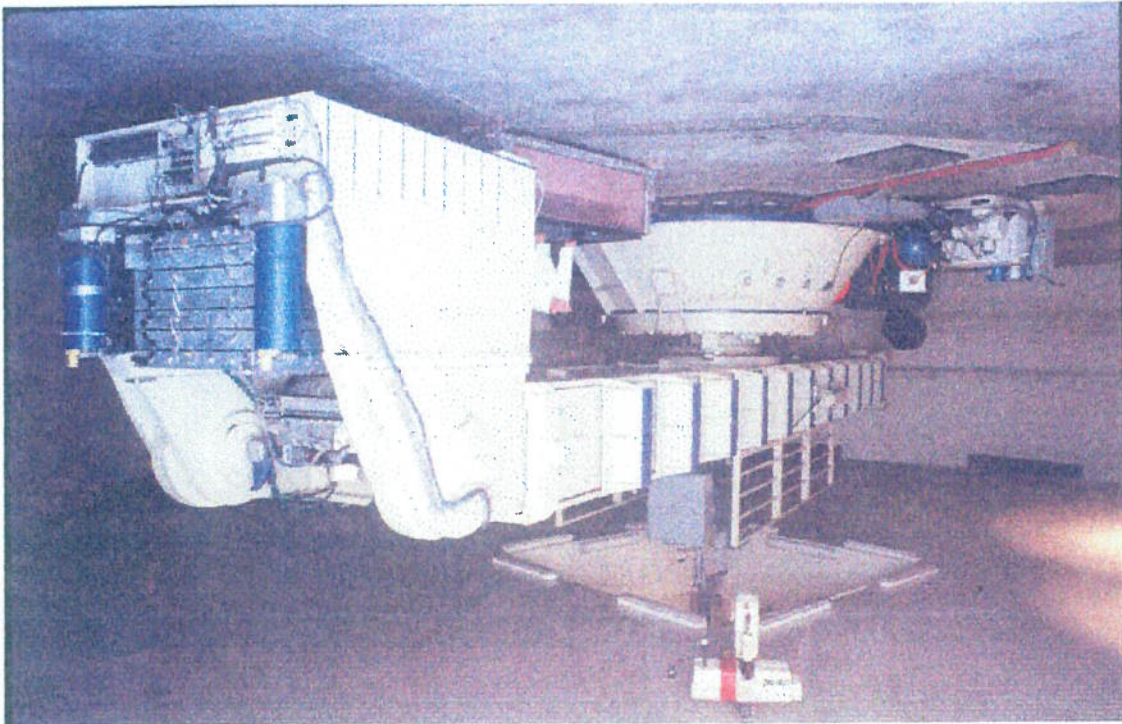
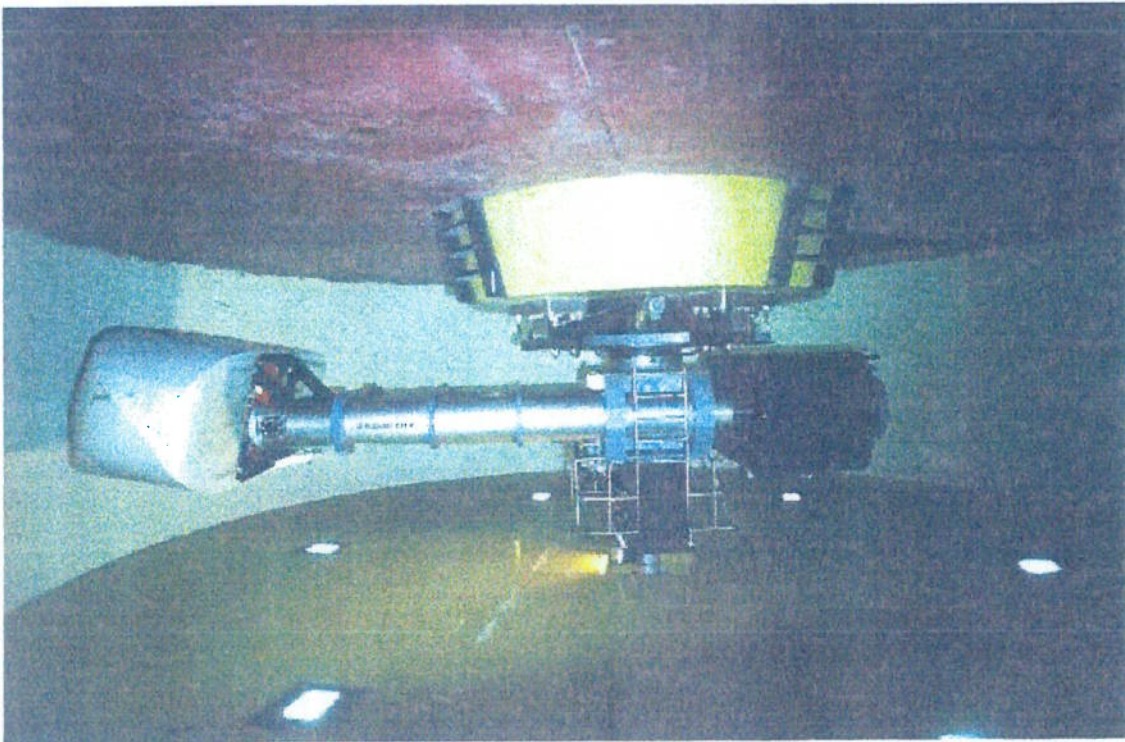


FIGURA 14 - CENTRIFUGA DA PUBLIC WORKS RESEARCH INSTITUTE - JAPÃO



FIGURA 13 - CENTRIFUGA DO LABORATÓRIO CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES - FRANÇA



CAPÍTULO 3 - CENTRÍFUGA IPT/FAPESP

3.1.Introdução

O projeto de desenvolvimento da centrífuga para ensaios de modelos geotécnicos reduzidos, teve início em 01 de maio de 1993 e término em 30 de setembro de 1996 no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. com o apoio financeiro parcial da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Na sua concepção, o projeto contou com consultoria do Prof. Naotoshi Takada, da Universidade da Cidade de Osaka - Japão. O projeto mecânico absorveu cerca de dois anos para conclusão, enquanto o projeto do sistema de controle e aquisição de dados, cerca de um ano e cinco meses, considerando-se a aquisição dos equipamentos e componentes, testes e aperfeiçoamento do conjunto. O projeto do desenvolvimento desta centrífuga foi apresentado de forma pioneira no país no X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, em Foz do Iguaçu (Niyama et al., 1994).



FIGURA 15 – CENTRÍFUGA IPT/FAPESP

A inauguração da centrífuga ocorreu em 28 de agosto de 1996, durante o evento II INFOGEO - II Congresso de Informática em Geotecnia, contando com a presença da Diretoria Executiva do IPT, Presidência da Fapesp, e equipe executora do projeto. A centrífuga encontra-se instalada num laboratório especialmente preparado para acomodá-la, e atualmente está em operação (Figura 15). Alguns trabalhos já foram realizados com a centrífuga IPT/FAPESP, ressaltando dois, o primeiro denominado "Modelo Reduzido de Túneis Urbanos", cujo o estudo avaliou o processo do colapso da frente de avanço de túneis em areia. O objetivo foi conhecer a mínima pressão necessária a ser aplicada, por ar comprimido ou lama bentonítica, na frente de avanço do túnel para que a mesma não se instabilizasse. Este trabalho resultou em uma dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia na EPUSP, no Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, cujo título foi "Modelagem em Centrífuga – um caso de aplicação a estabilidade de frente de túneis" (Silmara, 2000).

O segundo trabalho denominado "Modelo Reduzido de um Talude de Barragem", estudou a deformabilidade do maciço do aterro reforçado com geossintético, da barragem de Porto Primavera, no interior de São Paulo. Simulando desde a construção do maciço reforçado, e o enchimento do reservatório em duas etapas, o trabalho resultou em um relatório técnico e vários artigos, sendo apresentado um deles no *XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, em 1999, Foz do Iguaçu - Brasil, com o título "Behaviour of a *Submersed Reinforced Soil Slope in the Centrifuge*" (Abramento et al., 1999).

3.2. Características Mecânicas

As principais características do equipamento são a seguir descritas, conforme já apresentadas nos relatórios para a FAPESP (1997) e IPT (1997):

- *Diâmetro Nominal:* 1,50 m
- *Aceleração Máxima:* 200 g
- *Capacidade Máxima do Cesto:* 50 kg (0,5 kN)
- *Rotação Máxima:* 451 rpm

O braço da centrífuga (Figura 16) é simétrico em relação ao seu eixo de rotação (sentido vertical fixo). A carcaça fica suspensa a 38 cm do chão e fixada sobre uma estrutura metálica, que por sua vez fixa-se ao chão através de chumbadores e placas de neoprenes para isolamento ativa das vibrações.

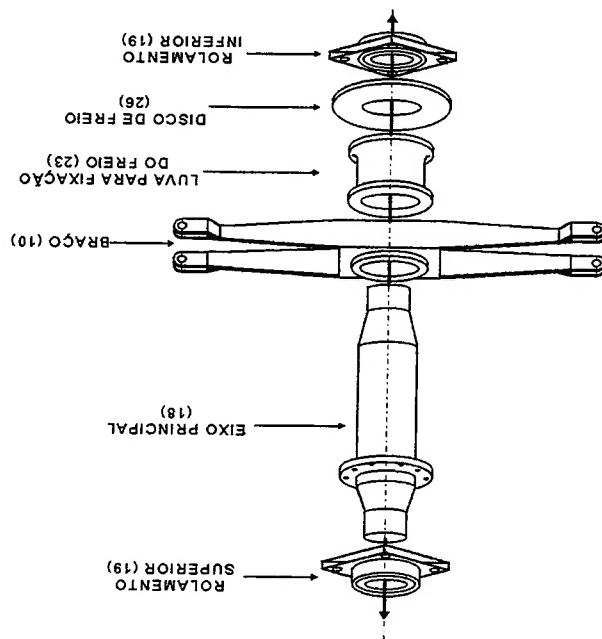


FIGURA 16 - EIXO CENTRAL DA CENTRÍFUGA

As paredes laterais da centrífuga foram projetadas em chapa de aço SAE-1020 de 1/4" e, internamente, estas paredes são preenchidas com areia, a fim de aumentar a inércia, diminuindo as vibrações durante seu funcionamento. Em condições normais de ensaio, a centrífuga trabalha balanceada, isto é, com uma mesma quantidade de massa colocada nas extremidades do braço em posição simétrica em relação ao seu eixo de rotação.

As dimensões dos cestos são de 250x300x130mm, construídos em aços SAE 1020 de 2mm, e SAC 50 1/4". O braço foi projetado de forma a apresentar um perfil fechado, conferindo-lhe maior rigidez torcional e lateral. Para garantir uma perfeita concentricidade e perpendicularidade dos componentes móveis em relação ao eixo de rotação, a montagem se dá inteiramente sobre um eixo tubular, com encaixes sobre

• Capacidade:

10 g. ton

ele na forma de "luvas". O acionamento da centrífuga é feito através de um motor *AC* de 4 pólos, 3 CV, 220 V, trifásico, controlado por um inversor de frequência. A transmissão da potência do motor para o eixo principal se dá através de correias. O motor é fixado a uma estrutura basculante e pode ser regulada por um eixo rosqueado à estrutura principal, ajustando-se a tensão da correia.

3.3. Características Elétricas

O sistema de controle e aquisição de dados de instrumentação desenvolvidos para realização dos ensaios na centrífuga, compreende diversos módulos e subsistemas, cujo aspecto esquemático pode ser visto de forma geral na Figura 17. O sistema de controle e aquisição de dados de instrumentação da centrífuga é basicamente constituído de:

- Sistema de controle central;
- Subsistema de aquisição de dados de instrumentação;
- Subsistema de controle de rotação da centrífuga;
- Subsistema de aquisição e tratamento de imagens.

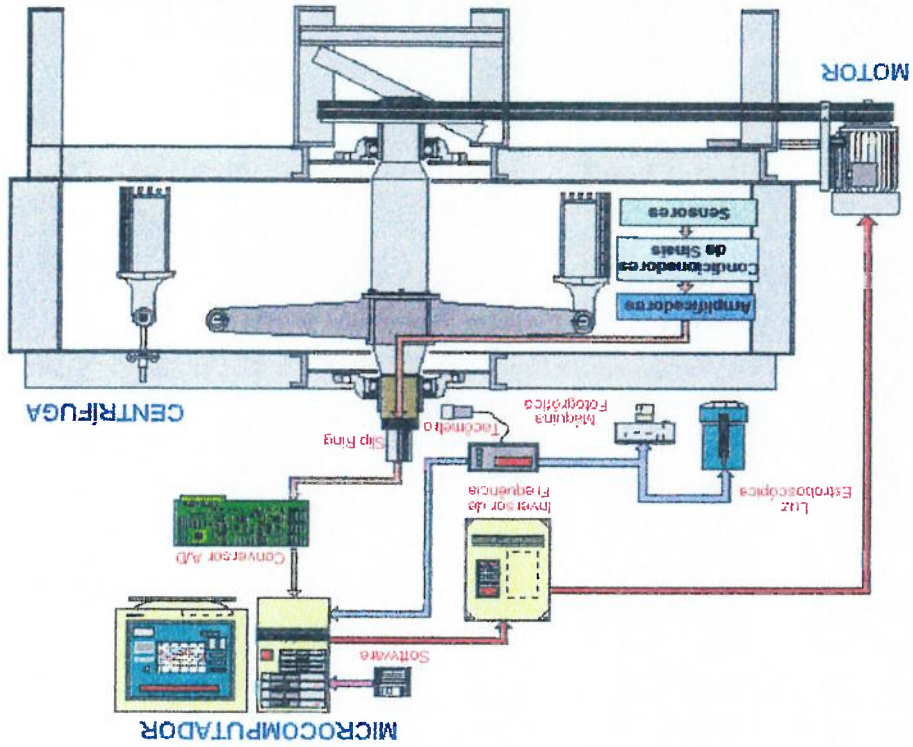


FIGURA 17 - ESQUEMA GERAL DOS SISTEMAS DA CENTRÍFUGA IPT/FAPESP

O sistema de controle central da centrífuga é constituído de um microcomputador do tipo PC, cuja configuração actual é de um *Pentium MMx* de 166MHz, com 32Mb de memória RAM, uma *winchester* de 540Mb, e periféricos, onde são acoplados os componentes de outros subsistemas a saber:

- Placa conversora analógico – digital e o bastidor ou chassis SCXI, do subsistema de aquisição de dados,
- Placa controladora do scanner e a porta serial da mesa digitalizadora do subsistema de aquisição e tratamento de imagens,
- Porta serial para controle do inversor de frequência e do tacômetro do subsistema de controle de rotação da centrífuga.

Neste computador encontra-se instalado o *software* de gerenciamento do sistema de aquisição de dados de instrumentação denominado *LabVIEW*, além de outros programas que servem de ferramenta para análise, tratamento e elaboração de relatórios de ensaios.

3.5.Subsistema de Aquisição de Dados de Instrumentação

O subsistema de aquisição de dados de instrumentação engloba diversos tipos de sensores, condicionadores de sinais, amplificadores, multiplexador e conversor analógico/digital. Os sensores para medição de diversas grandezas físicas são instalados nos cestos, sendo que a instrumentação é variável, conforme o tipo de ensaio a ser realizado.

Atualmente a maioria dos sensores que são utilizados é baseada em extensômetros elétricos.

Os módulos de tratamento e condicionamento de sinais são instalados em um barramento analógico interno à centrífuga, e para direccionar os sinais da

instrumentação emprega-se um *slip ring* eletrônico. Estes sinais de saída são enviados a um barramento externo e, posteriormente, a um conversor analógico/digital.

A alimentação dos módulos de tratamento e condicionamento de sinais é fornecida por uma fonte chaveada estável, instalada no interior da centrífuga, à qual está conectada à rede 110/220V através de um *slip ring* elétrico.

3.5.1. Módulo de Tratamento e Condicionamento de Sinais

O módulo de tratamento e condicionamento de sinais *IB31AN* da *Analog Devices* é constituído de um amplificador de tensão de alta precisão, de um filtro passa-baixa ajustável de 2 pólos que trabalha numa faixa de 10Hz à 20KHz, onde são acoplados sensores baseados em *strain gage* e de uma excitação ajustável para os transdutores. O condicionador de sinais pode ser utilizado para medidas de diversas grandezas físicas, tais como deformação, torque, aceleração, vibração, pressão, etc, sendo necessária a conexão de sensores adequados em função dos parâmetros que se pretende monitorar.

Devido ao rápido tempo de resposta (2ms), o condicionador de sinais é mais indicado para monitoração de eventos dinâmicos, podendo ser utilizado em eventos estáticos, sendo necessária a redução da faixa de frequência de operação, através de um filtro conectado à placa.

O condicionador de sinais *IB31AN* é baseado em um amplificador de 2 estágios, com regulação de tensão. O amplificador de instrumentação possui características de baixo ruído, baixo nível de resposta (até 2mV de fundo de escala), eliminando uma alta tensão de modo comum ($\pm 9,5V$).

O ganho do amplificador é programável por meio de resistores e o fator de amplificação pode variar de 1 a 2500 vezes em relação ao sinal de saída do elemento sensor.

Foram previstos no projeto, ganhos de 100, 300, 500, 1000 vezes e uma última opção *gain user*, que garante a programação de outros ganhos, caso os ganhos descritos não sejam suficientes ou sejam altos demais.

Foi ainda prevista uma saída não filtrada para o caso de medidas de vibração e torque, em que se necessita de um sinal não filtrado. Para a utilização destes sinais é necessário um cabo *BNC* específico com inversão de polaridade. O sinal pode ser também alimentado por um filtro *Butterworth* de 2 pólos. Este filtro é ajustado para operação a 1kHz, o qual pode ser decrescido até 10Hz ou aumentado até 20kHz.

O estágio de excitação da ponte de *Wheatstone* é uma saída ajustável, possuindo uma fonte regulada com voltagem interna de referência de 6,8V. Esta excitação pode variar de 4 a 15 V através de um potenciômetro de ajuste.

Este estágio possui a tecnologia de sensoramento remoto que faz com que a excitação da ponte não varie em função do comprimento do cabo dos elementos sensores, ou seja, a fonte regulada compensa a queda da excitação devido ao acréscimo da resistência do cabo.

Porém, para utilização desta característica é necessário que os sensores possuam uma configuração de 6 fios, pois permitem a monitoração desta tensão através de um *loop* de realimentação. Para aplicações com configuração de ½ ponte, pode-se conectar um par casado de filmes finos de 20k Ω nas saídas da excitação.

Esta característica permite a utilização de sensores numa configuração de ponte completa ou ½ ponte, sem a necessidade da utilização de resistores externos para completar o circuito.

• Especificações Técnicas

Ganho: 100, 300, 500, 1000 ou ajustável pelo usuário até o ganho de 2500 vezes.

Drift:

$\pm 0,25 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Ruído:

0,3 μV pico a pico.

Não Linearidade:

$\pm 0,005\%$ máximo.

CMR:

140 dB mínimo.

Alimentação da ponte:

programável de 4 a 15V.

Filtro Passa Baixa:

programável de 10Hz a 20KHz.

Impedância de Entrada:

Modo Diferencial 1G Ω //4pF

Corrente de Saída:

$\pm 5\text{mA}$

Impedância de Saída:

0,5 Ω .

Slew Rate em Resposta Dinâmica:

2ms.

Resistências Nominais Compatíveis:

120 Ω ou 350 Ω .

Temperatura de Operação:

-40 $^\circ\text{C}$ a 85 $^\circ\text{C}$.

Corrente de Saída p/ Alimentação da Ponte:

100 mA máximo.

• Sensoriamento Remoto

A tecnologia de sensoriamento remoto, embutida no circuito, consiste basicamente na monitoração da tensão de alimentação da ponte através de um *loop* de realimentação, o que faz com que esta tensão não se modifique em função do comprimento do cabo do elemento sensor. Quando o comprimento do cabo do elemento sensor é muito longo, sua resistência (R_c) somada à resistência nominal do extensômetro (R_g) resultará numa redução da sensibilidade (K) do sensor, sendo um problema muito sério em instrumentação.

O recurso do sensoriamento remoto permite que a introdução desta resistência do cabo (R_c) não altere a sensibilidade do elemento sensor, através de uma compensação eletrônica realizada através do *loop* de realimentação.

- **Configuração dos Canais no Barramento de Dados**

No projeto do condicionador de sinais previu-se um barramento de dados onde se pudesse realizar o endereçamento de canais. A placa foi projetada de forma a obter um módulo condicionador para até 16 canais.

Pode-se utilizar um dos 16 canais (0 a 15) para transportar os sinais de saída dos sensores ao barramento de dados, conectando o *jumper* correspondente ao canal desejado, o sinal de saída do sensor será enviado a este canal do barramento.

3.5.2. *Ship Ring* (Elétrico e Eletrônico)

Para haver comunicação com a instrumentação no interior da centrífuga tais como alimentação, controle, e aquisição de dados, são empregados dois *ship ring*, sendo um mais robusto, construído no próprio IPT, para alimentação de 110/220VAC da fonte chaveada, e outro para transmissão de sinais, fornecido pela *Michigan Scientific Corporation (USA)*.

A seguir serão descritas as principais características e o princípio de funcionamento destes componentes.

- ***Ship Ring* Elétrico**

Este componente está sendo empregado para transmitir energia elétrica de 110/220 VAC para uma fonte chaveada que gerará tensões de $\pm 15VDC$ e para alimentar os condicionadores de sinais e servo motores. Ele é constituído de:

- 4 (quatro) anéis coletores de latão;
- 4 (quatro) escovas de carvão para contato fixo;
- separadores isolantes de celeron;
- suporte giratório de latão;
- suporte fixo de celeron; e
- luva isolante.

A capacidade deste coletor *ship ring* é de 4 canais de transmissão, sendo atualmente empregados apenas três deles para fornecer terra, fase e neutro. Este aparelho é instalado na parte superior do eixo central da centrífuga, sendo que sua base giratória é engastada por parafusos à superfície superior do eixo enquanto o suporte fixo deste coletor é preso por garras acopladas na carcaça da centrífuga. A configuração atual dos canais utilizados está descrita na Tabela 1:

TABELA 1 – CONFIGURAÇÃO DOS CANAIS DO “SLIP RING” ELÉTRICO

SLIP RING	Preto
	Vermelho
	Verde
CABO REDE ELÉTRICA	preto (neutro)
	amarelo/verde (terra)
	Marrom (fase)

Não se tem dados técnicos quanto a capacidade de energização dos anéis coletores, vida útil, número de ciclos e etc. Por se tratar de um protótipo, não foram realizados testes para determinação destes parâmetros.

• **Slip Ring Eletrônico**

O *ship ring* eletrônico modelo SR36M, da *Michigan Scientific Corporation (USA)*, é um componente usado para conexões eletrônicas envolvendo eixos em movimento. Cada conexão usa um anel.

A porção estacionária do *ship ring* possui escovas condutivas que ficam em contato com os anéis. O *ship ring* é um equipamento capaz de girar até 10.000 rpm, à uma faixa de temperatura de -5 °C à 120 °C. A vida útil de seus contatos chega a 400 milhões de rotações. Ele pesa 115 gramas e mede 11cm de altura por 4,5 cm de largura e é protegido por um revestimento de aço inoxidável. Existem 3 tipos básicos de *ship ring*, o utilizado na centrífuga possui trinta e seis anéis de liga metálica e escovas de contato. São excelentes para estabelecer contatos de materiais à baixas velocidades de rotação. São compactos e não requerem qualquer manutenção.

• **Considerações Técnicas**

A maioria dos sensores usados com *slip ring* operam com *strain gages*. Estes sensores possuem saída na ordem de miliVolts ou micro Volts. Usando o circuito correto e estabelecendo as técnicas de instalação, estes pequenos sinais podem passar pelo *slip ring* com distorções mínimas. Os sinais do interior da centrífuga são transferidos amplificados na ordem de Volts.

• **Especificações Técnicas**

- Circuitos: 36 canais
- Capacidade de corrente: 200 miliamperes
- Faixa de rpm: 2400
- Relação S/R dB (ponte completa): 60
- Peso: 115 gramas
- Diâmetro da flange de montagem: 5 cm
- Comprimento: 11 cm
- Terminais c/ código de cores
- Lubrificação permanente dos contatos
- Revestimento de aço inoxidável
- Protegido contra poeira e líquidos.

3.5.3. Barramento Analógico Interno

O barramento analógico interno da centrífuga é constituído de uma placa de circuito impresso, com capacidade de até 7 condicionadores de sinais, permitindo ainda o acoplamento de mais placas gêmeas, caso haja necessidade de maior número de condicionadores de sinais e sensores por ensaio. A capacidade de fluxo de corrente é de aproximadamente 1A.

Este barramento é constituído de uma placa de material fenólico para circuitos eletrônicos. Seus terminais são banhados a ouro para melhorar a transmissão dos

sinais. Na superfície superior são instalados conectores padrão *EDGE 44* para permitir a conexão dos condicionadores de sinais.

Esta placa está configurada para fornecer alimentação para todos os condicionadores, receber e transmitir os sinais destes para o *slip ring* através de cabo *flat cable*.

Sua base é fixada na superfície do braço da centrífuga próximo ao eixo através de parafusos e abragadeiras, a fim de evitar alta aceleração de seus componentes durante a rotação da centrífuga (100g na extremidade do cesto, a aceleração na placa atinge 29g).

3.5.4. Barramento Analógico Externo (Sistema SCXI)

Os módulos *SCXI*, fornecem condicionamento de sinais para sinais de entrada analógica, isolamento para sinais de *I/O* digital e analógico, e canais multiplexados, aumentando mais o número de sinais digitais e analógicos. São fornecidos junto com as placas de aquisição de dados.

Os sinais dos sensores são conectados aos módulos através de terminais blocos *SCXI* com aterramento, conectados à parte frontal dos módulos e ao chassis. O chassis utilizado para o projeto da centrífuga é o *SCXI-1000*, configurado para acomodar quatro módulos de condicionamento de sinais possuindo uma fonte de alimentação para os condicionadores.

O barramento deste chassis se localiza na parte traseira e é conectado à placa de aquisição de dados através de um cabo *flat cable* de 100 pinos separados em duas partes de 50 pinos (CB-50).

Pode-se usar o *plug* de entrada deste *flat cable* na placa de aquisição de dados instalado no computador e controlar os módulos *SCXI* e realizar as conversões *A/D* dos sinais.

O módulo SCXI-1100 (amplificador com multiplexagem de 32 canais) possui 32 canais diferenciais de entrada analógica. A *range* de entrada máxima é de -10V à +10V. O SCXI-1100 pode ajustar-se por *software*, ganho de valores de 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, e 2000. O ganho é aplicado em todos os canais do módulo.

O campo de ganho é configurado no *software* LabVIEW. O SCXI-1100 possui também um *software* selecionável para o modo de calibração, que pode ser usado para determinar o zero de *offset* do módulo.

O terminal bloco SCXI-1300 é utilizado junto com o módulo SCXI-1100, possui um sensor de temperatura interno que é configurado por *jumper* e multiplexado junto com outro sinal para um mesmo canal (configuração *MTEMP*), ou pode ser enviado para um outro canal independente para a placa de aquisição de dados (configuração *DTEMP*). A saída do sinal do sensor de temperatura se faz no canal 1 da placa de aquisição. O SCXI-1300, multiplica a tensão de saída do sensor de temperatura por 100 °C.

- **SCXI-1180**

É um dispositivo de extensão do cabo com 50 pinos. Ele é um painel frontal que permite a passagem de 50 pinos para o painel traseiro, isto é, permite que mais instrumentos sejam monitorados por esta entrada. O terminal bloco SCXI-1302 é empregado junto com ele para permitir o acoplamento dos sinais de instrumentação.

- **Modo de Operação do SCXI**

O caminho que o *NI-DAQ* tem para acessar os sinais dos módulos depende do modo de operação para aquisição destes módulos. Existem dois modos básicos de operação para adquirir os sinais dos módulos *SCXI*, multiplexado e paralelo, e até o presente momento somente o modo multiplexado está sendo usado.

- **Modo Multiplexado para Módulos de Entrada Analógica**

Quando o módulo de entrada analógica opera no modo multiplexado, todos os canais de entrada são multiplexados para um canal de saída. Quando conecta-se o módulo de entrada analógico multiplexado na placa de aquisição de dados, esta placa tem acesso aos demais módulos multiplexados de saída. Os sinais analógicos multiplexados passam pelo *bus SCXI*. Assim, todos os módulos são acessados no chassis *SCXI* no modo multiplexado. Esta configuração é empregada com os módulos instalados no interior da centrífuga, e é empregada para calibração ou monitoração de dados relativos ao funcionamento da centrífuga.

3.5.5. Placa Conversora A/D e D/A AT-MIO-64F-5

A centrífuga emprega uma placa conversora analógica/digital denominada *AT-MIO-64F-5* que realiza aquisições de um simples canal ou multi-canais. Para aquisição de dados de um canal, seleciona-se o canal de entrada e o ganho. A placa realiza uma conversão *A/D* deste canal com várias amostras em intervalos.

Para aquisição de dados com rastreamento em multi-canais (cada canal é acessado com seu próprio ganho), este método realiza uma sequência de canais indicando qual canal analógico está sendo lido. A capacidade desta aquisição pode ser de 1 à 512 canais/ganho. Durante o rastreamento dos canais a placa realiza a conversão, isto é, a conversão é feita durante os intervalos entre um canal e outro.

Os canais são acessados repetidamente do início de cada período de rastreamento, até que o número solicitado de amostragem tenha sido completado.

- **Entrada Analógica da Placa AT-MIO-64F-5**

As entradas analógicas da placa *AT-MIO-64F-5* são totalmente configuráveis por *software*. O *AT-MIO-64F-5* suporta 64 canais de terra comum ou 32 canais diferenciais.

Os canais de entrada analógicos são multiplexados através de um simples estágio de amplificação de instrumentação, com ganho e amostragem programáveis e resolução do ADC de 12 bits.

Esta placa possui 8 ganhos, a começar por 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, e 100. A configuração por *software* para cada canal de entrada analógica da placa *AT-MIO-64F-5* pode ser realizada através de duas diferentes faixas de entrada.

- 0 a +10V (unipolar)
- -5 a +5V (bipolar)

3.6.Subsistema de Controle de Rotação da Centrifuga

O subsistema de controle de rotação da centrifuga é constituído por um motor, um inversor de frequência e um tacômetro, sendo este, instalado junto ao eixo central da centrifuga. O tacômetro monitora a rotação do eixo principal e é constituído de um sensor óptico e uma unidade de leitura.

3.6.1.Motor

O motor empregado na centrifuga é de indução com rotor tipo gaiola, de 4 pólos, 3CV, 220VAC, trifásico, atinge até 1800 rpm e corrente máxima de 10,6A.

3.6.2.Inversor de Frequência Diginverter VG3

O inversor de frequência é um equipamento que converte a voltagem trifásica CA da rede comercial em voltagem CC e através de uma unidade inversora transforma a voltagem CC em voltagem trifásica CA com tensão e frequência variável, a qual é utilizada na alimentação e variação de velocidade de motores de indução com rotor de gaiola.

Estes inversores são dotados de tecnologia *PWM-Senoidal* assíncrona, com frequência portadora de até 15kHz, proporcionando a redução do ruído produzido no

- **Tecnologia *PWM-Senoidal***

- Baixa dissipação térmica;
- Alta velocidade de chaveamento;
- Excitação direta por circuitos lógicos; e
- Capacidade de alimentação de até 460V.

- **Características principais do *IGBT*:**

Constituem um estágio inversor formado por transistores bipolares de porta isolada tipo *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)*, os quais proporcionam inúmeras vantagens como operação silenciosa, alto torque de partida, operação suave em baixas rotações e maior confiabilidade.

- **Transistores *IGBT***

Trata-se de um módulo incorporado ao inversor, o qual possibilita a monitoração de grandezas elétricas, a programação de parâmetros, a indicação de falhas através de códigos alfanuméricos e a operação do inversor sem a necessidade de nenhum dispositivo de comando adicional.

- **Operador Digital**

Estes inversores de frequência são de alta confiabilidade, dotados de tecnologia *PWM-Senoidal*, projetados visando proporcionar acionamentos suaves, precisos e silenciosos para motores de indução trifásicos convencionais. Estes inversores são dotados com microprocessadores de 16 bits, memórias usuário não voláteis (*NV-RAM*) e controle total por *software*, pelo operador digital incorporado aos mesmos.

motor em aproximadamente 20dB quando comparado com outros inversores *PWM* convencionais. A tecnologia *PWM* empregada proporciona ainda torque elevado e operações suaves em baixa rotação. Tipicamente, pode-se adotar os seguintes valores:

- torque de 100% para até 1/40 da rotação nominal do motor. Ex: 1,5Hz a 60Hz, e
- torque de 150% para até 1/20 da rotação nominal do motor. Ex: 3,0Hz a 60Hz.

• **Especificações Técnicas**

Modelo CIMR - G3U 23P7: 200 a 230V

Máx. potência do motor HP(kW): 5 (3,7)

Capac. do inversor (kVA): 6,9

Corrente nominal (A): 16

Corrente máx. contínua (A): 18

Tensão máxima de saída: 3 fases 200 a 230V (proporcional à

voltagem de entrada)

Frequência de saída: 50, 60, 72, 90, 120, 180Hz (disponível

até 400Hz)

Tensão e freq. de entrada nominal: 3 fases de 200 a 230V, 60 Hz.

3.6.3. Tacômetro Digital

O tacômetro modelo *ACT-3* da *Monarch Instruments* é um instrumento extremamente versátil que possui vários modos de operação. Estes modos de operação determinam o que será mostrado no *display*.

• **Modos de Operação**

O tacômetro digital opera de vários modos, modo RPM, Frequências, Escala, Totalização e modo de Temperatura. Atualmente com a centrífuga está configurado no modo RPM.

No modo RPM, a unidade funciona como um tacômetro mostrando rotações por minuto (rpm) de uma entrada com um pulso por rotação. O instrumento efetivamente multiplica a frequência de entrada por 60 para derivar rpm. Pode-se medir de 7,2 à 999.990 rpm. No *display*, o *led* irá acender indicando o modo RPM.

• Saída Analógica

O instrumento tem ambas as saídas, 0 a 5VDC, e de corrente de 4 a 20mA, podendo ser usadas juntas. A corrente e a tensão de saída seguem a ordem: "0"V a corrente é de 4mA e 5 V a corrente é 20mA. A saída é linear dentro de 0,5%.

As saídas analógicas são derivadas de um conversor A/D. Isto significa que a tensão (ou corrente) de saída muda em passos. A saída analógica básica tem 256 passos, de "0" ao fundo de escala. Isto implica que cada lado do passo é 1/255 do valor do fundo de escala ou um pouco menor que 0,4% do fundo de escala. O valor atual do fundo de escala deve ser estabelecido pelo usuário numa faixa de 100 a 999990. Este valor de fundo de escala é o valor o qual a saída analógica é máxima, 5V ou 20mA.

• Sensores

Estes instrumentos tem 3 terminais de entrada no painel traseiro. Este grupo de terminais são marcados com *INPUT*. Os 3 terminais são individualmente marcados por +V, *SIG* e *COM*. Suas funções são:

- +V: Fontes de saída positiva. Usada para alimentar os sensores. A voltagem de saída deste pino varia entre +8V e +5V, dependendo da carga. A carga máxima é 60mA DC. Esta saída tem uma corrente interna para usar com o sensor de 2 fios. A máxima carga de operação com o sensor de 2 fios é de 5mA.
- *SIG*: Sinal de entrada. Esta é a entrada para a maioria dos sinais AC unipolar ou bipolar de 5mV a 50V. É também compatível à TTL. A impedância típica é de 10k Ω .

- *COM*: Comum ou terminal negativo. Este é o comum para ambos, os sinais e a alimentação para a maioria dos sensores.

3.7.Subsistema de Aquisição e Tratamento de Imagens

O subsistema de aquisição e tratamento de imagens é constituído por quatro lâmpadas estroboscópicas, uma câmara fotográfica, uma mesa digitalizadora, um *scanner* e um *plotter*.

As luzes estroboscópicas trabalham em sincronismo com as rotações do braço da centrífuga, ou seja, cada vez que o braço que contém a amostra passa pelo visor, o sensor óptico detecta esta passagem e dispara os *strobos*, permitindo o acompanhamento visual da amostra, fotografando em instantes de interesse.

3.7.1.Sistema de Lâmpadas Estroboscópicas

O sistema de lâmpadas estroboscópicas é constituído de 4 lâmpadas estroboscópicas digitais modelo *NOVA STROBE DA-SC 7200*, de um módulo sensor auto alimentado modelo *SPS-5* e um sensor óptico remoto *ROS-5P*, fornecidos pela *Monarch Instruments, Inc (USA)*. Estas lâmpadas são energizadas diretamente à rede elétrica de 115VAC.

• Conexões de Entrada e Saída

O conector de entrada habilita um sinal externo para o *trigger* do *stobo*. No momento que se conecta neste soquete, o oscilador interno é desligado e o conector de saída imita o sinal aplicado no *plug* de entrada. A *range* do *trigger* é de 0 a 200 *flashes* por segundo. (12000 por minuto).

Existe um atraso de 5µs da entrada do *trigger* para o disparo do *flash*. A fonte de *trigger* deverá fornecer um pulso com uma duração mínima de 200ns. A série *SPS*

da Monarch e a maioria dos tacômetros podem fornecer um pulso de *trigger* compatível *TTL* para as lâmpadas.

Ligado ao conjunto de lâmpadas estroboscópicas tem-se o módulo sensor *SPS-5*, que estabelece um trem de pulsos de saída compatível com *TTL*, derivado de uma simples fonte de lente retro-reflectiva óptica.

O módulo *SPS-5* consiste de um sensor óptico equipado com uma fonte luminosa com nível *DC* constante e um foto-detector, um módulo com chave liga/desliga, chave seletora de saída, conector de saída *BNC*, bateria interna recarregável e um conector de entrada para o carregador. Um carregador de bateria de 115VAC e 1 (um) metro de fita refletora acompanha o conjunto.

O *SPS* pode operar com baterias recarregáveis ou operar continuamente com um carregador externo modelo *R-5*. Ligado ao módulo sensor *SPS-5*, tem-se o sensor óptico remoto *ROS-5P*, que é capaz de detectar um pulso refletido por uma fita refletora ou um alvo com líquido refletor a distâncias de até 1m e ângulo de até 45° para o alvo. Ele deve ser montado e alimentado opticamente para iluminar o alvo uma vez por rotação. É recomendado que o sensor esteja colocado em um ângulo relativamente pequeno (aproximadamente 15°) para que os pulsos refletidos do alvo sejam vistos pelo sensor, que deve estar a pelo menos 10cm do alvo. O *led* verde indicador de alvo, pisca na frequência de entrada quando o alvo passar pelo sensor.

O sinal refletor é processado eletricamente no sensor e estabelece um trem de pulsos de 0 a 5V positivo (invertido) ou 0 a 5V negativo (não invertido) para o conector de saída. A saída tem uma impedância baixa (50Ω) e é capaz de direcionar 30m de cabo coaxial.

- **Especificações do Sensor *ROS-5P***

Iluminação: visível pelo *led* vermelho
Faixa de operação: 1m até 45° do alvo.

A máquina fotográfica, de modelo *Mamiya 645 Pro*, é empregada na aquisição de imagens dos modelos reduzidos durante os ensaios na centrífuga. É necessário um sincronismo entre a passagem do cesto no centro da janela, das lâmpadas estroboscópicas, e o disparo da máquina para se obter uma imagem centralizada e bem definida, para posteriormente ser tratada por um *software* específico no microcomputador.

3.7.2. Máquina Fotográfica

Peso:	280 gramas
Dimensões:	5,0"x2,5"x1"
Conector de saída:	BNC fêmea
Temperatura de operação:	0°C a 50°C
Tomada de corrente:	76mA com carga de 10k Ω
Saída:	invertida (0 a 5V ou 5 a 0V - chaveado) compatível com pulsos TTL, invertida ou não
Tempo de carga:	14 a 16 horas
Taxa de descarga:	8 horas à corrente de 60mA (usando um ROS-5P)
Taxa de carga:	50mA
Capacidade:	600mA/hora
Fonte DC:	4 baterias AA de níquel-cádmio

• Especificações do Módulo SPS-5

Fita refletora:	2,5m acompanhando o sensor
Dimensões:	alumínio com trava. com 2 porcas de rosca M16, e um encaixe de material de aço inoxidável 303 acompanhado tubo alinhado M16x1,5x74mm de largura
Lentes:	plástico acrílico
Indicador de alvo:	led verde
Temperatura de operação:	(-10 à 80°C) ou 15 à 180°F

A digitalização destas imagens é obtida através do *scanner* ou da mesa digitalizadora, após todas as análises concluídas imprimi-se no *plotter* ou impressora colorida para apresentação de relatórios técnicos.

3.7.3. Scanner

O scanner é um equipamento para captura de desenhos, fotografias e texto de alta resolução tanto em branco e preto como coloridos. Com um *software* de reconhecimento óptico é possível obter imagens com boa qualidade.

O *scanner* utilizado é o *Scan Jet 3c* da *Hewlett Packard*, que é um *scanner* de mesa e usa um padrão *ISA* e requer uma configuração mínima no computador, podendo operar com imagens de tamanho até 216 x 356 mm. Usa interface *SCSI-2*, com resolução óptica de 600 *dpi*, e pode ser selecionado entre 12 a 2250 *dpi* com 100% de escalonamento.

3.7.4. Mesa Digitalizadora

A mesa digitalizadora é um equipamento para entrada de dados gráficos, normalmente possuindo alta resolução e permitem uma utilização bastante ampla, desde sistemas complexos de cartografia e geociências até sistemas de *CAD* baseados em computadores.

As modalidades de formatação dos dados são do tipo *ASCII BCD* ou *BINÁRIO COMPACTADO*, existindo a possibilidade de alterar os parâmetros da mesa por *software*.

A interligação da mesa com a *Host* é feita através de uma porta *RS 232-C* permitindo uma fácil integração com qualquer microcomputador existente.

● Especificações técnicas

- Precisão: $\pm 0,254$ mm típico
- *Jitter*: ± 1 bit menos significativo
- Linearidade: $\pm 0,254$ mm
- Proximidade: 10 mm típico
- Resolução máxima: 0,025 mm
- Velocidade de aquisição: 130 pares de coordenadas por segundo
- Alimentação: 110 ou 220 VAC selecionável por chave
- Temperatura: 15 a 32 °C

3.8. Ajustes e Calibrações do Sistema da Centrifuga

Foram realizados vários ajustes e calibrações na centrifuga, com o intuito de conhecer as grandezas físicas envolvidas durante a realização dos ensaios. Realizou-se o ajuste do sincronismo das lâmpadas estroboscópicas com a passagem do cesto no centro da janela de visualização e a máquina fotográfica.

O sincronismo das lâmpadas é feito através do posicionamento de um alvo reflectivo no eixo central da centrifuga, o sensor óptico emite uma luz neste local, com a passada deste alvo no feixe de luz o sensor capta a luz reflectida e dispara um sinal de nível TTL para o controle de disparo das lâmpadas. O ajuste da máquina fotográfica para fixação da imagem na foto depende da aceleração que se quer atingir no cesto e consequentemente a velocidade em que o eixo gira em torno de si. Este ajuste na máquina é feito em um tempo pré estabelecido, normalmente um pouco maior, porém próximo do tempo em que o eixo leva para dar uma volta.

Para se conhecer a rotação necessária para atingir uma determinada aceleração no centro do cesto, foi construído um sensor de força. Este sensor possui uma massa conhecida de 10gramas na sua extremidade, foi calibrado adicionando-se massas à gravidade normal, lendo-se o valor em voltagem e empregando-se a segunda lei de Newton: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

Após esta calibração, o transdutor foi introduzido no interior da centrífuga e variou-se a rotação do motor através do inversor de frequência, lendo-se os valores no tacômetro, os valores de voltagem do transdutor e o valor de frequência no inversor. Nesta condição, sabia-se que a massa era fixa em Iogramas e que a aceleração a que esta massa foi submetida estava sendo variada.

Com a obtenção desses valores chegou-se a curva de calibração e comparou-se com a fórmula teórica descrita abaixo.

A correlação entre a frequência do inversor mostrado no visor do operador digital e o display do tacômetro é:

Frequência no inversor = 0,1163 x rpm no tacômetro

3.8.1. Cálculo da Rotação da Centrífuga

Para calcular a aceleração centrípeta a que um corpo em rotação está submetido, faz-se uso da seguinte equação:

$$|\vec{a}_c| = \frac{R}{|\vec{v}|^2} \quad (3.8.1.1)$$

dado que:

$$\vec{v} = \omega R \quad (3.8.1.2)$$

temos:

$$\vec{a}_c = \omega^2 R \quad (3.8.1.3)$$

Como não serão utilizadas unidades comparáveis, é necessário realizar as seguintes transformações:

$$\omega = \frac{30}{\pi} n \quad (3.8.1.4)$$

$$\vec{a}_c = k \cdot \vec{g} \quad (3.8.1.5)$$

onde ω é a rotação em rad/s, n é a rotação em rpm, \vec{a}_c é a aceleração em m/s^2 e \vec{g} é a aceleração da gravidade local. Neste equacionamento, a variável k é o fator de

semelhança, ou seja, o fator multiplicativo a ser utilizado na aceleração gravitacional de modo a reproduzir os efeitos em estudo de acordo com a teoria da semelhança.

Assim:

$$(3.8.1.6) \quad \vec{a}_c = \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 R n^2$$

e portanto:

$$(3.8.1.7) \quad k = \frac{\vec{g}}{R n^2} \left(\frac{\pi}{30} \right)^2$$

$$(3.8.1.8) \quad n = \sqrt{\frac{(30)^2 k \cdot \vec{g}}{R \pi^2}}$$

Aplicando os valores de projeto e aproximando os resultados tem-se:

$$R = 0,75 \text{ m}$$

$$\vec{g} = 9,78622 \text{ m/s}^2, \text{ resultando:}$$

onde:

$$n = \text{rpm}$$

$$k = \text{aceleração desejada em g.}$$

$$(3.8.1.9) \quad n = 34,49 \cdot \sqrt{k}$$

CAPÍTULO 4 - CONCEITO DE MODELAGEM FÍSICA

4.1. Introdução

De acordo com Candéias (1999) a necessidade de compreender a realidade física levou ao desenvolvimento de teorias interpretativas para explicar racionalmente a ocorrência dos mais diversos fenômenos que existem na natureza, ou aqueles produzidos artificialmente. Pode-se afirmar que qualquer teoria é constituída por um conjunto de pressupostos ou hipóteses, um raciocínio, matemático, que na grande maioria geram resultados ou soluções.

O primeiro requisito da validade de uma teoria consiste na adequação das hipóteses, baseada na evidência. O segundo consiste na adequação do resultado, quando confrontado com a realidade.

Numa teoria, quando ambos os requisitos são satisfeitos, a lei da solução altera-se para a lei do fenômeno, refletindo assim, no avanço do conhecimento. A validade de uma teoria só pode ser aferida mediante a observação direta do fenômeno, verificando se a solução obtida é convenientemente suportada pela contrapartida real.

Às vezes, quando se depara com fenômenos em que intervêm materiais naturais, na caracterização inicial do problema depara-se com dificuldades, por um lado, porque as propriedades dos materiais variam de ponto a ponto, muitas vezes não sendo possível obter uma caracterização completa dessa variação, por outro, porque as próprias intervenções, tendo em vista a caracterização dos meios em estudo, podem sofrer alterações de algumas das características que se pretende conhecer, introduzindo um elevado grau de incerteza na particularidade das hipóteses do problema. Uma das formas de caracterizar tal problema consiste em reproduzir, sob condições controlada, o fenômeno protótipo em análise. Esta reprodução é normalmente chamada de ensaio de modelo físico. Por uma questão de economia, há ainda, uma vantagem grande em proceder essa reprodução por meio de escala reduzida.

4.2. Modelagem Física

“Protótipo é um objeto ou fenômeno em estudo que possui uma contrapartida real, como uma estrutura construída, cujo comportamento pretende-se conhecer quando submetida a determinadas ações, ou uma contrapartida idealizada, como uma estrutura projetada cuja solução de dimensionamento se pretende testar nas condições de trabalho a que ficará submetida após a sua construção.

O sistema idealizado pode ainda não estar associado a nenhuma realidade projetada, como no caso típico dos estudos dos fenômenos que tendem esclarecer um mecanismo físico de comportamento, em que o sistema protótipo é idealizado de forma a pôr em evidência os diferentes fatores que o influenciam.

No primeiro protótipo, o recurso à modelagem física só se justifica se a exploração dos correspondentes modelos permitir extrapolar o comportamento real. Já nos sistemas ideais os fenômenos modelo podem ser encarados como ocorrências autônomas, sem uma intenção explícita de representar um protótipo, resultando o seu interesse ao fato de constituírem em si mesmos um acontecimento real.

Modelo é uma reprodução controlada do protótipo no sentido em que é realizada por processos que asseguram o conhecimento explícito e inequívoco das suas características. Levando-se em consideração que na modelagem física os princípios de semelhança mecânica são fundamentais, onde deve ser observada a utilização dos mesmos materiais de que são constituídos os protótipos, ou materiais cuja propriedade sejam relacionáveis de uma forma direta, só assim não se levantam obstáculos à particularização das hipóteses teóricas, e pode-se dizer que o sistema modelo é semelhante ao sistema protótipo, e vice versa” (Candeias, 1999, p.11).

O ACI Committee 444 (1982) define que o modelo físico pode ainda ser um corpo que tem a função de simular o comportamento de um determinado protótipo, também como uma representação física, geralmente em escala reduzida, de uma estrutura ou parte dela, ou como um elemento ou um conjunto de elementos estruturais

executados em escala reduzida, para serem estudados e para os quais as leis de semelhança podem ser empregadas para interpretar os resultados obtidos.

Wiss, Janney, Estlner Associates (1992) dizem que deve-se ter compreensão dos fenômenos envolvidos, suas causas e efeitos, principalmente quando se deseja conceber um modelo físico e através dele interpretar o seu comportamento e prever os valores de certa grandeza física que poderá ocorrer no protótipo. É necessário que se conheça os parâmetros dos quais dependem estas grandezas, só assim é possível estabelecer as chamadas condições de semelhança, permitindo definir as formas, materiais e as condições limites do modelo, transportando para o protótipo as observações feitas.

A análise dimensional apresentada por Candeias (1999), na modelagem física, considerando dois sistemas geometricamente semelhantes, onde os parâmetros indicados por * significam uma relação entre o modelo e o protótipo, tem-se:

$$x_{ip}^{*} = l^{*} x_{im}^{*} \quad (i=1,2,3) \quad (4.2.1)$$

$$t_m^{*} = t^{*} t_p \quad (4.2.2)$$

onde os índices m e p indicam o sistema modelo e o sistema protótipo e l^{*} e t^{*} são os fatores de escala de comprimento e de tempo, respectivamente.

No modelo, o vetor velocidade em qualquer ponto é:

$$v_{im}^{*} = \frac{dx_{im}^{*}}{dt_m^{*}} \quad (i=1,2,3) \quad (4.2.3)$$

então,

$$v_{im}^{*} = \frac{l^{*} dx_{ip}^{*}}{t^{*} dt_p^{*}} \quad (i=1,2,3) \quad (4.2.4)$$

Onde m_m e m_p são as massas de partes homólogas, no sistema modelo e protótipo, respectivamente, e m^* é o fator de escala. Aplicando a lei de *Newton*, tem-se:

$$m_m = m^* m_p \quad (4.2.10)$$

E as distribuições de massa também serão semelhantes, se:

$$a_m^* = \frac{a_p^*}{l^*} \quad (4.2.9)$$

ou seja,

$$a_m^* = \frac{a_p^*}{l^*} \quad (i=1,2,3) \quad (4.2.8)$$

E conforme as equações (4.2.2) e (4.2.5) têm-se:

$$a_m^* = \frac{dv_m^*}{dt^*} \quad (i=1,2,3) \quad (4.2.7)$$

O vetor aceleração de qualquer ponto do modelo é dado por:

$$v_m^* = \frac{v_p^*}{l^*} \quad (4.2.6)$$

Portanto o fator de escala de velocidade é:

$$v_m^* = \frac{v_p^*}{l^*} \quad (i=1,2,3) \quad (4.2.5)$$

ou,

$$\vec{F}_{im} = m_m \vec{a}_{ip} \quad (i=1,2,3) \quad (4.2.11)$$

Substituindo os valores obtêm-se:

$$\vec{F}_{i*} = m_* \frac{(t_*)^2}{l_*} \quad (4.2.12)$$

Onde o F^* é o fator de escala de forças.

Na modelagem física o comportamento dos materiais pode ser representado por dois campos distintos: modelagem física convencional e a modelagem física em centrífugas.

- Na modelagem física convencional os modelos são ensaiados em campo gravitacional normal.

- Na modelagem física em centrífugas criam-se artificialmente forças de gravidade nas quais os ensaios são conduzidos, considerando-se as forças externas.

Candéias (1999) diz que para obter um campo de tensões no modelo igual ao do protótipo para que haja completa semelhança mecânica, é possível submetendo-o a campos gravitacionais maiores e proporcionais à redução de escala que o mesmo foi construído.

4.3. Modelagem Física Convencional

Na modelagem física convencional em que se quer estudar um determinado fenômeno em escala reduzida, geometricamente semelhante, impõe-se a escala geométrica de redução:

$$l^* = \frac{1}{N} \quad (4.3.1)$$

Procedendo aos ensaios sobre modelo em ambiente gravitacional normal, o fator de escala desta aceleração é:

$$\vec{g}^* = 1 \quad (4.3.2)$$

E se admitir que os materiais do modelo são idênticos aos do protótipo, fator de escala de massa específica é:

$$\rho^* = 1 \quad (4.3.3)$$

E por definição,

$$\rho^* = \frac{m^*}{(l^*)^3} \quad (4.3.4)$$

atendendo a equação (4.3.1), tem-se:

$$m^* = \frac{N_3}{1} \quad (4.3.5)$$

De acordo com a 2ª lei de Newton, para um corpo em repouso submetido a um campo gravitacional uniforme tem-se:

$$\vec{F}^* = m^* \vec{g} \quad (4.3.6)$$

E se considerar as equações (4.3.2) e (4.3.5), deve-se ter:

$$\vec{F}^* = \frac{N_3}{1} \quad (4.3.7)$$

E o fator de escala de tensões é,

$$\sigma_* = \frac{F_*}{(l_*)^2} \quad (4.3.8)$$

e considerando as equações (4.3.1) e (4.3.7), tem-se:

$$\sigma_* = \frac{1}{N} \quad (4.3.9)$$

E substituindo na equação (4.2.12) as equações (4.3.1), (4.3.5) e (4.3.7) tem-se:

$$t_* = \sqrt{\frac{1}{N}} \quad (4.3.10)$$

E substituindo também os valores nas equações (4.2.6) e (4.2.9), tem-se:

$$v_* = \sqrt{\frac{1}{N}} \quad (4.3.11)$$

$$a_* = 1 \quad (4.3.12)$$

Estes valores constituem fatores de escala fundamentais associados à modelagem física convencional com materiais idênticos aos do protótipo, lembrando que estes fatores de escala derivam exclusivamente das hipóteses inerentes à técnica de modelagem física em análise, não traduzindo portanto nenhum objetivo de semelhança, ou seja, estes valores são impostos pela técnica de modelagem física e são independentes dos fenômenos a serem estudados em modelos.

Ou ainda, "os valores dos fatores de escala de comprimento, tempo, velocidades, aceleração, massa, força e tensão agora obtidos são impostos pela técnica de modelagem física e independentes dos fenômenos a estudar no modelo. Podem surgir

conflitos de escalas, isto é, os fatores de escala associados à técnica de modelagem física podem suscitar o desrespeito à algumas leis de modelagem estabelecidas para um determinado fenômeno”, Candéias (1999, p.43).

4.4. Modelagem Física em Centrifuga

Considerando agora a técnica de modelagem em centrifuga e procedendo da mesma forma que na modelagem física convencional, impondo o fator de escala geométrica de redução e admitindo que os ensaios sobre o modelo são realizados em um campo artificial de aceleração N vezes superior ao da gravidade, onde N é o fator de redução geométrica, tem-se:

$$\vec{g}^* = N \quad (4.4.1)$$

E se os materiais do modelo forem idênticos aos do protótipo, $\rho^* = 1$, tem-se:

$$m^* = \frac{1}{N^3} \quad (4.4.2)$$

E segundo a 2ª lei de *Newton* decorre que:

$$\vec{F}^* = \frac{1}{N^2} \quad (4.4.3)$$

E comparando com as equações (4.2.6), (4.2.9), (4.3.8) e (4.3.10) tem-se:

$$\vec{v}^* = 1 \quad (4.4.4)$$

$$\vec{a}^* = N \quad (4.4.5)$$

$$\sigma^* = 1 \quad (4.4.6)$$

$$t^* = \frac{1}{N} \quad (4.4.7)$$

Niyama (1992) discute em sua tese que Galilei foi o primeiro a aplicar a análise escalar moderna utilizando a noção de tensão crítica $\sigma_{cr}^* = l^* \gamma^*$, onde l é o comprimento, γ o peso específico que resulta a seguinte expressão:

$$\sigma^* = \rho^* \cdot g^* \cdot l^* \quad (4.4.8)$$

Sendo ρ a massa específica e g a aceleração da gravidade terrestre. Esta expressão formula as condições de semelhança entre as grandezas físicas envolvidas entre um protótipo e um modelo em escala reduzida.

Segundo Niyama (1992), o trabalho de Mandel (1962) demonstrou que em meios contínuos, as equações de equilíbrio são verificadas se a expressão acima for levada em consideração.

De fato, pois na tese de Candeias (1999) é apresentada a equação do equilíbrio de um meio contínuo como sendo:

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i - \frac{\partial^2 \delta_i}{\partial t^2} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (4.4.9)$$

onde:

σ_{ij} são componentes do tensor das tensões totais;

g_i são os componentes do vetor das forças de massa;

δ_i são os componentes de vetor de deslocamento;

ρ , é a massa volumétrica do material que constitui o meio.

A equação (4.4.9) traduz uma relação dimensional homogênea da forma:

$$\sigma_{ij} = f(\delta_i, x_j, \rho, g_i, t) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (4.4.10)$$

Que pode ser reduzida a uma relação adimensional do tipo:

Escolhendo-se as variáveis x_1, σ_1 e t para representarem as dimensões fundamentais intervenientes, sendo, σ_i as componentes principais do tensor das tensões totais ($i=1, 2, 3$).

Os 11 componentes adimensionais constantes da formulação adimensional do equilíbrio permitem estabelecer as leis da modelagem para que o equilíbrio do meio modelo seja semelhante ao do protótipo.

Supondo que o modelo e o protótipo são mais uma vez geometricamente semelhantes. E ainda impondo a igualdade dos valores dos produtos adimensionais no modelo e no protótipo, obtêm-se:

$$\begin{aligned} \sigma^* &= \sigma_i^* & (i=1, 2, 3) & \quad (4.4.12) \\ \delta^* &= \delta_i^* = l^* & (i=1, 2, 3) & \quad (4.4.13) \\ l^* &= x_i^* & (i=1, 2, 3) & \quad (4.4.14) \\ p^* &= (l^*)^{-2} (t^*)^2 \sigma^* & & \quad (4.4.15) \\ g^* &= g_i^* = l^* (t^*)^{-2} & (i=1, 2, 3) & \quad (4.4.16) \end{aligned}$$

De (4.4.16) vem:

$$(t^*)^2 = l^*/g^* \quad (4.4.17)$$

Substituindo (4.4.17) em (4.4.15) obtêm-se a equação 4.4.8:

$$\sigma^* = p^* \cdot g^* \cdot l^* \quad (4.4.8)$$

Que traduz a lei da modelagem fundamental para problemas de equilíbrio estático.

Em se tratando de solos, devido a complexidade do seu comportamento e para garantir as condições de semelhança citadas anteriormente, o modelo pode ser construído com os mesmos materiais empregados no protótipo, onde $\rho^* = 1$, e desejando-se trabalhar com o mesmo nível de tensões $\sigma^* = 1$, o que vai facilitar a análise das tensões versus deformações, onde se terá o produto:

$$\vec{g}^* \cdot l^* = 1$$

(4.4.19)

O princípio básico do ensaio em centrífuga é trabalhar com este produto, aumentando a aceleração na mesma proporção da redução da escala linear.

Portanto, a necessidade de obter o campo de tensões no modelo igual ao do protótipo é fundamental para contornar o problema de semelhança. E esta mudança de campo gravitacional pode ser conseguida através de centrífugas.

4.4.1. Relações de Escala

A seguir são apresentadas, em forma de tabela, algumas relações escalares das grandezas físicas entre o protótipo e o modelo reduzido submetido a N vezes a aceleração gravitacional (Ko, 1988).

TABELA 2 – FATORES DE ESCALA ASSOCIADOS À MODELAGEM FÍSICA EM CENTRÍFUGA

Grandeza	Protótipo	Modelo
Comprimento	N	1
Área	N ²	1
Volume	N ³	1
Velocidade	1	1
Aceleração	1	N
Massa	N ³	1
Força	N ²	1
Tensão/Pressão sob líquidos	1	1
Deformação	1	1
Deslocamento	N	1
Tempo evento dinâmico	N	1
Tempo difusão	N ²	1
Tempo fluência	1	1
Frequência	1	N
Trabalho/Energia	N ³	1
Potência	N ²	1

4.4.2. Efeitos de Escala

Os efeitos de escala em modelagem com centrífugas são muito estudados na literatura, principalmente quando se quer conseguir simular todas as características do protótipo de uma maneira simples. Algumas vezes devem-se assumir hipóteses simplificadoras, ou então devem-se identificar estes efeitos e avaliar suas influências.

Um dos efeitos é a não linearidade do campo de tensões no interior do modelo; outro efeito é a variação da aceleração com a profundidade do modelo quando se quer gerar campos de aceleração através de centrífugas. Estes efeitos são considerados na literatura como os mais importantes, pois as condições de aproximação à lei de escala são premissas à técnica de modelagem e não se prevêem estas interferências quando se quer estudar os fenômenos impostos no modelo.

Mas segundo um estudo realizado por Taylor (1995), comparando a variação da tensão com a profundidade entre o modelo e o protótipo, foi demonstrado que a velocidade angular de rotação é função da altura do modelo e da distância radial entre o eixo da máquina e a superfície do modelo. Foi concluído que na maioria das centrífugas existentes, o erro máximo ao desconsiderar esta não linearidade de tensões, tomando a curva do modelo como sendo a do protótipo, é menor que 3%, e que portanto seria insignificante.

Taylor (1995) comenta também que uma centrífuga gera altos campos de aceleração fazendo com que haja uma variação não linear deste campo no modelo, principalmente em relação à profundidade.

Isto se deve porque o campo de aceleração inercial é dada por $(\omega^2 r)$, onde (ω) é a velocidade angular de rotação da centrífuga e (r) é o raio de qualquer elemento do modelo do solo. O problema torna-se menor se cuidados em selecionar o raio com o fator de escala N for determinado. A distribuição das tensões verticais no modelo e o protótipo são mostrados na Figura 18. A distribuição das tensões verticais são comparadas na Figura 19.

FIGURA 19 - COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DE TENSÕES COM A PROFUNDIDADE DO MODELO E O PROTÓTIPO APUD TAYLOR (1995)

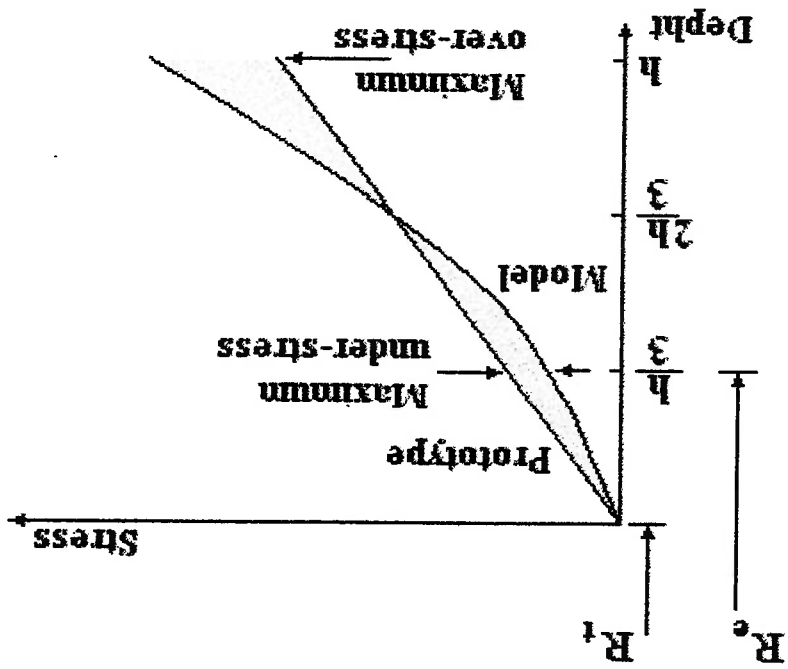
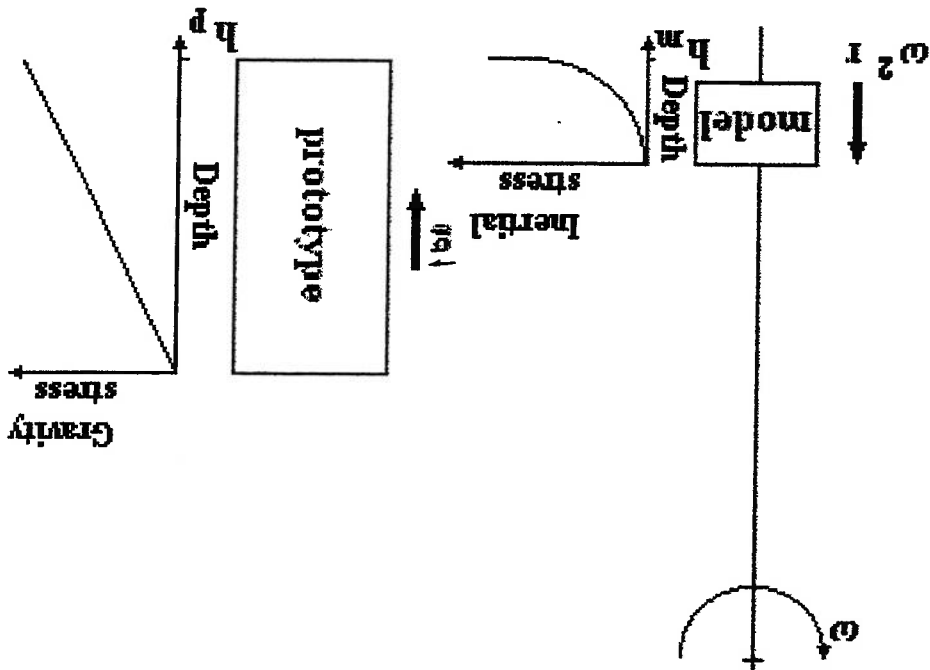


FIGURA 18 - TENSÕES NO MODELO E NO PROTÓTIPO APUD TAYLOR (1995)



No protótipo, a tensão vertical com a profundidade $h_p = N \cdot h_m$ e é dada pela equação:

$$\sigma_{vp} = \rho \cdot g \cdot h_p = \rho \cdot \vec{g} \cdot N \cdot h_m \quad (4.4.2.1)$$

O fator de escala N necessita ser calculado pelo raio efetivo da centrifuga para o modelo R_e em que:

$$N \cdot \vec{g} = \omega^2 R_e \quad (4.4.2.2)$$

Se o raio na superfície do modelo é R_t , então a tensão vertical da profundidade z no modelo pode ser determinado:

$$\sigma_{vm} = \int_z^0 \rho \omega^2 (R_t + z) dz - \rho \omega^2 z \left(R_t + \frac{z}{2} \right) \quad (4.4.2.3)$$

Se a tensão vertical do modelo e protótipo são idênticos, a profundidade $z = h_t$ (Figura 19), então, da equação (4.4.2.1), (4.4.2.2) e (4.4.2.3), pode ser mostrado que:

$$R_e = R_t + \frac{1}{2} h_t \quad (4.4.2.4)$$

Uma regra conveniente para minimizar o erro na distribuição de tensões é considerar a amplitude relativa das tensões (positivo e negativo) conforme a Figura 19.

A razão r_u , para a máxima tensão negativa ocorre na profundidade do modelo $h_t/2$, para tensões no protótipo onde a profundidade é dada pela equação:

$$r_u = \frac{0,5h_t \rho \vec{g} N}{0,5h_t \rho \omega^2 \left(R_t + \frac{0,5h_t}{2} \right)} \quad (4.4.2.5)$$

Quando combinado com as equações (4.4.2.2) e (4.4.2.4), reduz-se a:

$$r_u = h/4R_e \quad (4.4.2.6)$$

Similarmente, o raio r_0 , para a máxima tensão positiva, que ocorre na base do modelo h_m , para as tensões no protótipo onde a profundidade pode ser mostrada:

$$r_0 = h_m - h_t / 2R_e \quad (4.4.2.7)$$

Combinando os dois raios r_u e r_0 , dá-se:

$$h_t = 2h_m/3 \quad (4.4.2.8)$$

Então:

$$r_u = r_0 = 2h_m/3$$

(4.4.2.9)

Também, usando a equação (4.4.2.4):

$$R_e = R_t + h_m/3$$

(4.4.2.10)

Usando esta regra, há uma correspondência exata nas tensões entre o modelo e o protótipo. O máximo erro é dado pela equação (4.4.2.9).

Para a maioria das centrifugas geotécnicas, h_m/R_e é menor que 0,2, ou seja, 20%, e portanto, o erro máximo do perfil de tensões é pequeno e geralmente menor que 3% em relação as tensões no protótipo.

É importante notar que a mesma relação para raios pequenos (raios efetivos de 1,5m) o erro devido a distribuição de tensões não lineares é muito pequeno para modelos moderadamente grandes, como por exemplo, para modelos de altura de 300mm.

No caso da Centrifuga IPT/FAPESP tem-se:

$$\begin{aligned} h_m/R_e &= 0,2 \\ h_m/R_e &= 0,2 \cdot 0,75m \\ h_m/R_e &= 0,15m \end{aligned}$$

(R_e da centrifuga)
ou seja, 20%

Portanto a profundidade máxima de solo deve ser de 0,15m no cesto para os ensaios de estaca de sucção.

Assim, utilizando 0,15m de camada de solo, o máximo erro, tomando-se a curva de distribuição de tensões do modelo como sendo do protótipo, será:

$$\begin{aligned} r_u = r_0 &= h_m/6R_e \\ r_u = r_0 &= 0,15m/6 \times 0,75m \\ r_u = r_0 &= 3,3\% \end{aligned}$$

Outra maneira de contornar a influência da não uniformidade do campo de aceleração sobre os resultados é o que os pesquisadores chamam de "Modelagem de Modelos".

Como alternativa, o conceito de "Modelagem de Modelos" evoluiu para proporcionar uma verificação da consistência do ensaio em centrifuga e para validar as relações de escala (Ko, 1988). É uma teoria bastante satisfatória, consiste na execução de ensaios com diferentes escalas, de maneira que todos exprimam o mesmo protótipo. E assim se os efeitos devido à escala forem desprezíveis todos os modelos terão igual previsão para o comportamento do protótipo.

Na Figura 20 é mostrado este conceito, onde na abscissa é plotada a dimensão do modelo em escala logarítmica e a gravidade na ordenada. A primeira observação é que todos os modelos ensaiados a 1g são, por definição, protótipos.

Considere um protótipo de dimensão 10cm representado por B1. Este mesmo protótipo pode ser modelado em escala 10 vezes menor por um modelo de 10cm (B2), ou em escala 100 vezes menor por um modelo de 1cm (B3), etc. É importante notar que (B2) e (B3) não somente são modelos do mesmo protótipo, mas também modelos entre si.

Na ausência de um protótipo, eles poderão ser comparados entre si e pelas relações de escala, e seus comportamentos podem ser extrapolados até o protótipo projetado.

Já (B2) e (A2), não são modelos entre si e ao compará-los depara-se com efeitos da dimensão do modelo. E para o mesmo nível de aceleração não são modelos de nenhum outro modelo. Somente podem ser comparados modelos que caminharam na mesma linha, ou seja, com (A2) e (A3), (B1) com (B2) e (B3), e assim por diante.

E assim o estudo de efeitos de escala deve ser adaptado para cada caso de modelagem física, e se restringe ao fenômeno estudado e às características específicas do problema.

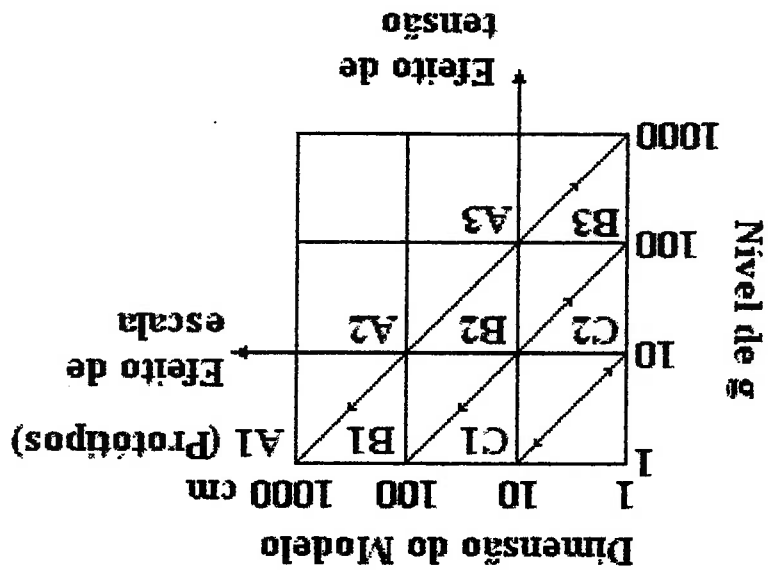


FIGURA 20 - MODELAGEM DE MODELOS (KO, 1988)

Um outro efeito de escala é a influência do tamanho das partículas, principalmente quando o modelo é submetido a altas acelerações e for reduzido a uma escala muito pequena na qual o material do protótipo seja constituído de partículas grossas. Neste caso passa a ser relevante quando comparado às dimensões do modelo como um todo e assim parece improvável que o modelo possua comportamento igual ao do protótipo.

Segundo Taylor (1995), a pergunta mais comum de profissionais em centrifuga é como pode a modelagem em centrifuga ser justificada se as partículas de solo não estão reduzidas no mesmo tamanho do modelo pelo fator N. Aumentando a escala do modelo para o protótipo em primeira análise, significaria aumentar também a escala da partícula. Assim uma areia fina usada em um modelo cuja escala seja de 1:100 poderia ser considerado como sendo um pedregulho.

Entretanto, pela mesma argumentação, uma argila seria então considerada como uma areia fina. Este argumento está claramente descartado, pois a argila tem muita diferença nas suas características de tensão e deformação em relação a uma areia fina. Poderia existir problemas tentando-se modelar à uma aceleração muito alta, consequentemente, a escala do modelo ficaria muito pequena, num fenómeno em que o solo protótipo consistisse principalmente de solo grosso (pedregulho).

Neste caso, o tamanho do grão do solo seria importante quando comparado com as dimensões do modelo e é improvável que o modelo mobilizaria a mesma curva de tensão e deformação do solo como seria no protótipo.

Para solucionar este efeito, basta elaborar um conjunto de regras bastante simples que possam relacionar a mais importante dimensão do modelo, isto é, a menor dimensão do modelo com as dimensões médias predominantes das partículas sólidas do solo, estabelecendo um limite mínimo para o valor desta relação a partir do qual os efeitos de escala passam a ser desprezíveis.

Esta foi a aproximação adotada por Ovesen (1979, 1985), que investigou o desempenho de fundações circulares em areia empreendendo uma série de experiências, usando diferentes classificações segundo os tamanhos dos modelos para acelerações diferentes, tal que eles correspondessem ao mesmo protótipo.

Os dados foram consistentes, que validou a técnica de centrífuga, entretanto, foi notado que houve divergências de comportamento quando a relação do diâmetro da fundação com o tamanho do grão era inferior à aproximadamente 15 vezes.

Assim, os efeitos do tamanho de partículas poderiam ser quantificados estendendo-se para todas as modelagens. Porém esta consideração pode ser muito simplista e em alguns casos pode ser necessário considerar a relação do tamanho da partícula para uma faixa ampla de cisalhamento (Tatsuoaka et al., 1991).

O fundamental é reconhecer que, em algumas circunstâncias, os efeitos do tamanho de partículas podem ser importantes e, a série de ensaios de modelos devem incluir uma investigação para avaliar sua influência no problema em estudo.

No caso dos modelos de estacas de sucção a dimensão mais importante foi a espessura das paredes das estacas. A redução de escala do modelo foi da ordem de 1:150 e poderiam ocorrer problemas em relação a espessura da parede da estaca e os grãos de solo. Um dos critérios adotado foi a relação onde a espessura das paredes seria cerca de 15 vezes maior que a maior partícula de solo empregado.

O efeito da aceleração de Coriolis ou complementar, que é outro efeito de escala considerado na literatura, é produzido por movimentos no interior do cesto igualmente no plano de rotação da centrífuga. Este efeito é mais significativo em ensaios de sismos, onde se produz movimentos horizontais na base do *container*, em estudos de percolação, escorregamentos de taludes ou esvaziamento de silos, etc.

Em alguns ensaios onde existem movimentos verticais no plano de rotação, deve-se conhecer os efeitos da aceleração de Coriolis (Figura 21). Para contornar este efeito,

algumas centrífugas foram construídas com raio grande para obter o maior plano vertical no modelo em relação à perpendicularidade do plano de rotação.

A aceleração de Coriolis é diretamente proporcional à velocidade radial dos pontos materiais do modelo, e para manter os seus efeitos a níveis aceitáveis, há a necessidade de limitar esta velocidade.

A expressão (4.4.2.11) abaixo define a componente da aceleração de Coriolis, enquanto a equação (4.4.2.12) é a relação entre a aceleração de Coriolis e a centrípeta:

$$\vec{a}_c = 2\vec{v}_r\omega$$

(4.4.2.11)

Onde:

\vec{a}_c = aceleração de Coriolis

\vec{v}_r = velocidade radial de um ponto P,

ω = velocidade angular.

$$\xi_r = \frac{\vec{a}_c}{\vec{a}_r}$$

(4.4.2.12)

Onde:

\vec{a}_c = aceleração de Coriolis

\vec{a}_r = aceleração centrípeta

Taylor (1995) diz que em geral os efeitos de Coriolis são desprezíveis quando a relação entre a aceleração de Coriolis e a centrípeta é menor que 10%. Então têm-se:

$$\xi = \vec{a}_c/\vec{a}_r \leq 0,10$$

(4.4.2.13)

$$\xi = 2\vec{v}_r\omega/r\omega^2 \leq 0,10$$

(4.4.2.14)

(4.4.2.15)

$$\bar{v}_t \leq 0,05r\omega$$

ou,

(4.4.2.16)

$$\bar{v}_t \leq 0,05V_t$$

onde:

v_t é a velocidade tangencial do ponto material P.

A expressão (4.4.2.16) fornece um limite superior das velocidades radiais no interior dos modelo para fenômenos relativamente lentos, de forma a manter o efeito de Coriolis a níveis desprezíveis, e assim, a validade das condições de extrapolação entre modelo e protótipo.

Por outro lado, atendendo à expressão $\omega^2 R_e = N \cdot \bar{g}$, para ensaio em centrífugas, tem-se:

(4.4.2.17)

$$\omega = \sqrt{\frac{N \times \bar{g}}{R_e}}$$

e:

(4.4.2.18)

$$\xi_c = \frac{a_c}{a_r} = \frac{2v_r \sqrt{R_e}}{r \sqrt{N \times \bar{g}}}$$

Para o ponto do modelo situado a dois terços da altura ($r=R_e$), tem-se:

(4.4.2.19)

$$\xi_c = \frac{2v_r}{\sqrt{R_e N \cdot \bar{g}}}$$

A expressão é normalmente utilizada para quantificar o erro introduzido pelo efeito de Coriolis na modelagem física com determinada centrífuga.

$$R = 0,60\text{m}$$

$$\omega = 2\pi f \text{ ou } 2\pi/t$$

$$v = \omega \cdot R$$

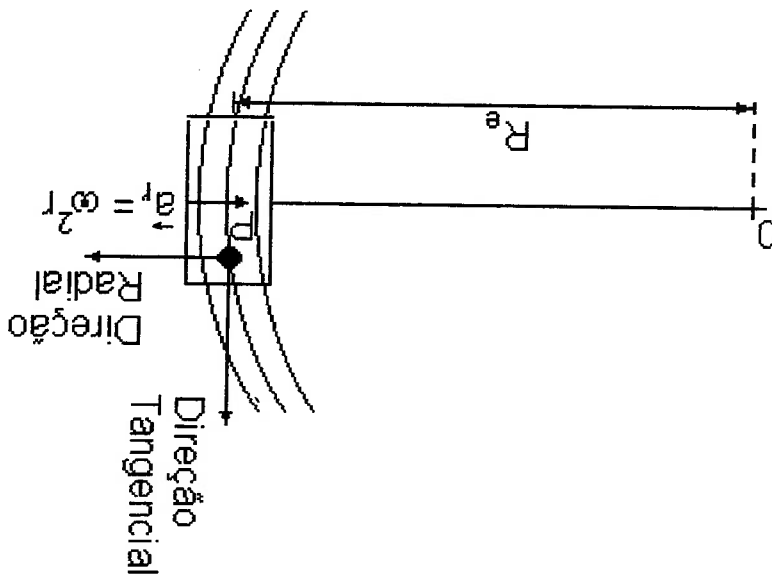
$$a_c = v^2/R$$

Porém, os ensaios realizados nesta centrífuga tinham as seguintes características:

$$\xi_c = \frac{2,1}{\sqrt{0,75 \times 100 \times 9,78622}} = 0,07 \text{ ou } 7\%$$

um campo de aceleração de 100g e assume-se $v_r = 1\text{m/s}$, $R_e = 0,75\text{m}$.
 valores de R_e e N). Exemplificando, considerando a centrífuga IPT/FAPESP sujeito a
 centrífuga, sendo portanto, menos importante nas grandes centrífugas (maiores
 quadrada do raio efetivo da centrífuga, quer pela raiz quadrada da aceleração
 O erro devido ao efeito de Coriolis é inversamente proporcional, quer pela raiz

FIGURA 21 – EFEITO DE CORIOLIS (TAYLOR, 1995)



$$n = 34,49\sqrt{k}$$

$$\bar{v} = \pi n/30$$

$$k = 150$$

então,

$$n = 422,41 \text{ rpm ou } 7,0402 \text{ rps}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = 2\pi \cdot 7,0402$$

$$\omega = 44,2352$$

$$\bar{v} = \omega \cdot R$$

$$\bar{v} = 44,2352 \times 0,60 \text{ m}$$

$$\bar{v} = 26,5411 \text{ m/s}$$

$$\bar{v} = v_t$$

$$\bar{v}_t \leq 0,05 V_t$$

$$\bar{v}_t \leq 0,05 \times 26,5411$$

$$\bar{v}_t \leq 1,3271 \text{ m/s}$$

$$\xi_c = \frac{\bar{a}_c}{\bar{a}_t} = \frac{2\bar{v}_t \sqrt{R_c}}{r \sqrt{N} \times g}$$

ou,

$$\xi_c = \frac{\sqrt{R_c N} \cdot g}{2\bar{v}_t}$$

$$= 0,0894 \text{ ou } 8,9\%$$

CAPÍTULO 5 - ESTACAS DE SUCÇÃO

5.1. Introdução

Recentemente vários trabalhos tem surgido citando as forças de sucção como sendo a grande resistência no içamento de objetos enterrados como navios naufragados (Muga, 1967), e sobre alguns tipos de estruturas *offshore* assentados no fundo do mar (Ninomiya et al, 1972), (Finn; Byrne, 1972), (Lee, 1973), (Helfrich et al, 1976) e (Byrne; Finn, 1978). Craig e Chua (1990) realizaram testes de extração de bases circulares sob influência de sucção empregando técnicas de centrífugas.

De acordo com Fuglsang et al. (1991), a presença de sucção tem sido observada em vários ensaios de modelos, surgindo diversas propostas para diferentes tipos de ancoragem em sistemas flutuantes *offshore*.

A capacidade de ruptura de placas de ancoragem em solos coesivos foi estudada por Vesic (1971) e também foram estudadas por meio de ensaios de modelo (Nhiem, 1975), (Davie; Sutherland, 1977) e (Baba et al., 1989).

Foram realizados ensaios de modelo para observação de esforços de arrancamento de sistemas fixos e de ancoragem marinha tradicional (Bemben; Kupfermann, 1975), fundação rasa circular com aplicação de sucção artificial (Gouldmann et al., 1961), (Brown; Nacci, 1971) e (Wang et al., 1975, 1977, 1978) e ancoragem com sucção artificial (Wilson; Sahota, 1978, 1980).

Fuglsang et al. (1991) dizem que os métodos teóricos empregados pelos cientistas para incorporar efeitos de sucção na avaliação da capacidade de carga de arrancamento são limitados, principalmente, para superfícies rasas.

Na literatura sobre as estacas de sucção, os autores se preocupam primeiramente com os procedimentos de instalação (Hogervorst, 1980), (Burgess et al., 1981, 1983), (Semper; Auvergne, 1982) e (Tjelta; Guttormsen, 1986).

A utilização da sucção desenvolvida dentro das estacas foi sugerida por Albert et al. (1989) e o comportamento da capacidade de carga lateral das estacas de sucção foi investigado através dos ensaios em modelos por Larsen (1989).

A estaca de sucção, denominada em inglês de *suction pile*, *suction caisson foundation* (El-Gharbawy, 1998), *skirt pile* (Tjelta et al., 1990) e *bucket foundation* (Bye et al., 1995) é baseada em um tubo de aço fechado no topo e aberto na base conforme a Figura 22.

O topo é equipado com válvulas que podem ser abertas ou fechadas conforme a necessidade. Estas válvulas são providas de bombas de sucção (El-Gharbawy et al., 1998) e (Allersma et al., 1997). A estaca pode ser lançada de um navio de instalação ou de uma balsa e é mergulhada no mar suavemente com as válvulas abertas, de forma que o ar interno possa escapar rapidamente e permitir também que a estaca ajuste-se ao equilíbrio de pressões (El-Gharbawy et al., 1998) e (Allersma et al., 1997).

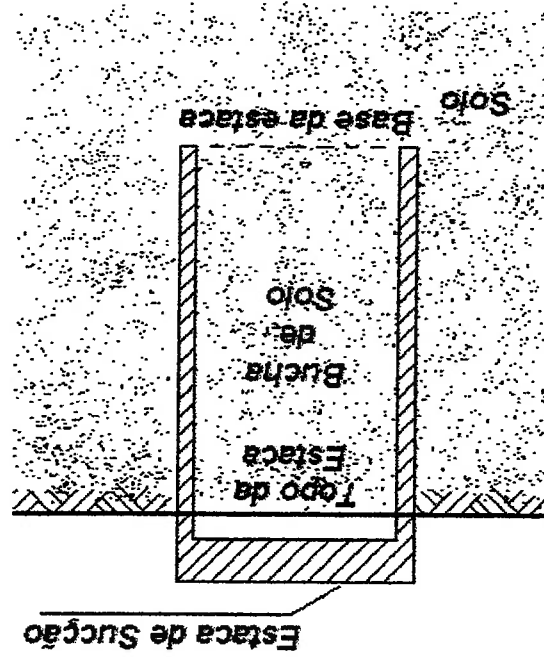


FIGURA 22 – FORMA DE UMA ESTACA DE SUCCÃO (NARASIMHA, 1997)

Logo após a estaca estar encostada no solo marinho e a consequente penetração no solo por peso próprio, as válvulas de liberação são fechadas, as bombas de sucção são acionadas iniciando, assim, a retirada de água no interior da estaca (El-Gharbawy et al., 1998) e (Allersma et al., 1997).

Allersma et al., 1997, dizem que sob esta pressão, a estaca de sucção é cravada no leito marinho e o fluxo de água do mar através dos poros do solo durante o bombeamento tem uma característica típica, como mostrada na Figura 23.

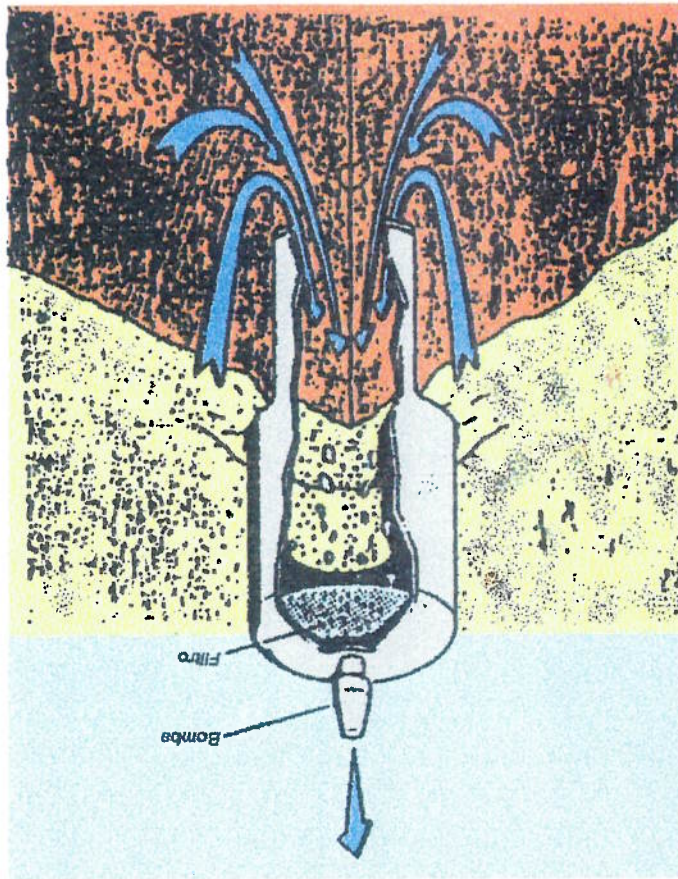


FIGURA 23 – COMPORTAMENTO DO FLUXO HIDRÁULICO PROVOCADO PELA SUÇÃO (HOGGERVORST, 1980)

Este bombeamento causa uma diferença de pressão hidrostática entre a pressão externa e interna da estaca e esta diferença de pressão gera uma força motriz para penetração da mesma no solo. O bombeamento é interrompido após alcançar a profundidade de projeto (Allersma et al., 1997).

Depois da instalação, a poro pressão no solo recupera os seus valores iniciais. As tensões são, portanto, restabelecidas no solo pela dissipação destas pressões que ocorrem de um modo semelhante quando uma estaca é cravada e gera pressões na interface estaca-solo. A bomba, as válvulas de ar e possíveis equipamentos de medida, montados no topo da estaca, podem ser recuperados após a instalação completada (Allersma et al., 1991).

A estaca de sucção tem diversas relações de comprimento/diâmetro (L/D) chamadas de “relações de aspecto”, sendo as mais empregadas as relações de 1, 2, 4, 6 e 12. Esta relação depende do tipo de solo encontrado no leito marinho e a resistência que se deseja alcançar para sustentar os esforços que o sistema flutuante sofrerá (El-Gharbawy et al., 1998) e (Allersma et al., 1997).

“A estaca de sucção é adequada para suportar cargas horizontais extremas. Quando é submetida a esforços de arrancamento, a capacidade de carga é reduzida. Se o solo é de baixa permeabilidade, as mudanças de tensões resultam na imediata redução de poro pressão abaixo da estrutura. O objetivo é aumentar a capacidade de carga da estaca pela redução da poro pressão dentro e embaixo da estaca, aumentando os atritos nas paredes interna e externa da estaca e mesmo a resistência da base oferecida pela “bucha de solo” (Fuglsang et al., 1991, p.153).

Estes fenômenos são bastante discutidos em diversos trabalhos. No Apêndice I, alguns destes trabalhos são relatados versando sobre a realização de modelagem física, em que são abordados aspectos importantes no emprego deste tipo de fundação, desde a metodologia no preparo dos materiais empregados na modelagem a instrumentação utilizada para análise dos resultados, a interpretação dos dados da instrumentação e algumas conclusões relevantes.

CAPÍTULO 6 - MODELO FÍSICO DE ESTACAS DE SUÇÃO NA CENTRÍFUGA IPT/FAPESP

6.1. Introdução

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma ferramenta de larga aplicação, ainda pouco utilizada que é a técnica de modelagem em centrífuga, evidenciando a fundamental importância da instrumentação eletrônica neste sistema.

Como caso ilustrativo, tomou-se o estudo do comportamento de estacas de sucção de diferentes geometrias na fase de instalação no solo marinho e quando submetidas a esforços de arrancamento.

Dentre os principais parâmetros intervenientes no seu comportamento estudados, destacam-se a geometria e a posição dos cabos de arrancamento.

As estacas de sucção empregadas no Brasil constituem-se de um tubo de aço fechado no topo e aberto na base, com sistemas de válvulas e bombas de sucção acoplados.

Como mencionado no capítulo anterior, as estacas de sucção são normalmente submetidas a elevados esforços horizontais. A resistência do conjunto solo-estaca de sucção caracteriza-se basicamente por:

- uma parcela decorrente do atrito entre a superfície externa da estaca e o solo marinho;
- uma parcela proveniente do atrito interno, induzido pela “bucha” de solo formada durante a instalação; e
- pela resistência de base oferecida pela “bucha” de solo.

O estudo da capacidade de carga dessas estacas, bem como da influência da geometria no seu comportamento, é de difícil execução no campo. As dimensões dos tubos, dos sistemas auxiliares e dos dispositivos necessários à instalação dificultam a realização de um programa de pesquisas metódico baseado em ensaios de campo. Desta forma, e considerando-se a importância em se trabalhar com os mesmos níveis de tensão atuantes no campo, procura-se desenvolver um projeto de pesquisa em modelos reduzidos submetidos a uma aceleração que pudesse reproduzir as condições encontradas no campo.

6.2. Características do Modelo Físico de Estacas de Sucção

As características dos modelos confeccionados, em comparação as dos protótipos, são apresentadas na Tabela 3.

Destaca-se que as dimensões dos modelos resultaram da consideração de uma aceleração correspondente a 150 vezes a aceleração da gravidade.

TABELA 3- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS ESTACAS DE SUCCÃO

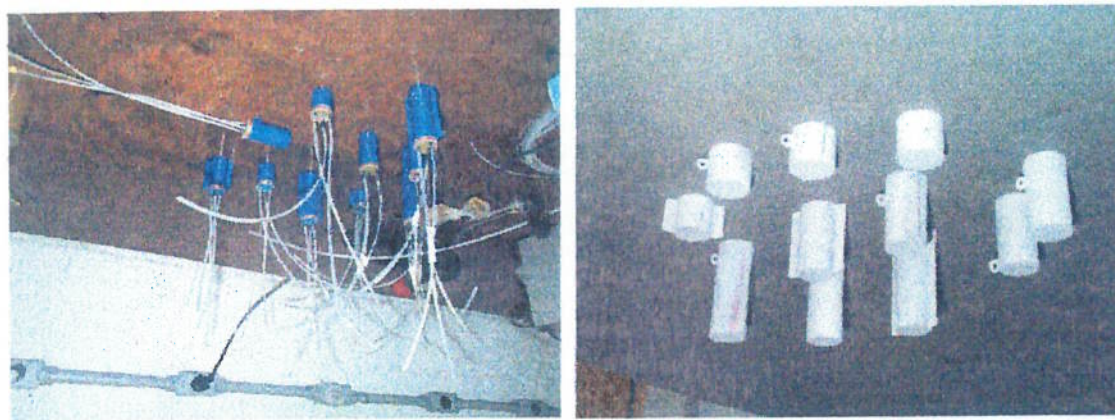
Característica	Protótipo	Modelo
Diâmetro - D (m)	3,81	$2,54 \times 10^{-2}$
Comprimentos - L (m)	3,81	$2,54 \times 10^{-2}$
	7,62	$5,08 \times 10^{-2}$
	11,42	$7,62 \times 10^{-2}$
Alças (m)	1,00	$0,60 \times 10^{-2}$

Considerando-se que a posição das amarras, através das quais os esforços são transmitidos às estacas, podem ser fixadas junto ao topo ou próximas à base (a cerca de $\frac{1}{3}$ do comprimento da estaca), foram confeccionados 12 modelos de estacas de sucção, cujas propriedades são descritas na Tabela 4.

A Figura 24 ilustra alguns dos modelos utilizados nos ensaios. Para a montagem dos modelos empregou-se um tubo de cobre e uma chapa de mesmo material para prover o fechamento do topo. Através de perfurações prévias na chapa de topo foram posicionados os instrumentos necessários aos ensaios, descritos no item a seguir.

TABELA 4 - RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS

Ensaio	Aletas	L/D	Amarra
1	N	1	Topo
2	N	1	1/3 base
3	S	1	Topo
4	S	1	1/3 base
5	N	2	Topo
6	N	2	1/3 base
7	S	2	Topo
8	S	2	1/3 base
9	N	3	Topo
10	N	3	1/3 base
11	S	3	Topo
12	S	3	1/3 base



A) ESTACAS SENDO PREPARADAS B) ESTACAS CONCLUÍDAS

FIGURA 24 - MODELOS DE ESTACAS DE SUÇÃO

Na Tabela 5 são apresentadas as forças peso de cada modelo de estacas de sucção e a sua correspondência com o protótipo.

TABELA 5 – FORÇA PESO DAS ESTACAS DE SUÇÃO

ESTACA	MODELO (N)	PROTÓTIPO* (kN)	PROTÓTIPO** (kN)
ENSAIO 1	0,397	8,9	20
ENSAIO 2	0,356	8,0	20
ENSAIO 3	0,386	8,7	25
ENSAIO 4	0,373	8,4	25
ENSAIO 5	0,495	10,7	40
ENSAIO 6	0,475	10,7	40
ENSAIO 7	0,531	11,9	50
ENSAIO 8	0,543	12,2	50
ENSAIO 9	0,628	14,1	58
ENSAIO 10	0,596	13,4	58
ENSAIO 11	0,671	15,1	74
ENSAIO 12	0,648	14,6	74

(*)Empregou-se o produto da força peso do modelo por N²

(**)Força peso dos protótipos reais

6.3. Características do Modelo Físico de Solo

O solo utilizado foi uma mistura argilosa industrializada, cujas características de granulometria e plasticidade se assemelham às encontradas no Campo de Marim. A curva granulométrica do solo e os resultados dos ensaios de laboratório realizados ao longo da campanha de testes das estacas modelo, são apresentados no Anexo I.

6.4. Instrumentação Eletrônica

Os ensaios dos modelos de estacas de sucção em centrifuga foram monitorados por instrumentos constituídos de sensores de pressão, célula de carga, atuador de nível d'água, micro motor e *encoder* que serão descritos a seguir.

6.4.1. Instrumentos para Medidas de “Poros – Pressões”

Para a medida das “poro-pressões” desenvolvidas durante o processo de instalação da estaca de sucção foram utilizados tubos capilares, protegidos por papel filtro para evitar a penetração de partículas finas do solo e, consequentemente, o entupimento do tubo, pedras porosas de bronze sinterizado, manguueiras plásticas e sensores de pressão.

As pedras porosas foram posicionadas no topo, do lado interno da estaca, e os tubos capilares foram fixados na parede interna das estacas, próximo à base, e também no interior do maciço de solo, em posição correspondente a cerca de 1,6 cm abaixo da ponta da estaca após a cravação de todo o seu comprimento.

Em função das dificuldades de fixação deste último sensor no centro do cesto, em posição correspondente ao eixo da estaca, o mesmo foi fixado na parede lateral do cesto.

Outra consideração que merece destaque refere-se à distância de 1,6 cm da posição da ponta da estaca após a cravação no solo. Esta distância corresponde aproximadamente a curvatura do solo na parte central do cesto, quando o mesmo é submetido a aceleração de 150 g (efeito da força de Coriolis).

Na outra extremidade dos tubos capilares e das pedras porosas foram instaladas manguueiras plásticas, conectadas aos sensores de pressão, acoplados à estrutura do cesto em posição correspondente a uma distância de 8cm da base do mesmo (Figura 32). Estes tubos e manguueiras foram totalmente saturados com água antes do início dos ensaios, garantindo assim as pressões no solo até os transdutores.

Os sensores de pressão apresentados na Figura 25 foram controlados por condicionadores de sinais instalados no bastidor interno, conforme a Figura 26, que se encontra no braço da centrífuga.

Os ajustes destes condicionadores de sinais, dependeram da calibração do conjunto, que ficaram assim ajustados:

Excitação: 5 VDC,
Ganho: 1000;
Filtro passa baixa: 10Hz.



FIGURA 25 - SENSORES DE PRESSÃO

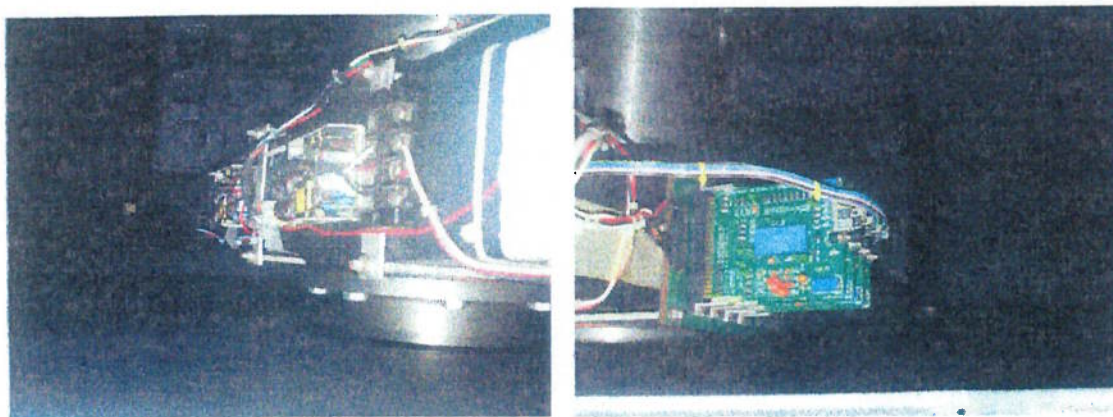


FIGURA 26 - CONDICIONADORES DE SINAIS IB3INA E FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Para a calibração dos sensores, além do procedimento usual de verificação da variação das pressões em função da voltagem, efetuou-se também ensaios preliminares para verificação das faixas de operação para cada uma das relações de

L/D em estudo, fixando-se a estaca na posição correspondente ao início da cravação e preenchendo-se o cesto somente com água.

Este procedimento visou a obtenção de uma curva de correção das pressões registradas, a fim de se poder avaliar qual a variação das poro-pressões ao longo dos ensaios.

Entretanto, dada a impossibilidade de simular os deslocamentos das estacas modelo durante a calibração, considerou-se como válida a relação de pressões correspondente à posição inicial de ensaio, admitindo-se que esta mantém-se constante durante as etapas de sucção e arrancamento da estaca.

Foi realizada uma verificação dos sensores na posição mencionada anteriormente para se conhecer a influência da aceleração centrípeta nos diafragmas destes sensores sem a interferência da coluna d'água. Constatou-se uma deformação nestes diafragmas, causando um erro da ordem de 46kPa para cada sensor.

No topo da estaca foi também instalada uma mangueira plástica, tendo em sua extremidade uma pedra de bronze sinterizado e tecido geotêxtil, através da qual foi aplicada a sucção no interior da estaca; a outra extremidade da mangueira foi conectada ao *slip rings* pneumo-hidráulico, instalado no eixo central da centrífuga, que por sua vez estava conectado a uma bomba de vácuo.

A pressão de sucção aplicada foi constante e correspondente ao limite máximo da bomba em uso (650 mmHg, ou seja, 85 kPa).

6.4.2. Célula de Carga

Para os ensaios de arrancamento foi empregada uma célula de carga de tração (vide Figura 27), construída em alumínio 2024 T6, cujo formato interno assemelha-se a um cubo, sob o qual foram colados *strain gages* com resistências nominais de 350Ω

e configuração de ponte completa para monitorar as cargas de arrancamento das estacas de sucção.

O dimensionamento desta célula foi para forças de tração até 600N (13,5MN no protótipo) e controlada por um dos condicionadores de sinais, tendo nas extremidades os fios para o engastamento na estaca e no sistema de engrenagens de um micro motor.

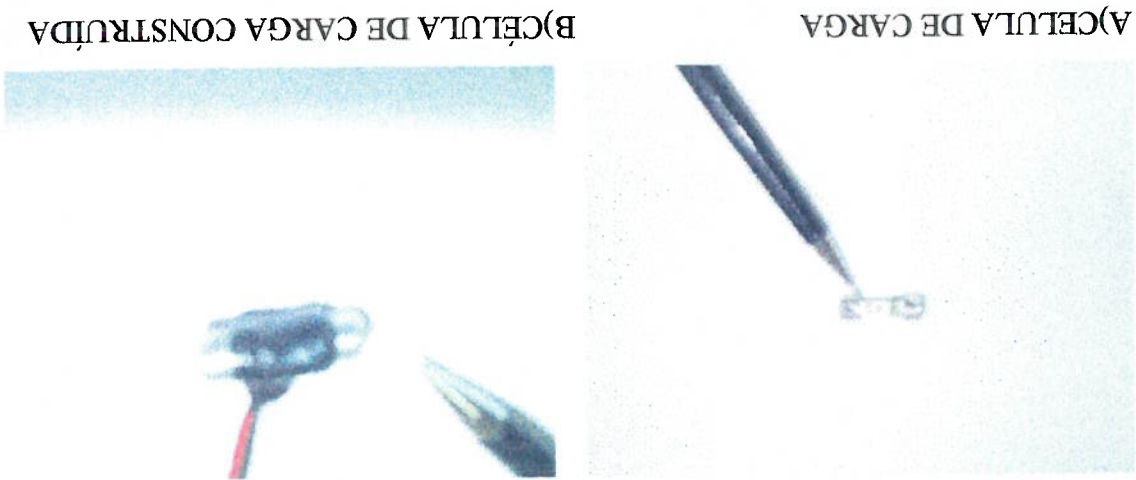


FIGURA 27 - CÉLULA DE CARGA

6.4.3. Micro Motor e Encoder

O micro motor empregado possui rotação de 5100 rpm, tendo no seu eixo um sistema de engrenagem planetário que a reduz 1526:1 rpm, o seu torque é igual a 600N para uma alavanca de 1cm (Figura 28).

O micro motor possui também um *encoder* que permite monitorar a sua rotação, sendo 15.000 pontos por resolução (uma volta no seu próprio eixo).

Este micro motor foi introduzido nos ensaios para reproduzir as cargas de arrancamento estimado da ordem de 400N. O motor foi ajustado por um potenciômetro externo para simular uma velocidade de arrancamento de 1,10mm/s no modelo, correspondendo no protótipo uma velocidade de 3,96m/h.

Roldanas especiais foram também instaladas nas paredes do cesto e suas posições variaram em função da posição das amarras (fios especiais de nylon devidamente calibrados), para manter o ângulo de arrancamento em 45°.

As velocidades e deslocamentos foram obtidas pelo *encoder* do motor.



B)MICROMOTOR NO BRAÇO



A)CALIBRAÇÃO ENCODER

FIGURA 28 - MICRO MOTOR E ENCODER

6.4.4.Atuador de Nivel D'água

Foi introduzido, nos ensaios, um atuador de nível d'água principalmente para atuar durante o processo de cravação por sucção, tendo-se verificado nesta etapa que a quantidade de água não era relevante. Na Figura 29 é apresentado o atuador montado.

Fora da centrífuga foi conectada uma bureta graduada preenchida com água através de uma mangueira de plástico até o *slip ring* pneumo-hidráulico que por sua vez conectava ao atuador de nível d'água. O intuito foi de compensar a retirada de água no interior do cesto durante o processo de cravação por sucção e também quantificá-la.

Na Figura 30 é possível visualizar o painel frontal que é constituído de indicadores digitais e gráficos. Também é possível notar componentes de controle como o de tempo de aquisição, campo de observações, identificação do ensaio, controle de gravação de arquivo, legendas identificando os instrumentos lidos, entre outros.

- Canal 0: Poro-pressão no topo e interior da estaca;
- Canal 1: Poro-pressão na base da estaca;
- Canal 2: Poro-pressão no solo;
- Canal 3: Célula de carga, e
- Canal 4: *Encoder* (determinação do deslocamento e velocidade de arrancamento);

Para a monitoração e aquisição de dados da instrumentação eletrônica foi desenvolvido um programa através da plataforma *LabVIEW*. Este programa foi elaborado para adquirir 5 canais de instrumentação sendo constituído assim:

6.4.5. Programa de Aquisição de Dados

Os resultados da calibração dos instrumentos empregados nos ensaios encontram-se no Anexo 2.

FIGURA 29 - ATUADOR DE NÍVEL D'ÁGUA

A) ATUADOR B) TESTE DO ATUADOR



A montagem dos ensaios iniciou-se com o preparo e disposição do solo no centro da centrífuga.

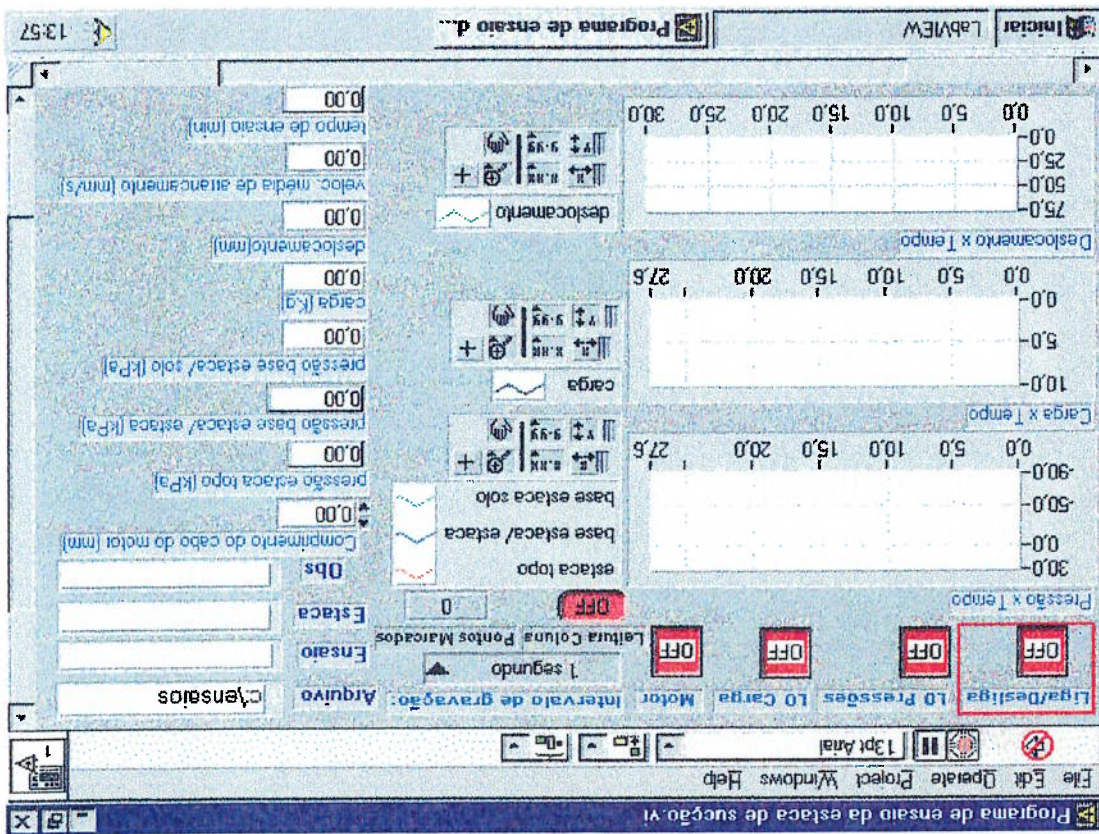
Para os ensaios em centrífuga definiu-se dispor o solo com uma resistência não drenada da ordem de 15 kPa, que corresponde a um teor de umidade da ordem de 33,4% e uma penetração de 7 mm no ensaio de cone de laboratório.

Feita a mistura do solo respeitando-se a especificação acima mencionada, o solo era depositado no cesto em camadas de aproximadamente 4 cm, para cada qual eram retiradas pequenas porções para a determinação da umidade e da penetração de cone.

6.5.1. Montagem dos Ensaio

6.5. Ensaio Realizados

FIGURA 30 - PAINEL FRONTAL DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS



Durante a fase de montagem tomaram-se todos os cuidados necessários para evitar a formação de bolhas de ar no interior da amostra, bem como para garantir a homogeneidade da mistura.

Atingidos cerca de 15 cm de espessura de solo no cesto (correspondentes a 24 m no protótipo), o mesmo era coberto por uma lâmina d'água cuja espessura dependia da altura do modelo a ser ensaiado (deixou-se sempre 1 cm de água sobre a estaca, de forma a manter constante a pressão sobre o topo no início da instalação das estacas modelo).

Concluído o preparo do solo no cesto posicionou-se a estaca modelo e todos os demais dispositivos necessários para a sua instalação e posterior arrancamento (vide Figura 31).

Ao término dos ensaios extraia-se uma amostra tipo *Shelby* (Figura 32) para repetição dos ensaios de umidade e de cone (Figura 33), como forma de controle da eventual ocorrência do fenômeno de adensamento no decorrer dos ensaios.



A) DETALHE 1

B) DETALHE 2

FIGURA 31 - MONTAGEM DE UM ENSAIO TESTE

FIGURA 33 - ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CONE



FIGURA 32 - AMOSTRA SHELBY EXTRAÍDA DO CESTO DA CENTRÍFUGA



6.5.2.Procedimentos Empregados

- Para a realização da série de ensaios prevista foi seguido o procedimento abaixo para cada ciclo das mesmas:
- Montagem do cesto com o solo nas condições especificadas, retirando-se parte do material para a realização dos ensaios de laboratório para determinação das suas características;
 - Adição de água sobre o solo até atingir-se uma espessura de lâmina 1 cm maior do que o comprimento da estaca modelo;
 - Posicionamento da instrumentação necessária aos ensaios de arrancamento (motor e sistema de roldanas fixados na centrífuga);
 - Saturação das mangueiras conectadas ao sistema de sucção e dos medidores de pressão (pedras porosas e tubo capilar);
 - Posicionamento da estaca modelo a ser ensaiada, utilizando-se uma haste guia de forma a garantir a verticalidade durante a instalação;
 - Conexão dos sensores de pressão às mangueiras saturadas e da célula de carga aos fios de nylon ligados ao motor;
 - Acionamento do programa de aquisição de dados, verificando-se se há resposta de todos os instrumentos conectados;
 - Acionamento da centrífuga, programada para atingir uma aceleração equivalente a 150 vezes a aceleração da gravidade;
 - Até atingir-se a aceleração especificada o sistema de sucção é mantido desligado; mantêm-se iguais as pressões externa e interna à estaca através da ligação do sistema de sucção à água do cesto;
 - Ao alcançar-se a aceleração de 150 g verifica-se, num intervalo de 2 minutos, qual a penetração ocorrida em decorrência do peso próprio do modelo de estaca;
 - O sistema de sucção é acionado e mantido em funcionamento por período de tempo não superior a 1 minuto (cravação por sucção de 3 horas no protótipo);
 - Estando instalada a estaca o sistema de sucção é desligado e a estaca é mantida no solo até estabilizarem-se as pressões medidas (aguarda-se 10 minutos para a estabilização, o que corresponde a 6 meses no protótipo);

- Estabilizadas as pressões, o motor é ligado e inicia-se o processo de arrancamento da estaca, cujos registros de carga e deslocamento são feitos automaticamente pelo sistema de aquisição de dados;
- Concluído o ensaio desmonta-se o cesto e procede-se a retirada de amostras do solo para os ensaios de verificação de resistência; e
- Retira-se o solo para a limpeza completa do cesto e dos acessórios antes de iniciar-se nova montagem.

6.5.3. Ensaios Complementares

Após a realização da série de 12 ensaios prevista (Tabela 4), objetivando avaliar especificamente a influência da forma geométrica na capacidade de carga das estacas modelo, realizou-se uma série adicional de 12 ensaios de arrancamento, seguindo-se os procedimentos básicos já descritos anteriormente. A principal diferença desta nova série refere-se à forma de instalação da estaca no solo: ao invés de realizar-se a instalação sob uma aceleração de 150 g, a mesma foi feita manualmente a 1 g, mantendo-se durante a cravação o mesmo nível de pressões na parte interna e externa do topo da estaca. Após a cravação, a centrifuga foi acionada e passou-se a medir as pressões, cargas e deslocamentos necessários ao arrancamento das estacas modelo.

No Anexo 3 apresentam-se diversos registros fotográficos ilustrando as diversas etapas dos ensaios.

6.6 Resultados Obtidos

6.6.1 Primeira Série de Ensaios

Para cada um dos 12 ensaios de cravação e arrancamento realizados foram traçadas as curvas de variação das poro-pressões desenvolvidas junto ao topo e na base da estaca e, também, no solo abaixo da ponta da estaca.

Estas curvas apresentam o comportamento dos modelos reduzidos ensaiados durante as fases de aceleração da centrífuga (de 1 a 150 g), de cravação por peso próprio, de cravação por efeito da sucção e também na fase do ensaio de arrancamento.

As curvas de carga x deslocamento de cada um dos ensaios também pode ser traçada. Nestas curvas o deslocamento apresentado foi medido por meio do cabo de nylon fixado ao motor e consequentemente ao *encoder*, representando, portanto, a resultante do movimento sofrida pela estaca quando submetido a esforços aplicados sob um ângulo de 45 graus.

Não foi possível separar este deslocamento em parcelas relativas aos movimentos vertical e horizontal das estacas modelo ensaiadas.

Para tanto, seriam necessários instrumentos de alta precisão instalados no interior da centrífuga em posição tal que não interferisse no comportamento das estacas modelo ou como sugerido por Allersma (1997), empregando-se sistemas de tratamento de imagens para obtenção destes deslocamentos dadas as dimensões da centrífuga, do cesto empregado (espessura de apenas 13 cm), e dos modelos em análise.

O comportamento observado nos ensaios realizados está ilustrado pelos gráficos apresentados no Anexo 4. As Tabelas 6 e 7 apresentam uma síntese dos principais resultados.

A Tabela 8 apresenta uma descrição da forma de ruptura verificada nos ensaios, com destaque para a formação da “bucha” de solo.

Procurou-se observar visualmente, a ocorrência dos movimentos do solo e da estaca durante os ensaios de arrancamento, embora os mesmos não tenham sido registrados por equipamento fotográfico especial, acoplado à centrífuga e lâmpadas estroboscópicas.

Ensaio	Principais Eventos*	Topo da estaca (kPa)	Base da estaca (kPa)	Solo (kPa)
1	Aceleração igual a 150 g Aplicação da sucção Ensaio de arrancamento	20 -50 -35	-104 -104 -104	0 0 0
2	Aceleração igual a 150 g Aplicação da sucção Ensaio de arrancamento	15 7 -10	10 5 -6	-13 -10 -7
3	Aceleração igual a 150 g Aplicação da sucção Ensaio de arrancamento	-33 -58 -70	-12 -13 -15	-22 -20 -15
4	Aceleração igual a 150 g Aplicação da sucção Ensaio de arrancamento	18 13 -7	7 3 -10	-21 -18 -15
5	Aceleração igual a 150 g Aplicação da sucção Ensaio de arrancamento	-20 18 -45	-37 -37 -45	-51 -50 -44
6	Aceleração igual a 150 g Aplicação da sucção Ensaio de arrancamento	-8 -22 -52	-2 -12 -37	-23 -18 -9
7	Aceleração igual a 150 g Aplicação da sucção Ensaio de arrancamento	58 71 -8	8 8 -17	-51 -50 -42
8	Aceleração igual a 150 g Aplicação da sucção Ensaio de arrancamento	10 6 -7	7 7 -3	5 5 5

TABELA 6 - EXCESSO DE PORO-PRESSÕES MEDIDAS

Ensaio	Carga Máx. (N)	Desl. (mm)	Protótipo	
			Carga Máx. (MN)	Desl. (m)
1	30	90	0,67	13,5
2	50	65	1,12	9,75
3	40	90	0,90	13,5
4	60	132*	1,35	19,8*
5	50	62	1,12	9,3
6	80	53	1,80	7,95
7	70	65	1,57	9,75
8	70	62	1,57	9,3
9	70	136*	1,57	20,4*

TABELA 7 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Os ensaios 1, 8 e 9 foram repetidos devido aos problemas nas mangueiras conectadas nos sensores de pressão.

(*) Considerando-se o instante correspondente a cerca de 10 s após o início do evento
 (**) A letra R refere-se a repetição do ensaio para esclarecimento de dúvidas

9	Aceleração igual a 150 g	38	-5	96
	Aplicação da sucção	75	-5	94
	Ensaio de arrancamento	34	-5	86
10	Aceleração igual a 150 g	11	-34	-90
	Aplicação da sucção	8	-76	-103
	Ensaio de arrancamento	-21	-106	-128
11	Aceleração igual a 150 g	43	65	51
	Aplicação da sucção	43	65	89
	Ensaio de arrancamento	-50	4	109
12	Aceleração igual a 150 g	30	-32	75
	Aplicação da sucção	61	-34	88
	Ensaio de arrancamento	-4	-63	77

Continuação da Tabela 6

10	210**	54	4,72	8,1
11	70	76	1,57	11,4
12	90	57	2,02	8,55

(*) Um deslocamento da ordem de 50 mm foi necessário para esticar o fio

(**) Problemas na célula

Continuação da Tabela 7

TABELA 8 - FORMA DE RUPTURA NOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Ensaio	"bucha" de solo	Forma de ruptura
1	Parcial	Tombamento para o lado do olhal
2	Completa	Tombamento para o lado oposto ao olhal
3	Parcial	Deslocamento horizontal para o lado do olhal
4	Completa	Tombamento para o lado oposto ao olhal
5	Parcial	Tombamento para o lado do olhal
6	Completa	Tombamento na horizontal para o lado oposto ao do olhal (estaca imersa no solo)
7	Parcial (desprende-se no arrancamento)	Tombamento para o lado do olhal
8	Completa	Tombamento para o lado oposto ao olhal
9	Parcial	Tombamento para o lado do olhal
10	Completa	Tombamento para o lado oposto ao olhal
11	Parcial (desprende-se no arrancamento)	Deslocamento vertical com posterior tombamento para o lado oposto ao do olhal
12	Completa	Deslocamento vertical com posterior tombamento para o lado oposto ao do olhal

6.6.2 Segunda Série de Ensaios

Os resultados obtidos na segunda série de ensaios, na qual as estacas foram cravadas manualmente e submetidas a arrancamento sob aceleração, são resumidos na Tabela 9. Nesta tabela apresentam-se a carga máxima atingida no ensaio e o respectivo deslocamento medido, bem como descreve-se a situação da "bucha" observada após o arrancamento.

TABELA 9- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO
ADICIONAIS

Ensaio	Carga Máxima (N)	Deslocamento (mm)	"Bucha" de solo
1	75	85	Parcial (pequena porção de solo junto a ponta - estaca com ligeira inclinação)
2	76	57	Completa
3	65	74	Completa
4	77	76	Completa
5	107	84	Parcial (cerca de 2 cm)
6	118	76	Parcial (cerca de 2 cm) – presença de água no interior da estaca
7	118	88	Parcial (cerca de 4 cm)
8	134	98	Parcial (cerca de 3 cm) – presença de água no interior da estaca
9	108	81	Parcial (cerca de 5 cm) – presença de água no interior da estaca
10	124	95	Parcial (cerca de 3 cm) – presença de água no interior da estaca
11	128	101	Parcial (cerca de 3 cm) – presença de água no interior da estaca
12	156	124	Parcial (cerca de 5 cm)

Na Tabela 10 apresentam-se os valores correspondentes entre modelos e protótipos. Na realização destes ensaios esperou-se a estabilização das pressões sob a aceleração de 150 g (tempo aproximado de 3 minutos) para acionar o dispositivo de arrancamento. As curvas carga x deslocamento, as variações de pressão, assim como os excessos de poro-pressões registrados, encontram-se no Anexo 5.

TABELA 10 – CORRESPONDÊNCIA DAS CARGAS DE RUPTURA ENTRE MODELOS E PROTÓTIPOS

Modelo		Protótipo	
Ensaio	Carga Máx (N)	Deslocamento (mm)	Carga Máx (MN)
1	75	85	1,69
2	76	57	1,71
3	65	74	1,46
4	77	76	1,73
5	107	84	2,41
6	118	76	2,65
7	118	88	2,65
8	134	98	3,01
9	108	81	2,43
10	124	95	2,79
11	128	101	2,88
12	156	124	3,51
			18,60

6.7.Análise dos Resultados

6.7.1.Fatores Intervenientes nos Ensaios

Para avaliação dos resultados obtidos na série de ensaios realizada faz-se necessário destacar alguns procedimentos adotados, assim como as maiores dificuldades

encontradas na montagem dos sistemas auxiliares. Dentre os principais fatores intervenientes nos resultados podem ser destacados:

- Transdutores de pressão

Um *manifold* rígido a qual foram fixados os três sensores de pressão encontrava-se preso pela sua parte central a 8 cm de distância da base do cesto. Entretanto, quando a centrífuga era acelerada a 150 g, este *manifold* sofria um movimento de rotação, fazendo com que o sensor das medidas de pressão do topo da estaca se deslocasse para uma posição ligeiramente inferior a 8 cm.

Os outros dois sensores para medidas de pressão na base da estaca e o solo, ao contrário, tinham sua posição aumentada em 9,5 e 9,8cm, respectivamente.

Este comportamento exigiu a aplicação de fatores de correção aos dados de calibração, os quais foram aplicados na interpretação de todos os ensaios aos quais já haviam sido realizados quando o problema fora detectado conforme a Figura 34 e a

Tabela 11.

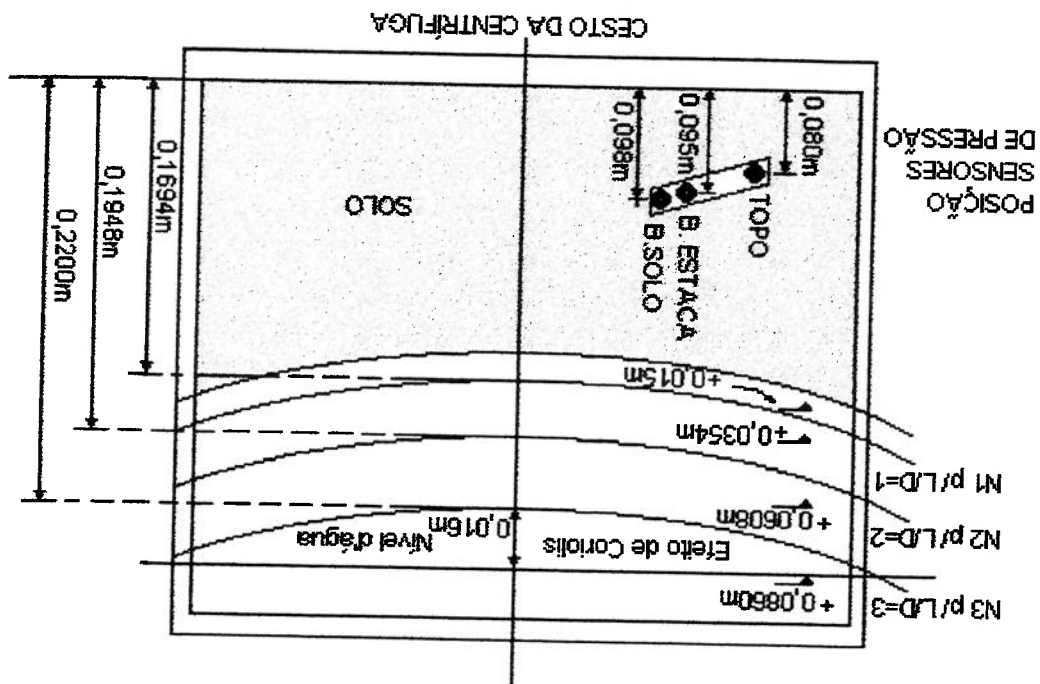


FIGURA 34 - POSIÇÃO DOS SENSORES DURANTE OS ENSAIOS

Este problema se manifestou de forma mais intensa nos modelos com relações L/D iguais a 1 e 2; nos modelos com L/D = 3 conseguiu-se manter a verticalidade.

O uso de modelos em escala reduzida por vezes esbarra na escolha dos materiais a serem empregados. No presente caso, o uso do cobre para a confecção das estacas mostrou-se muito leve em relação aos pesos das estacas protótipo. Os materiais leves das aletas e dos olhais também mostraram-se inadequados, pois os mesmos não apresentavam resistência compatível aos esforços previstos. Assim, foi necessário o emprego de chapas e anéis de aço de pequena espessura, que representaram uma massa adicional significativa aos modelos de estacas, dificultando a manutenção da verticalidade na fase de instalação da estaca.

• Modelos de Estacas de Sucção

Como não se dispunha de sensores especiais, de pequena dimensão, que pudessem ser fixados nos pontos de interesse das medidas de pressão, como utilizados por Fuglsang et al. (1991), não foi possível eliminar os problemas decorrentes do posicionamento no cesto e saturação das mangueiras e tubos capilares. Para o traçado das curvas de excesso de poro-pressões consideraram-se as medidas dos sensores durante os ensaios descontados os valores registrados durante a calibração.

CORRIGIDOS		VALORES IDEAIS	
L/D=3	L/D=2	L/D=1	L/D=1
256,9	219,1	181,0	210,0
233,3	195,5	157,4	187,5
227,6	189,8	151,7	183,0
			145,2
			107,1

Unidades em kPa

TABELA 11 – FATORES DE CORREÇÃO DAS PRESSÕES

- **Sistemas auxiliares: mangueiras de sucção e conexões**

Outro fator que dificultou a manutenção da verticalidade da estaca foi a presença dos segmentos de mangueira plástica fixados ao topo da estaca, os quais eram responsáveis pela conexão desta com os sistemas de medidas de pressão e sucção. Estas mangueiras, dispostas formando um ângulo aproximado de 120° graus entre si, por vezes tombavam durante a centrifugação, gerando esforços não verticais nos modelos.

- **Solo**

A instalação e homogeneização do solo no interior do cesto pode ser uma fonte de erro nas medidas de pressão. Apesar do controle pré e pós ensaio realizado, a dimensão do cesto (13 cm de largura) e a presença dos conectores dos sensores de pressão dificultou a disposição do solo no interior do cesto, podendo-se observar através da superfície acrílica, algumas pequenas fissuras e bolhas de ar ocultas no maciço.

Outra consideração é que não se conseguiu repetibilidade nas características do solo nas diversas montagens realizadas, o que pode ser observado pelos valores dos teores de umidade e penetrações do cone apresentados no Anexo I.

6.7.2 Comparação das Medidas de Poro - Pressão

No Anexo 4 é ilustrado, para cada uma das relações L/D estudadas, as variações de poro-pressões no topo e na base da estaca e também no interior do solo, para a primeira série de ensaios realizada (cravação seguida de arrancamento). A análise destes gráficos indica que:

- As medidas de poro-pressão no topo da estaca em alguns ensaios apresentaram um comportamento uniforme, outros ao contrário, indicaram ora excesso de pressão positiva e ora negativa. Consegue-se observar com pouco destaque em

alguns ensaios o efeito provocado pela aplicação da sucção. Nota-se com maior destaque uma diminuição das pressões no início do ensaio de arrancamento;

- Para as medidas de pressões atuantes na base da estaca, não foi possível identificar uma tendência de comportamento geral, observando-se apenas uma relativa repetibilidade nas estacas cuja relação L/D é igual a 2.

As pressões atuantes na base da estaca, na maioria dos ensaios, o tubo capilar utilizado foi, em geral, de difícil saturação, suscitando-se do seu entupimento durante os ensaios;

- Os valores de excesso de poro-pressão no solo medidos nos ensaios cuja relação L/D é igual a 1 mantiveram-se praticamente nulos; o mesmo se observa para as relações L/D iguais a 2 e 3, apenas alguns ensaios não mantiveram estas tendências indicando problemas de saturação ou entupimento do sistema de medidas de pressão, merecendo assim, melhor investigação no futuro.

6.7.3 Capacidade de Carga das Estacas Modelo

Além do comportamento disperso das pressões verificadas nos ensaios, e da diferente relação de pesos entre os modelos e protótipo, pode-se observar que os valores das cargas máximas obtidas durante os ensaios de arrancamento não se encontram consistentes.

A repetição dos ensaios 1, 8 e 9 mostrou claramente que não se conseguiu, mesmo tendo sido seguido um procedimento padronizado de montagem e execução dos ensaios, a repetibilidade do comportamento do conjunto solo-estaca modelo.

Esperava-se, como já observado no campo, que a presença de aletas representasse um ganho na capacidade resistente das estacas modelo; a posição do olhal junto a base da estaca também deveria contribuir para um melhor desempenho das estacas.

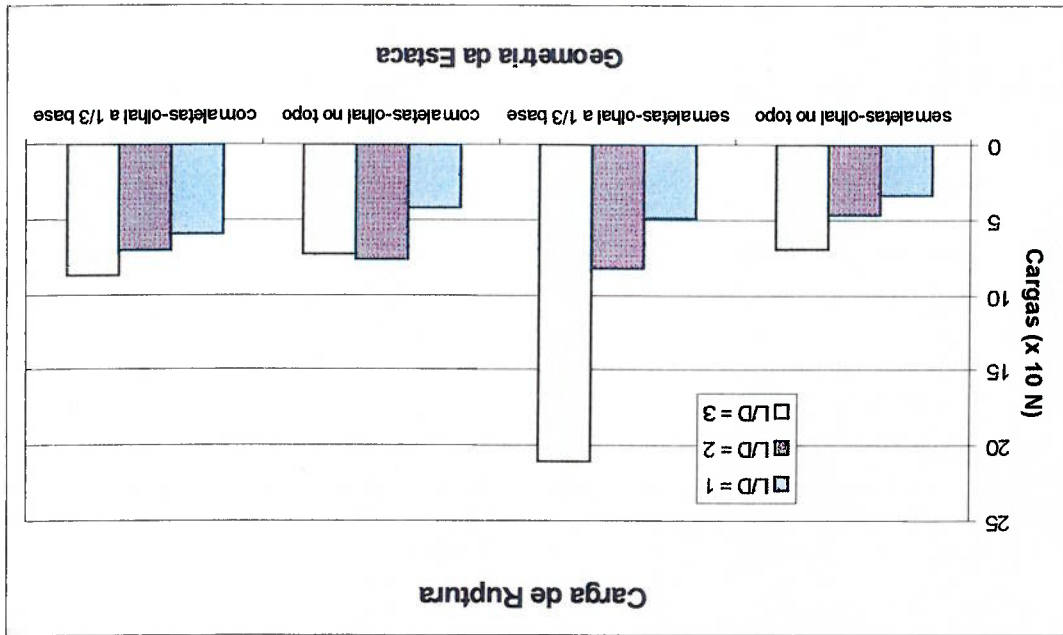


FIGURA 35 - CARGAS DE RUPTURA MEDIDAS NOS ENSAIOS DE CRAVAÇÃO E ARRANCAMENTO

No entanto não foi observado uma consistência dos dados dos ensaios de arrancamento conforme pode ser visto na Figura 35. Uma das razões destes resultados foi da instalação da estaca no solo não ter sido adequada, devido a manutenção da verticalidade das estacas e do sistema de sucção não ter funcionado como projetado. Tal fato motivou a realização da série adicional de ensaios de arrancamento, empregando-se a cravação manual, cujos resultados são discutidos a seguir.

6.7.4 Ensaios de Arrancamento Adicionais

No Anexo 5 é ilustrado o comportamento observado nas estacas modelo de diferentes geometrias submetidas ao arrancamento sob aceleração de 150 g, após cravação a 1 g. A análise destes dados, no tocante as variações de pressão, permite inferir que:

- Ao atingir-se a aceleração equivalente a 150 g (tempo da ordem de 2:45 min), o

excesso de poro-pressão no topo é praticamente nulo nas estacas modelo, em todas as estacas ensaiadas, o início do arrancamento é marcado por uma redução do excesso de poro-pressão;

- Os medidores de pressão instalados no solo não acusam variação de poro-pressão nos ensaios, confirmando a inexistência de interferências causadas pelo arrancamento das estacas naquela região; e

- As medidas de poro-pressão na base da estaca não apresentaram uma tendência bem definida de comportamento. Tal fato decorre das suspeitas de mau funcionamento do sistema em decorrência das particularidades do tubo capilar e do processo de formação da "bucha".

No que se refere as cargas de ruptura atingidas durante os ensaios destacam-se:

- De forma geral, a fixação da amarra junto a base da estaca confere maior capacidade de carga ao conjunto solo-estaca, pois para atingir-se a ruptura é necessária a mobilização dos empuxos passivos atuantes junto a parede lateral na face em que se encontra o olhal;
- A presença de aletas também tende a aumentar a capacidade de carga do conjunto. Um maior ganho é verificado quando associam-se as aletas ao olhal junto a base da estaca; e
- Como era esperado, para maiores relações de L/D as cargas de ruptura são maiores (maior parcela de atrito lateral).

As observações acima referem-se as situações da "bucha" de solo mencionada na Tabela 9. O processo de cravação manual, em vários modelos ensaiados, não conferiu às estacas a formação de "bucha" completa e a expulsão total da água do interior das estacas modelo.

A formação de "bucha" completa talvez pudesse vir a conferir um comportamento diferenciado ao observado nos ensaios.

FIGURA 37 - ESQUEMA GERAL DOS ENSAIOS DE ESTACAS DE SUÇÃO

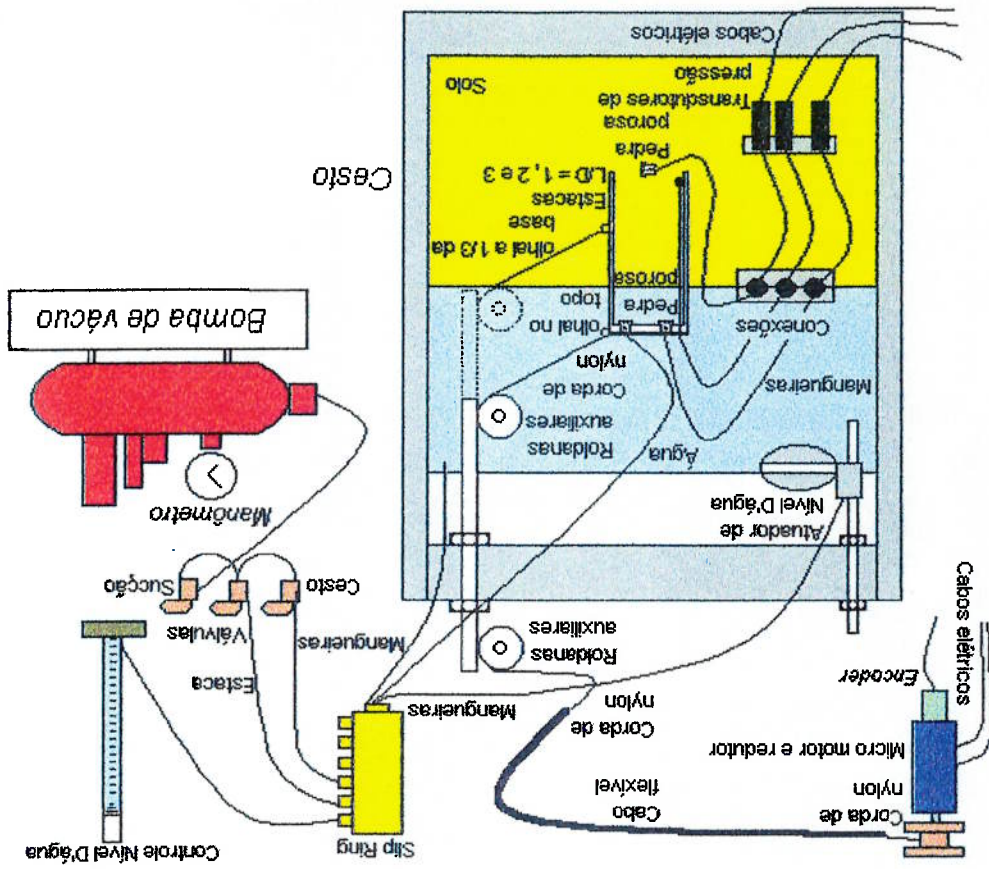
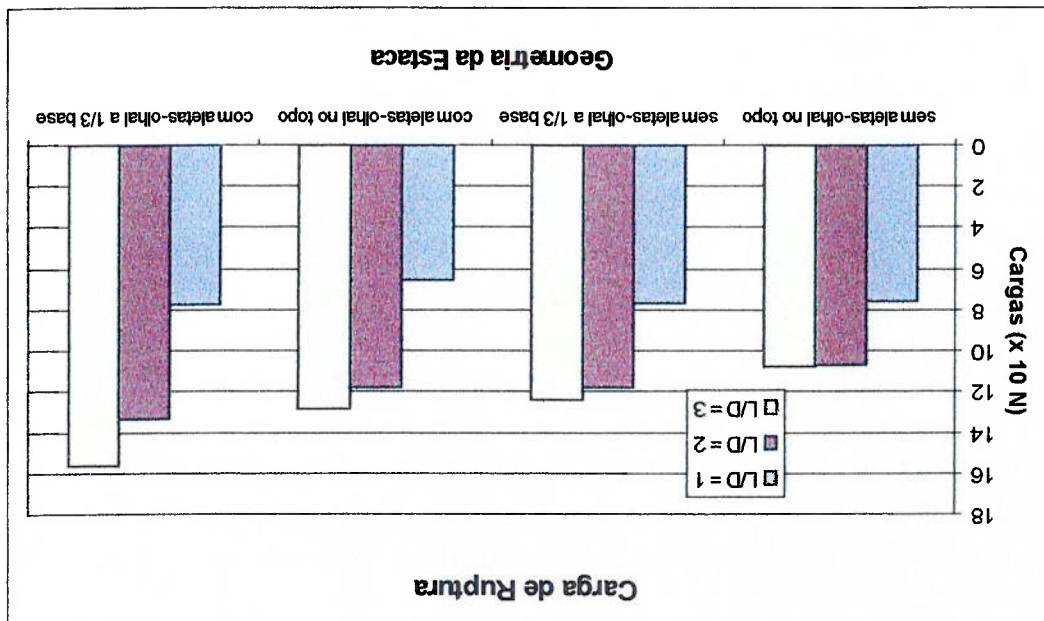


FIGURA 36 - CARGAS DE RUPTURA MEDIDAS NOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO



A análise da Figura 36 indica que o Ensaio 1, realizado em uma estaca modelo sem aletas, com olhal no topo e relação L/D igual a 1, não segue a tendência verificada para os demais ensaios. Os ensaios cujas relações de L/D igual a 2 e 3 mostraram-se consistentes, indicando uma tendência de ganho de capacidade de carga com a introdução de aletas e o olhal próximo à base. A Figura 37 mostra um esquema geral dos ensaios realizados.

CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios em modelos reduzidos realizados em centrífuga não obtiveram êxito esperado na simulação do procedimento de cravação das estacas. Numa primeira análise pode-se afirmar que o sistema de sucção não funcionou corretamente, além dos sistemas de medidas das poro-pressões (mangueiras, pedras de bronze sinterizado e tubos capilares), que não permitiu uma simulação fidedigna das suas dimensões, interferiram seriamente no comportamento das estacas modelo, impedindo uma instalação adequada das mesmas e, conseqüentemente, uma análise do comportamento das pressões desenvolvidas nos pontos de interesse.

A realização da cravação prévia (fora da centrífuga) permitiu a análise comparativa dos efeitos das variações geométricas na capacidade de carga ao arrancamento, respeitando-se as diferenças entre os pesos dos modelos e protótipo. Os valores dos excessos de poro-pressões registrados nesta etapa de ensaio, mostraram-se consistentes.

No âmbito da linha de pesquisa desenvolvida vislumbra-se a possibilidade de ampliação do escopo dos ensaios realizados por meio de:

- novas simulações, adotando-se os mesmos procedimentos empregados, com modelos reduzidos em escala diferente, a fim de avaliar possíveis interferências das bordas do cesto (efeitos de borda);
- desenvolvimento de novos modelos reduzidos, com materiais, geometrias e posições das amarras diferentes das utilizadas;
- nova série de ensaios em outro tipo de solo (solo arenoso, por exemplo) ou no mesmo mas em outra consistência (variação dos parâmetros de resistência da argila);

- introdução de um sistema eletrônico (medidor de vazão) que permita o controle do volume de água sucionada do interior da estaca durante a sua cravação;
- criação de dispositivos ou sistemas de imagem que permitam o controle dos deslocamentos sofridos pelas estacas modelo ao longo dos ensaios, e não somente durante o arrancamento;

- desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados com transferência destes dados por ondas de radio, sendo os sinais digitalizados no interior da centrífuga empregando-se a tecnologia de transmissão por telemetria;
- desenvolvimento de novas tecnologias como o emprego de raios X e pó de chumbo junto aos modelos, que permita um acompanhamento minucioso do processo de instalação e arrancamento, possibilitando uma melhor definição da forma de ruptura do solo;

- o emprego de sensores miniaturizados, como exemplo: transdutores de pressão introduzidos no interior das estacas e solo para medidas de poro-pressões; e
- Implantação de filmadoras para registros dos eventos em voo, enriquecendo ainda mais o sistema de aquisição de imagens, para posterior tratamento de imagens para visualização precisa do fenômeno de cravação e arrancamento.

CAPÍTULO 9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMENTO, M.; NIYAMA S. e RAMIRES, R. "Behaviour of Submersed Reinforced Soil Slope in the Centrifuge", XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguaçu, 1999.
- ACI (American Concrete Institute) Committee 444. "Dynamic Modeling of Concrete Structure", ACI publication SP-73, Detroit-Michigan, 1982.
- ALBERT, L.F., HOLTZ, R.D. and MAGRIS, E. "Super pile system, a feasible alternative foundation for TLP in deep water", Marine Geotechnology, Vol. 8, pp. 135-158, 1989.
- ALLERSMA, H.G.B. "On line measurement of soil deformation in centrifuge tests by image processing", 9th Int. Conf. On Experimental Mechanics, Vol.4, pp. 1739-1748, 1990.
- ALLERSMA, H.G.B. "The University of Delft geotechnical centrifuge", Int. Conf. Centrifuge 94, Balkema, Rotterdam, pp. 47-52, 1990.
- ALLERSMA, H.G.B., F.J.A. Plenevaux, J., F.P.C., WITGENS. "Simulation of suction pile installation in sand in a geocentrifuge", 7th Offshore and Polar Engineering Conference, pg. 761-766, 1997.
- ANDRESSON M. B., H.P. Christoffersen & T.J.Kvalstad. Field model tests and analyses of suction installed long skirted foundation. BOSS '88, Trondheim, Proc. Vol.1, p. 243-257, 1988.
- BABA, H.U., Gulhati, S.K. & Datta, M. "Suction effects in plate anchors in soft clays", 12th ICSMFE Rio de Janeiro, Brazil, vol. 1, pg. 409-412, 1989.

BALDI, G., Belloni G., & Maggioni, W. "The ISMES geotechnical centrifuge", Centrifuge 88, Corté (ed.), Balkema, Rotterdam, 1988.

BEMBEN, S.M. & Kupferman, M. "The vertical holding capacity of marine anchor flukes subjected to static and cyclic loading", 7th Offshore Technology Conference, Houston – Texas, OTC paper 2185, pg. 363-374, 1975.

BASSETT, R.H., Craig, W.H. "The development of geotechnical centrifuges in the United Kingdom", Centrifuge in Soil Mechanics, Rotherdam, A. A. Balkema, pg. 35-60, 1988.

BROWN, G.A. & Nacci, V.A. "Performance of hydrostatic anchors in granular soils", 3rd Offshore Technology Conference, Houston – Texas, OTC paper 1472, pg. 533-542, 1971.

BURGESS, I.W., Hird, C.C. & Cuckson, J. "Sinking tests on caisson anchors in clay. In offshore structure: The use of physical models in their design", Ed. By G.S.T. Armer & F.K. Garas. Construction Press, pg. 289-298, 1981.

BYE, A., Erbrich, C., Tjelca, T.I. "Geotechnical Design of Bucket Foundations", Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC 7793, pp869-883, 1995.

BYRNE, P.M. & Finn, W.D. Liam. "Breakout of submerged structure buried to a shallow depth", Can. Geotechnical Journal, vol. 15, pg. 146-154, 1978.

CANDEIAS, J.P., "Modelação Física com Centrifugadora", Tese de doutorado, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, 1999.

CLURKEY, E. C. and M. Morrison. "A Centrifuge and Analytical Study to Evaluate Suction Caissons for TLP Application in the Gulf of Mexico. Design and Performance of Deep Foundations, Pile and Piers in Soil and Sft Rock", Geotech Special publication No. 38, 1993.

- CRAIG, W.H. & CHUA, K. "Extraction forces for offshore foundations under undrained loading", Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, vol. 116, No. 5, pg. 868-884, 1990.
- DAVIE, J.R. & SUTHERLAND, H.B. "Modelling of clay uplift resistance", J. Geotech. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. 104, GT6, pp. 755-760, 1978.
- DAVIE, J.R. & SUTHERLAND, H.B. "Uplift resistance of cohesive soil", Jour. Of Geotech. Engr. Div., ASCE, vol. 103, No. GT9, pg. 935-952, 1977.
- EL-GHARBAWY, S. L. The Pullout Capacity of Suction Caisson Foundations for Tension Leg Platforms. Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin, and 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal – Canada, vol. 1, pg. 531-536, 1998.
- EL-GHARBAWY, S. L., OLSON, R. "Laboratory Modeling of Suction Caisson Foundation", 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal-Canada, vol. 1, pg. 537-542, 1998.
- FAPESP - "Desenvolvimento do Primeiro Protótipo de Equipamento para Ensaio de Centrifuga em Geotecnia", Relatório Científico n° 93/03435-2, 1997.
- FAU, D. and D. Raynaud. "L'ancrage par succion. Etude sur modeles réduits", Revue Française de Géotechnique, No. 36, 1986.
- FINES, S., O Stove, and F. Gulberg. Snorre TLP Tethers and Foundation. Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 6623, pg. 587-597, 1991.
- FINN, W. D. L., BYRNE, P. M. "The Evaluation of The Breakout Force for a Submerged Ocean Platform" Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC 1604, 1972.

FUGLSANG, L.D., J.O Steensen-Bach. " Breakout resistance of suction piles in clay", Proc. Int. Conf. Centrifuge 91, pp. 153-159, 1991.

GOULDMAN, L.J., Lee, C.N. & Walker, F.J. "The feasibility of vacuum anchorage in soil", Geotechnique, vol. 1, No.3, pg. 356-359, 1961.

HALPERN, M.R. and Christiano, P. "Response of Poroelastic Half-Space to Steady-Harmonic Surface Traction", International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 10, pp 606-632, 1996.

HELFRICH, S.C., R.L. Brazill, A.F. Richards, U. Lehigh. "Pullout characteristics of a suction anchor in sand". 8th Offshore Technology Conference, OTC 2469, pg. 501-506, 1976.

HIRAISHI, T., Honjo, T. and Furukawa, M. " Characteristics of Motion and Tension of a Ferry Moored in a Storm", Proceedings Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 38, pp 731-735, 1991.

HOGERVORST, J.R. "Field Trials with Large Diameter Suction Anchor", Proceedings of 12th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, pp. 217-224, 1980.

IPT - "Desenvolvimento do Primeiro Protótipo de Equipamento para Ensaios de Centrifuga em Geotecnia", Relatório Técnico n° 34.940, 1997.

KIMURA, T. "Centrifuge research activities in Japan" Centrifuges in Soil Mechanics, Rotherdam, Balkema, pg. 19-28, 1988.

KO, H.Y. "Summary of the state-of-the-art in the centrifuge model testing" Centrifuge in Soil Mechanics, Rotherdam, Balkema, pg. 11-18, 1988.

LARSEN, P. "Suction anchors as an anchoring system for floating offshore constructions", 21st Offshore Technology Conference, Houston-Texas, OTC paper 6029, pg. 535-540, 1989.

LEE, J. Homa. "Breakout of partially embedded objects from cohesive seafloor soils", 5th Offshore Technology Conference, Houston Texas, OTC paper 1904, pg. 789-802, 1973.

MAENO, Y., Takatani, T., Hiraishi, T. and Takayama, T. "Dynamic Response of Suction Pile Anchors in Poroelastic Seabed Due to Mooring Force", 5th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 1, pg. 420-425, 1995.

MAENO, Y., Takatani, T., Hiraishi, T. and Takayama, T. "Dynamic Response of Seabed around Anchors of a Double Point Mooring System", Proceedings of Civil Engineering in the Ocean, JSCE, Vol. 9, pp. 123-128, 1993.

MAENO, Y., Takatani, T., Hiraishi, T. and Takayama, T. "Application of Suction Anchor to the Mooring System for Floating Structure", Proceedings of Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 40, pp. 906-901, 1993.

MUGA, B.J. "Bottom breakout forces", ASCE Convention, Civil engineering in the oceans, pg. 569-600, 1967.

NARASIMHA Rao, S., Ravi, R., Ganapathy, C. " Pullout Behaviour of Model Anchors in Soft Marine Clays", 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu – USA, Vol.1, pg. 740-744, 1997.

NARASIMHA Rao, S., Prasad, Y. V, S.N., and Veeresh, C. " Behaviour of embedded model screw anchors in soft clays", Geotechnique, Vol. 43, No4, pp. 605-614, 1993.

- NHIEM, T.V. "Uplift resistance of anchor slabs in soft clay", Proceedings Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference, Istanbul, vol.2, pg. 114-123, 1975.
- NINOMIYA, K., Tagaya, K. & Murase, Y. "A study on suction and scouring of sit-on-bottom type offshore structure", 4th Offshore Technology Conference, Houston – Texas, OTC paper 1605, pg. 869-886, 1972.
- NITYAMA S., Gobara W., Dionisi A, Machado J.R.A, Alvim F.M., Ramires R., Tachibana L.S. "Desenvolvimento do Primeiro Protótipo de Centrífuga IPT para Geotecnia", X COBRANSEF – X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Foz do Iguaçu, 1994.
- NITYAMA, S. "Contribuição para o estudo do embuchamento em estacas cravadas de ponta aberta", tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1992.
- RAPORT, V. & Young, A G. "Uplift capacity of shallow offshore foundations", Proceedings of session, "Uplift behaviour of anchor foundations in soil", ASCE Convention, Detroit – Michigan, pg. 73-85, 1985.
- RENZI, R.W.Maggioli, F. Smits. "A centrifugal study on the behaviour of suction piles", Proc. Int. Conf. Centrifuge 91, pp. 169-176, 1991.
- SEMPERE, D. and G.A Auvergne. "Suction anchor piles – A provent alternative to driving or drilling.", Offshore Technology Conference, OTC 4206, pp. 483-494, 1982.
- SILMARÁ, C.A.S. "Modelagem em centrífuga: um caso de aplicação a estabilidade de frente de túneis", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

SHOFFIELD, A.N. "An introduction to centrifuge modelling", Centrifuges in Soil Mechanics, Rotherdam, Balkema, pg. 1-9, 1988.

STEENSEN BACH, J. "Recent model tests with suction piles in clays and sand", Offshore Technology Conference, 6844, Vol. 1, pp. 323-330, 1982.

STOVE, O J., S. Bysnveen and H. Christophersen. "New Foundation Systems for the Snorre Development", Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC 6882, pp75-83, 1992.

TAKATANI, T., Maeno, Y., Hiraishi, T. and Takayama, T. "Dynamic Response of Poro-elastic Seabed around a Mooring Anchor with Pretention", Proceedings of the 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference, Singapore, Vol. 1, pp. 567-572, 1993.

TAKATANI, T., Maeno, Y., Hiraishi, T. and Takayama, T. "Dynamic Response of a Mooring Anchor in Poroelastic due to Mooring Force", Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Vol. 1, pp. 448-455, 1993.

TAKATANI, T., Maeno, Y., Hiraishi, T. and Takayama, T. "Dynamic Response of Seabed around a Mooring Anchor with Pretention due to Swing of Ferry Boat", Proceedings of Coastal Engineering in Japan, Vol. 39, pp. 846-850, 1992.

TAKATANI, T., Maeno, Y., Hiraishi, T. and Takayama, T. "Frequency Response of Seabed around Anchor due to Steady-State Mooring Force", Proceedings of Civil Engineering in the Ocean, JSCE, Vol. 8, pp. 451-456, 1992.

TAKATANI, T., Maeno, Y., Hiraishi, T. and Takayama, T. "Dynamic Response of Seabed around an End Bearing Anchor due to Steady-State Mooring Force", Proceedings of Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 38, pp. 736-740, 1991.

TAKATANI, T. and Kitamura, Y. "Dynamic Behavior of End Bearing Anchor in a Fluid-Saturated Poroelastic Half-Space", Proceedings of the 8th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 1209-1214, 1990.

TATSUOKA, F., Okahara, M., Tanaka, T., Tani, K., Morimoto, T. and Siddiquee, M.S.A - "Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of a footing in sand" ASCE Geotechnical Engineering Congress, Vol II (Geotechnical Special Publication 27), pp.788-802, 1991.

TAYLOR, R. N. "Geotechnical Centrifuge Technology", Blackie Academic e Professional, London, 1995.

TJELTA, T., P. A. J. Hermstad and E. Andenaes. "The Skirt Piled Gulffaks C Platform Installation". Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 6473, pp. 453-462, 1990.

TJELTA, T.I., Guttormsen, T.R. "Large-scale penetration test at a deep-water site", 18th Offshore Technology Conference, Houston-Texas, OTC paper 5103, pg. 201-212, 1986.

VESIC, A.S. "Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom", Jour. Of Soil Mech. And Found. Eng. Div., ASCE vol. 97, No. SM9, pg. 1183-1205, 1971.

WANG, M.C., K.R. Demars and V.A Nacci. "Application of suction anchors in offshore technology." Offshore Technology Conference, OTC 3203, pp.1311-1320, 1978.

WANG, M.C., K.R. Demars and V.A Nacci. "Breakout capacity of model suction anchors in soil", Can. Geotech. Jour., vol.14, pg. 246-257, 1977.

WANG, M.C., K.R. Demars and V.A Nacci. "Behaviour of underwater suction anchor in soil", Ocean Engng., vol.3, pg. 47-62, 1975.

WILSON, Q. & Sahota, B.S. "Pull-out parameters for buried suction anchors", 12th Offshore Technology Conference, Houston-Texas, OTC paper 3816, 205-216, 1980.

WILSON, Q. & Sahota, B.S. " Suction anchors", European Offshore Petroleum Conference & Exhibition, London, EUR 16, 1978.

WISS, Janney, Elstner Associates. "Model Bridge Survey", Federal Highway Administration, publication no FHWA – RD – 90 – 069, vol. 1 a 5, 1982.

ANEXO 1 - ENSAIOS LABORATORIAIS

PROPRIEDADES DO SOLO DISPOSTO NO CESTO DA CENTRÍFUGA

Os ensaios preliminares foram realizados a fim de se verificar a eventual ocorrência do fenômeno de adensamento no tempo necessário para o desenvolvimento dos ensaios.

DURAÇÃO APROXIMADA DO ENSAIO: 60 min. (em vóo)

Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	33,19	7,1	0 a 3	33,88	7,4
4 a 8	33,29	8,3	3 a 6	34,08	6,6
8 a 12	33,15	8,0	6 a 9	33,84	7,3
12 a 15	32,67	7,5	9 a 12	33,38	7,1
			12 a 15	34,83	7,9

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra *Shelby* (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone

DURAÇÃO APROXIMADA DO ENSAIO: 90 min. (em vóo)

Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	34,21	7,8	0 a 3	35,00	7,1
4 a 8	35,18	9,2	3 a 6	19,31**	6,3
8 a 12	34,77	8,5	6 a 9	34,95	7,2
12 a 15	34,25	8,4	9 a 12	36,09	8,8
			12 a 15	39,26	10,3

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra *Shelby* (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone
(**) suspeita da ocorrência de algum problema nesta camada

DURAÇÃO APROXIMADA DO ENSAIO: 45 min. (em voo)

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra *Shelby* (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone

Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	36,83	10,1	0 a 2,5	36,85	8,8
4 a 8	37,90	10,7	2,5 a 5,0	37,66	9,5
8 a 12	35,85	8,8	5,0 a 7,5	37,75	9,4
12 a 15	36,62	8,8	7,5 a 10,0	37,46	9,5
			10,0 a 12,5	38,14	10,0
			12,5 a 15,0	33,01	9,3

DURAÇÃO APROXIMADA DO ENSAIO: 120 min. (em voo) – 4 ensaios de 30 min. cada

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra *Shelby* (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone

Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	38,01	9,4	0 a 4 cm	37,06	8,3
4 a 8	36,81	8,1	4 a 8 cm	36,42	7,8
8 a 12	37,82	8,8	8 a 12 cm	36,78	8,4
12 a 15	37,33	9,6	12 a 15 cm	38,25	8,6

ENSAIOS 9 e 10

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra *Shelby* (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone

Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	37,46	11,6	0 a 2,5	38,45	10,9
4 a 8	37,04	11,6	2,5 a 5,0	37,99	11,9
8 a 12	37,43	11,8	5,0 a 7,5	36,71	11,5
12 a 15	37,26	10,1	7,5 a 10,0	37,79	11,0
			10,0 a 12,5	37,94	11,7
			12,5 a 15,0	40,01	13,6

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra Shelby (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone

Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	34,36	7,2	0 a 2,5	34,13	8,9
4 a 8	35,08	7,9	2,5 a 5,0	34,20	8,5
8 a 12	33,73	7,8	5,0 a 7,5	34,25	8,5
12 a 15	33,56	7,0	7,5 a 10,0	34,14	8,9
			10,0 a 12,5	35,80	10,6
			12,5 a 15,0	35,00	9,1

ENSAIOS 1, 2, 3, 4 e 8

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra Shelby (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone

Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	39,76	10,9	0 a 4 cm	38,96	12,4
4 a 8	39,26	12,1	4 a 8 cm	39,20	12,6
8 a 12	39,34	11,5	8 a 12 cm	39,35	12,8
12 a 15	40,04	12,4	12 a 15 cm	41,16	14,6

ENSAIOS 5 e 7

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra Shelby (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone

Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	36,67	7,9	0 a 2,5	39,06	9,2
4 a 8	37,18	8,7	2,5 a 5,0	39,11	11,9
8 a 12	37,52	9,6	5,0 a 7,5	39,30	12,4
12 a 15	38,66	9,4	7,5 a 10,0	39,43	12,0
			10,0 a 12,5	38,50	13,2
			12,5 a 15,0	40,81	13,2

ENSAIOS 6, 11 e 12

ENSAIOS 1, 8 e 9 (Repetição)

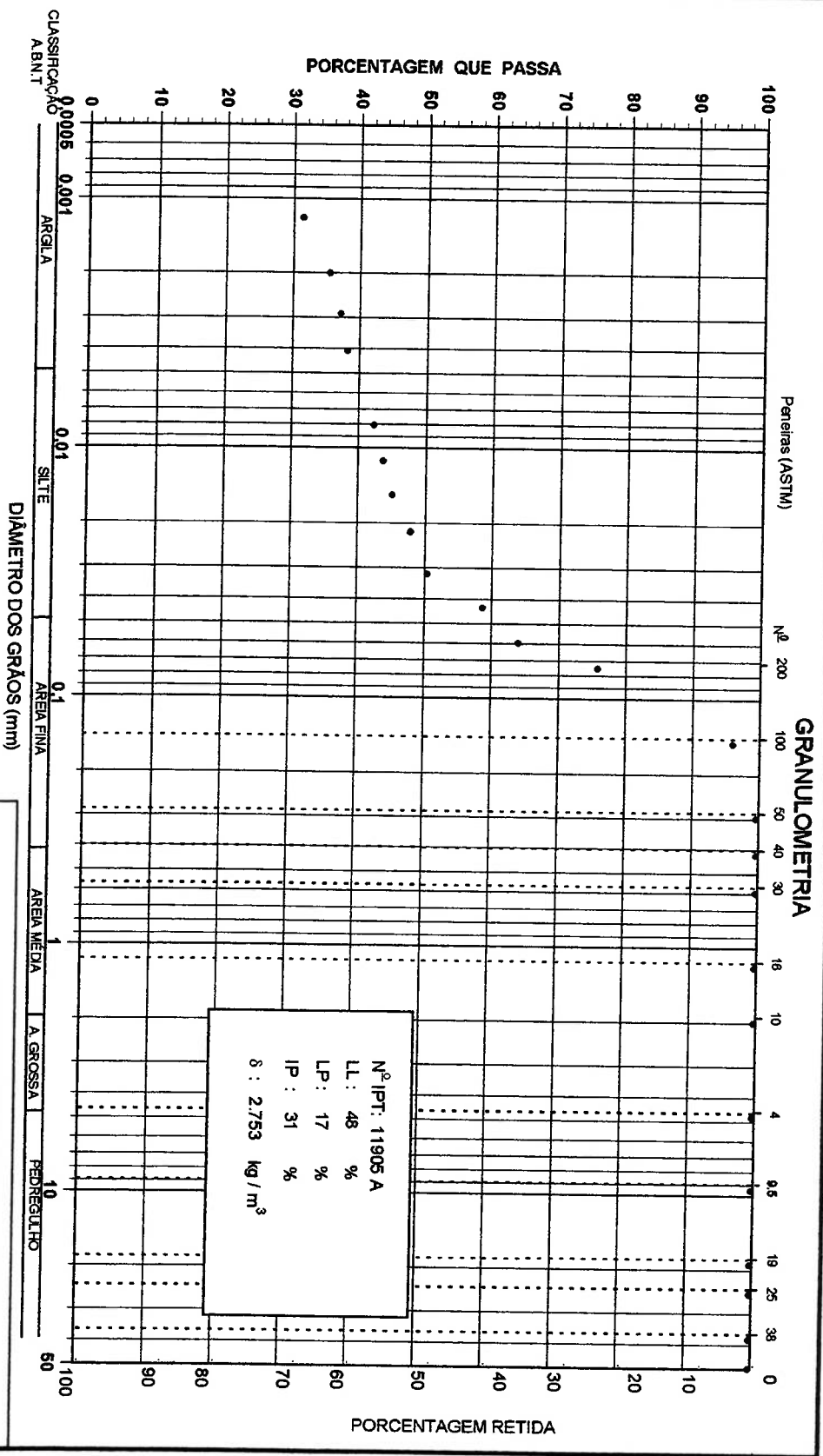
Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	37,06	11,1	0 a 2,5	36,68	9,9
4 a 8	38,86	10,7	2,5 a 5,0	38,05	12,4
8 a 12	36,50	10,8	5,0 a 7,5	37,81	10,7
12 a 15	36,25	8,6	7,5 a 10,0	37,17	11,3
			10,0 a 12,5	38,12	12,8
			12,5 a 15,0	38,65	11,5

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra *Shelby* (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone

ENSAIOS DE ARRANCAMENTO (SÉRIE ADICIONAL)

Posição* (cm)	Antes do Ensaio		Posição* (cm)	Após o Ensaio	
	Umidade (%)	Pen.Cone (mm)		Umidade (%)	Pen.Cone (mm)
0 a 4	34,77	8,7	0 a 2,5	33,07	7,5
4 a 8	34,84	9,1	2,5 a 5,0	33,64	7,1
8 a 12	33,10	9,2	5,0 a 7,5	33,86	7,5
12 a 15	33,66	8,2	7,5 a 10,0	34,20	7,4
			10,0 a 12,5	35,36	8,5
			12,5 a 15,0	38,22	12,8

(*) admitindo-se como zero a base do cesto da centrífuga na retirada da amostra *Shelby* (Pen.Cone) Ensaio de Penetração do cone



INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS
 DO ESTADO DE SÃO PAULO S/A - IPT
 DEPT. - Agrup. de Mec. Solos e Fundações

DATA:	17/12/2001	ENGº	A.M.S.F.
DES.			

CENPES

AC1 - R.T. 56 726

ANEXO 2 - CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Calibrado em 10 de outubro 2001

Nome do Arquivo: Sensor de Pressão_EK459001_101001.xls

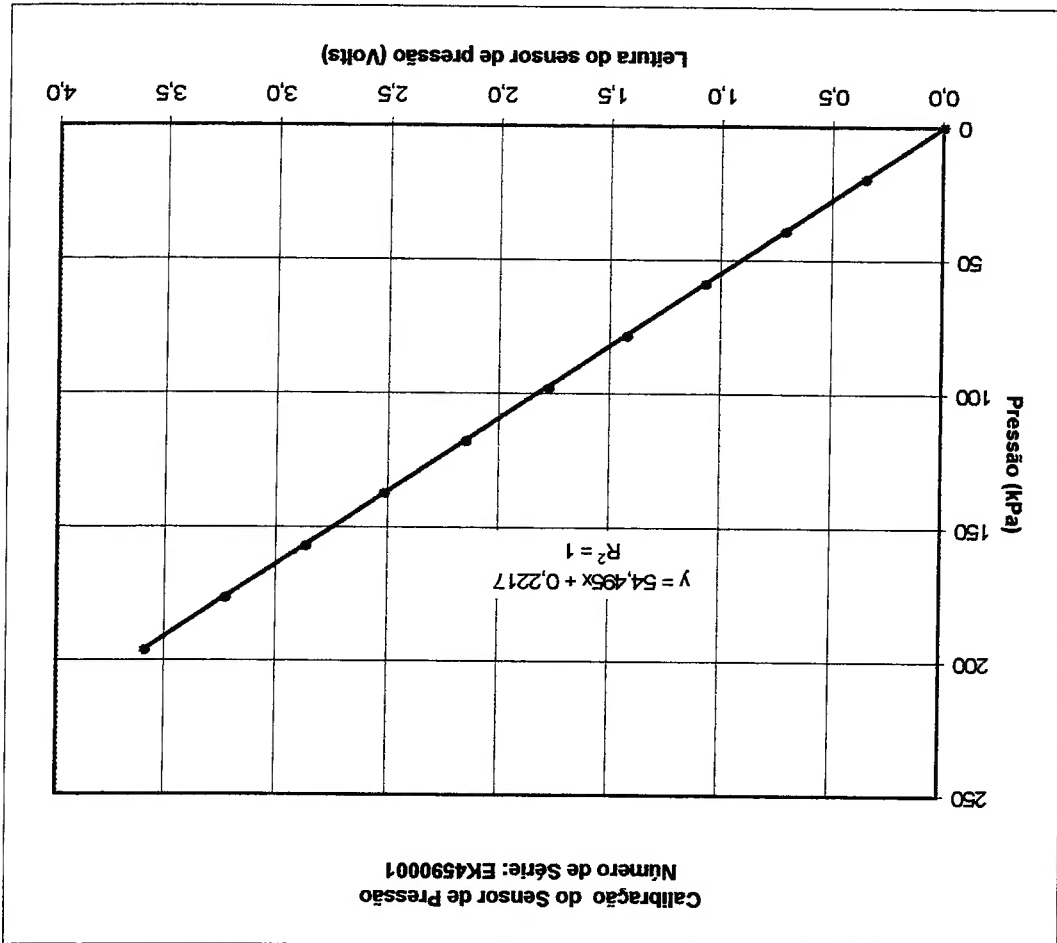
Excitação (+)	Vermelho
Excitação (-)	Preto
Sinal (+)	Verde
Sinal (-)	Branco

Saída: 1B31 AN - Módulo 1 (slot1) canal 0
 Excitação: 5V
 Ganho: 1000
 Filtro: 10Hz

Capacidade : 200KPa

N. Série: EK459001
 Sensor de pressão: PGM - 2KC

Sensor de pressão	Voltagem	Pressão KPa
0,000	0,000	0,000
0,356	0,718	19,613
0,718	1,074	39,227
1,074	1,431	58,840
1,431	1,787	78,453
1,787	2,155	98,067
2,155	2,523	117,680
2,523	2,874	137,293
2,874	3,234	156,906
3,234	3,597	176,520
3,597		196,133



Calibrado em 10 de outubro 2001

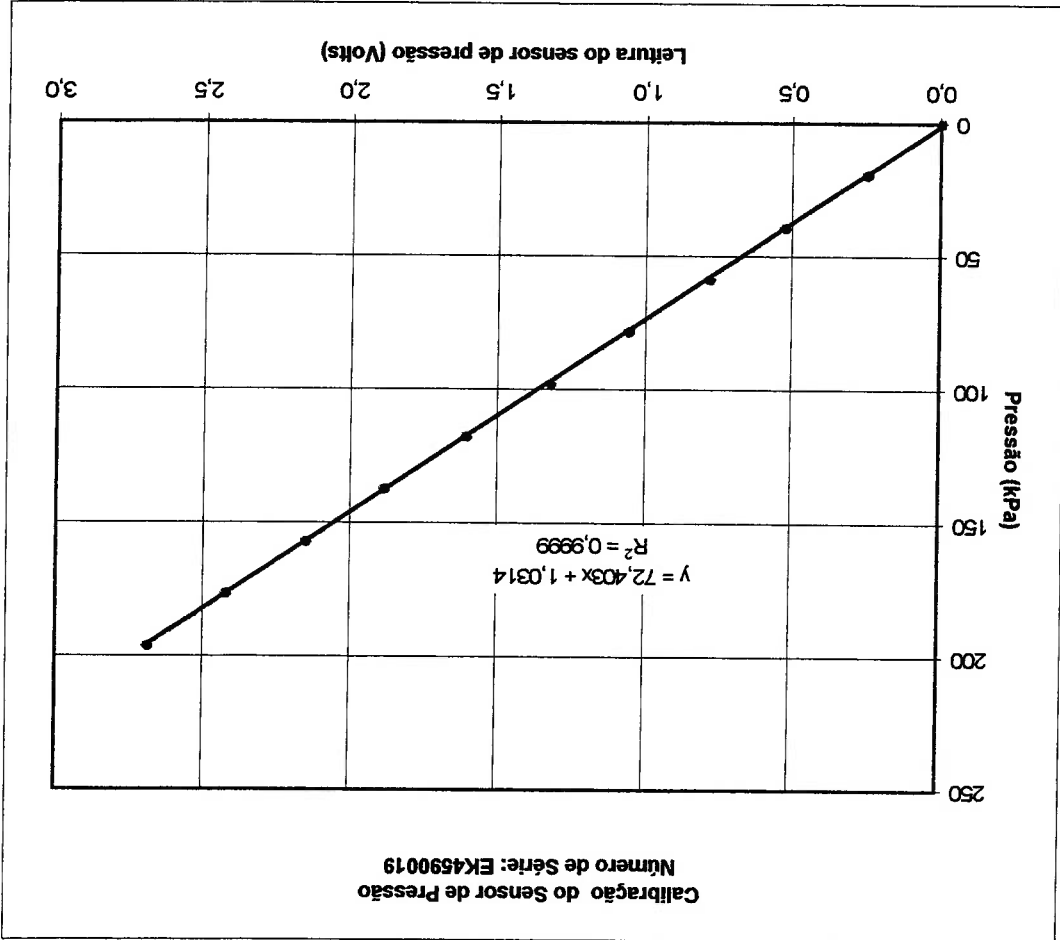
Nome do Arquivo: Sensor de Pressão_EK4590019_101001.xls

Excitação (+)	Vermelho
Excitação (-)	Preto
Sinal (+)	Verde
Sinal (-)	Branco

Saída: 1B31 AN - Módulo 2 (slot2) canal 1
 Excitação: 5V
 Ganho: 1000
 Filtro: 10Hz

Sensor de pressão: PGM - 2KC
 N. Série: EK4590019
 Capacidade : 200kPa

Sensor de pressão	Voltagem	Pressão
0,000	0,000	0,000
0,254	19,613	0,000
0,531	39,227	0,000
0,788	58,840	0,000
1,063	78,453	0,000
1,327	98,067	0,000
1,611	117,680	0,000
1,890	137,293	0,000
2,157	156,906	0,000
2,429	176,520	0,000
2,694	196,133	0,000



Calibrado em 3 de outubro 2001

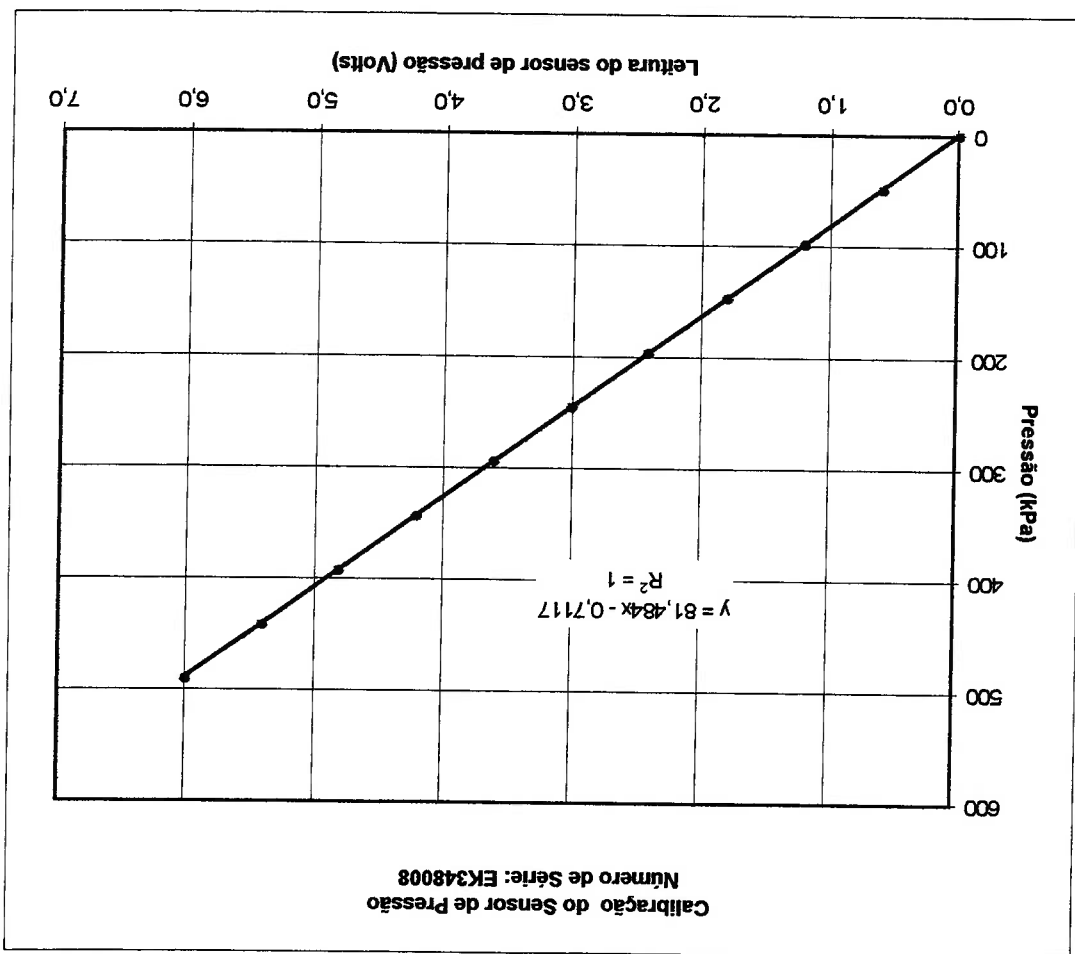
Nome do Arquivo: Sensor de Pressão_EK348008_031001.xls

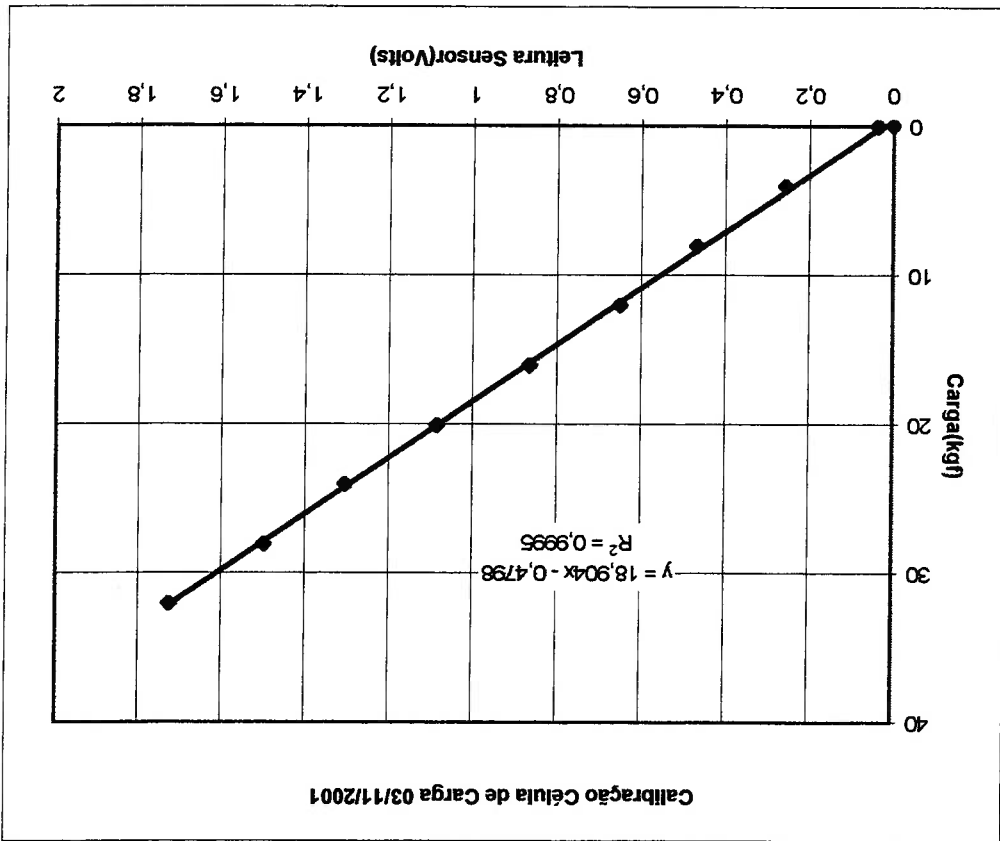
Excitação (+)	Vermelho
Excitação (-)	Preto
Sinal (+)	Verde
Sinal (-)	Branco

Saída: 1B31 AN - Módulo 3 (slot) canal 2
 Excitação: 5V
 Ganho: 1000
 Filtro: 10Hz

Sensor de pressão: PGM - 5KH
 N. Série: EK348008
 Capacidade : 500KPa

Pressão KPa	Voltagem
0,000	0,000
49,033	0,597
98,067	1,217
147,100	1,822
196,133	2,427
245,166	3,023
294,200	3,622
343,233	4,222
392,266	4,828
441,299	5,423
490,333	6,012





Nome do Arquivo: calceicarga_cent_031201.xls

Excitação: 5V
 Saída do Sensor: (slot 1) canal 3
 Ganho: 2000
 Filtro: 10Hz

Excitação (+)	Vermelho
Excitação (-)	Preto
Sinal (+)	Branco
Sinal (-)	Marrom

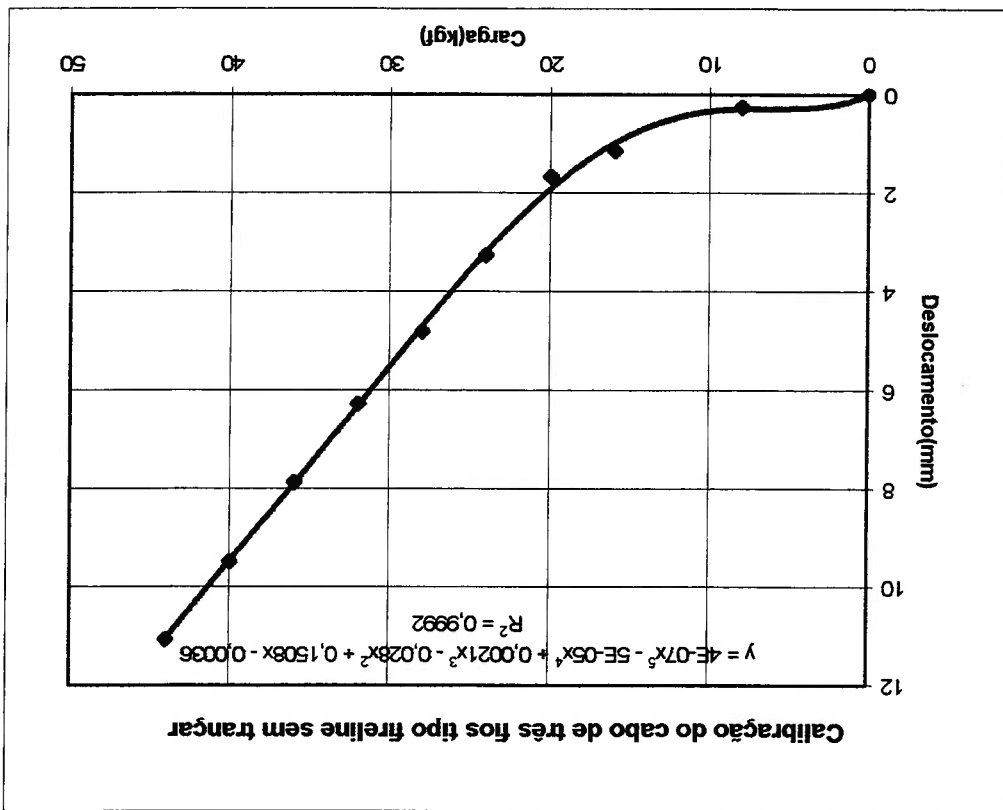
Calibrado em 03 de dezembro de 2001

Leitura sensor	voltagem	Carga (kgf)
1,725	0,000	0
1,499	0,037	0,056
1,305	0,259	4,056
1,087	0,467	8,056
0,866	0,651	12,056
0,651	0,866	16,056
1,087	1,087	20,056
1,305	1,305	24,056
1,499	1,499	28,056
1,725	1,725	32,056

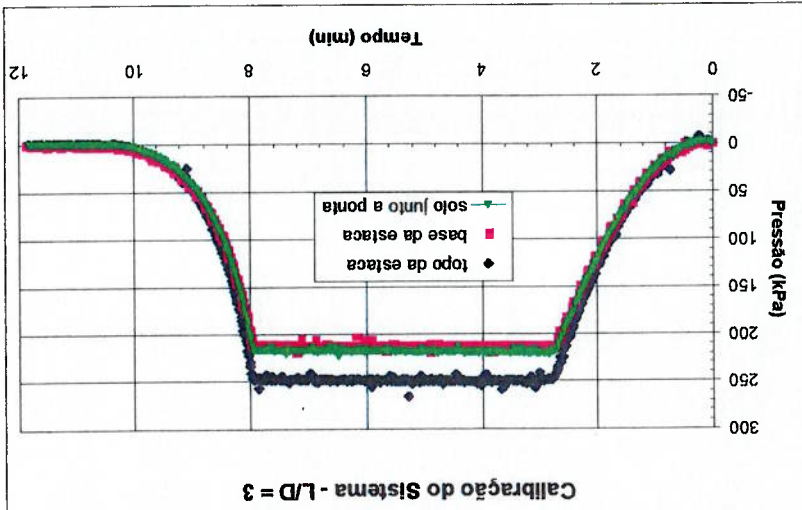
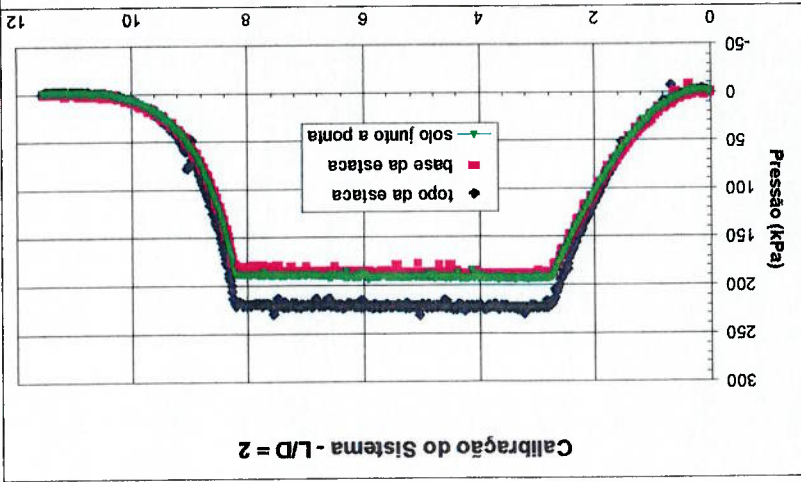
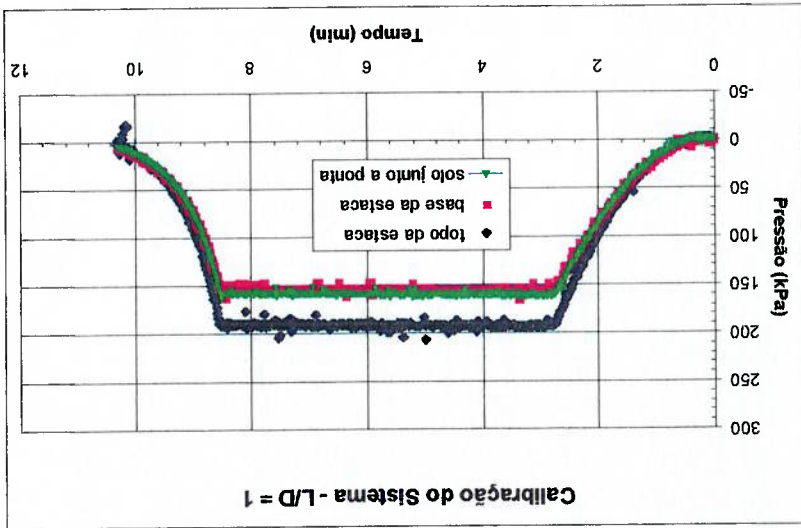
Calibrado em 21 de novembro de 2001

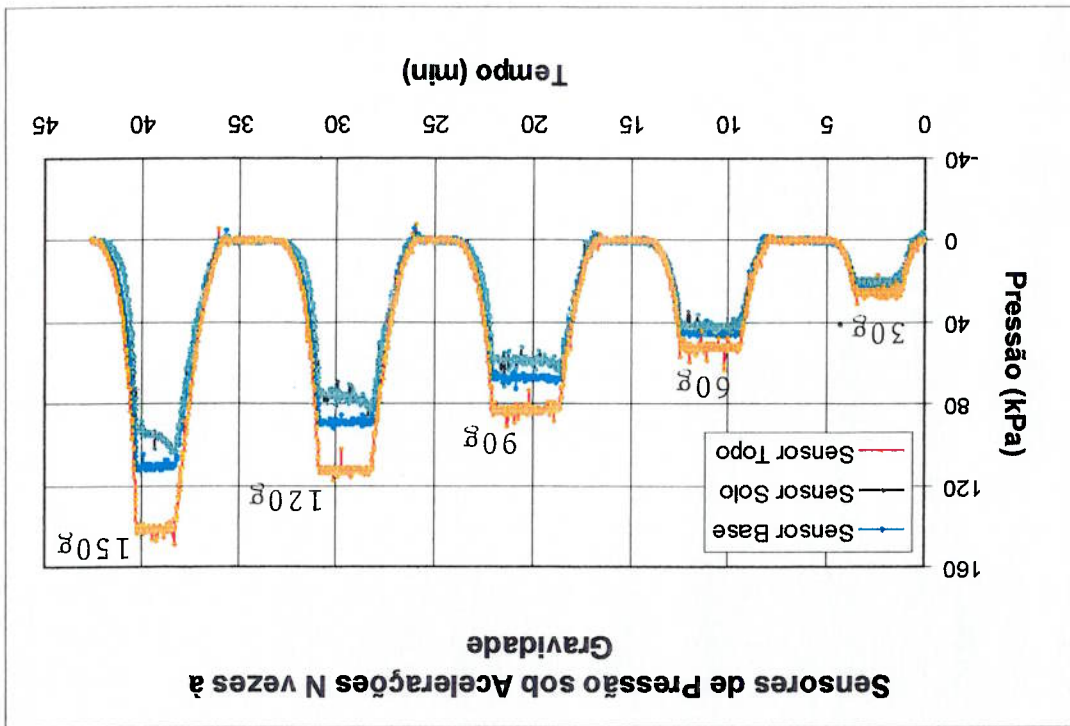
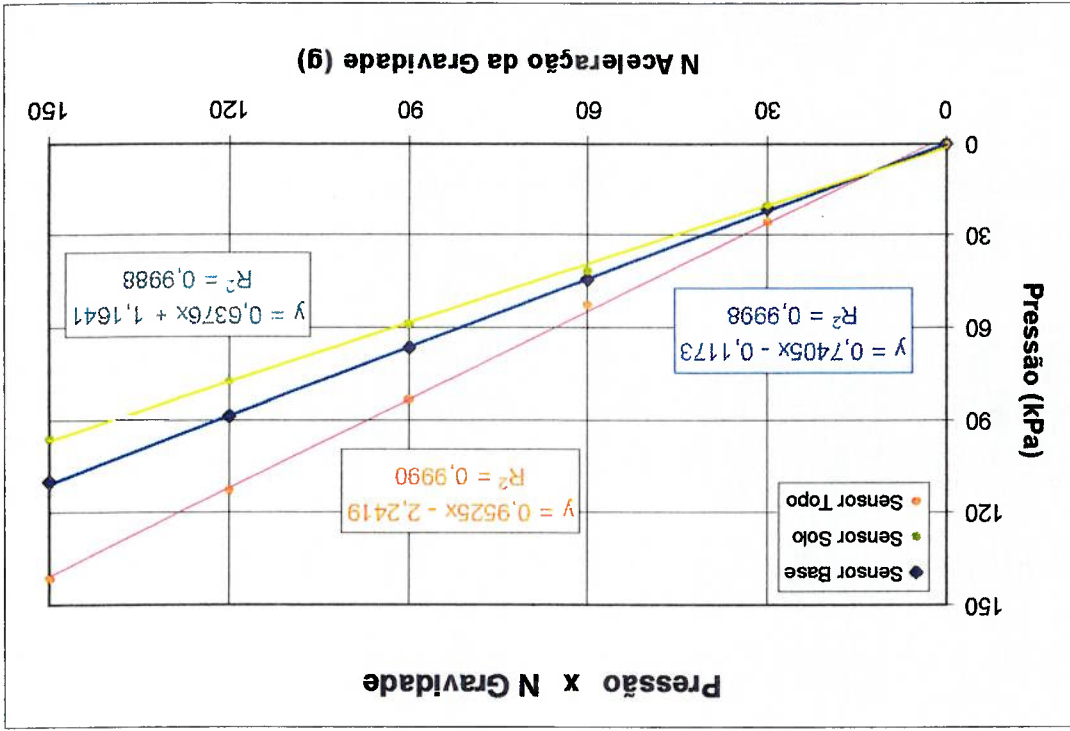
Nome do Arquivo: califireline_211101.xls

Carga (kgf)	Deslocamento (mm)
0,00	0,00
8,00	0,26
16,00	1,15
20,00	1,67
24,00	3,27
28,00	4,81
32,00	6,27
36,00	7,87
40,00	9,49
44,00	11,07



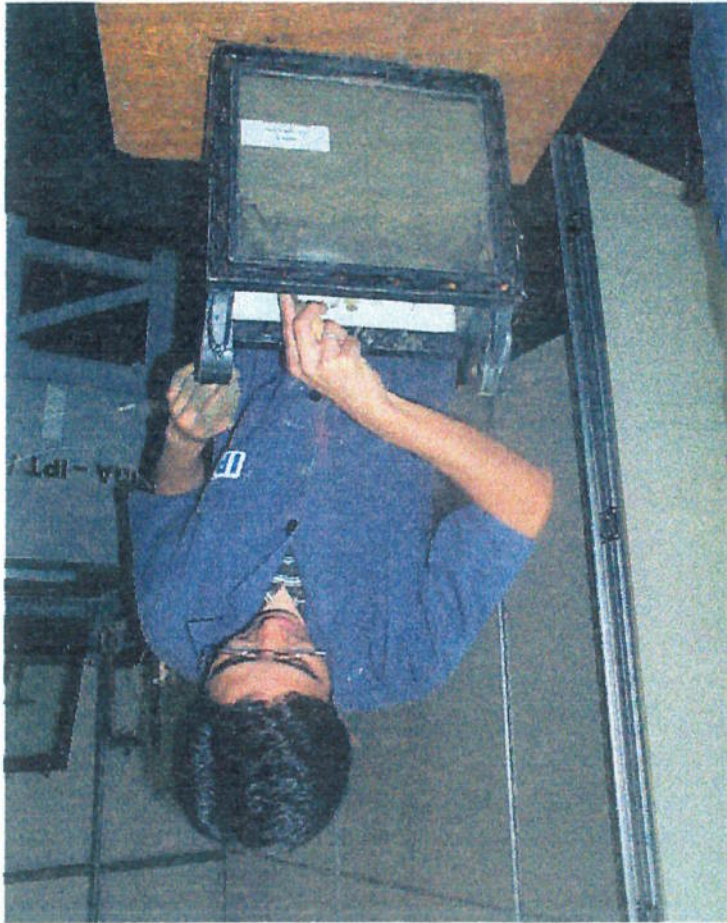
Calibração dos Sensores na Centrífuga com as Estacas Modelo





ANEXO 3 - FOTOS DAS ETAPAS DE ENSAIO

Montagem do solo no cesto no cesto da centrífuga.



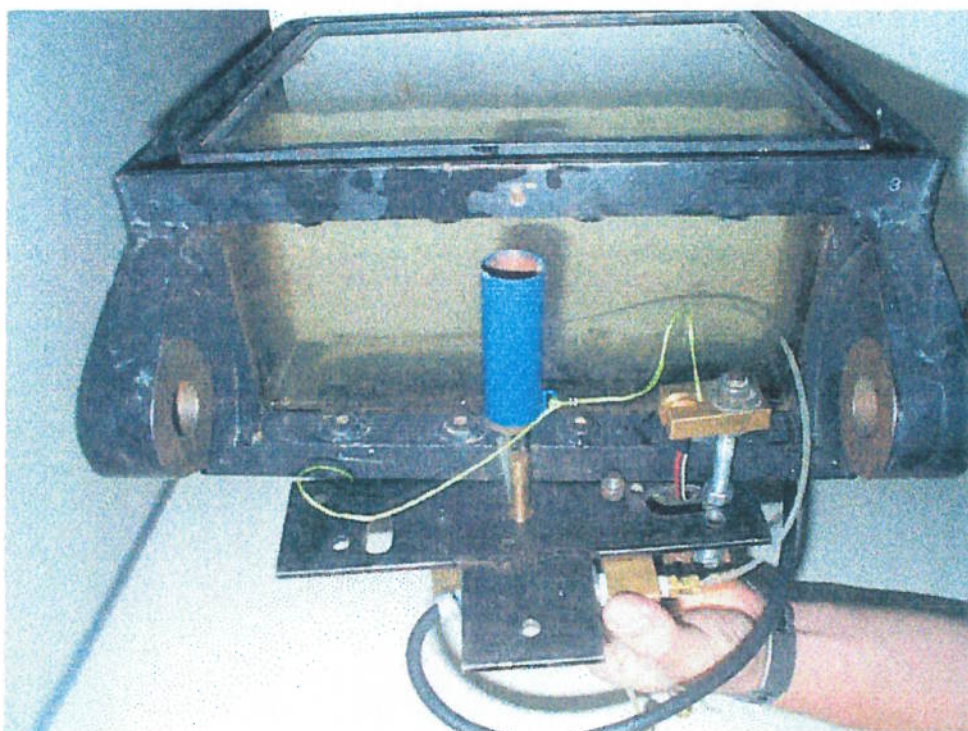
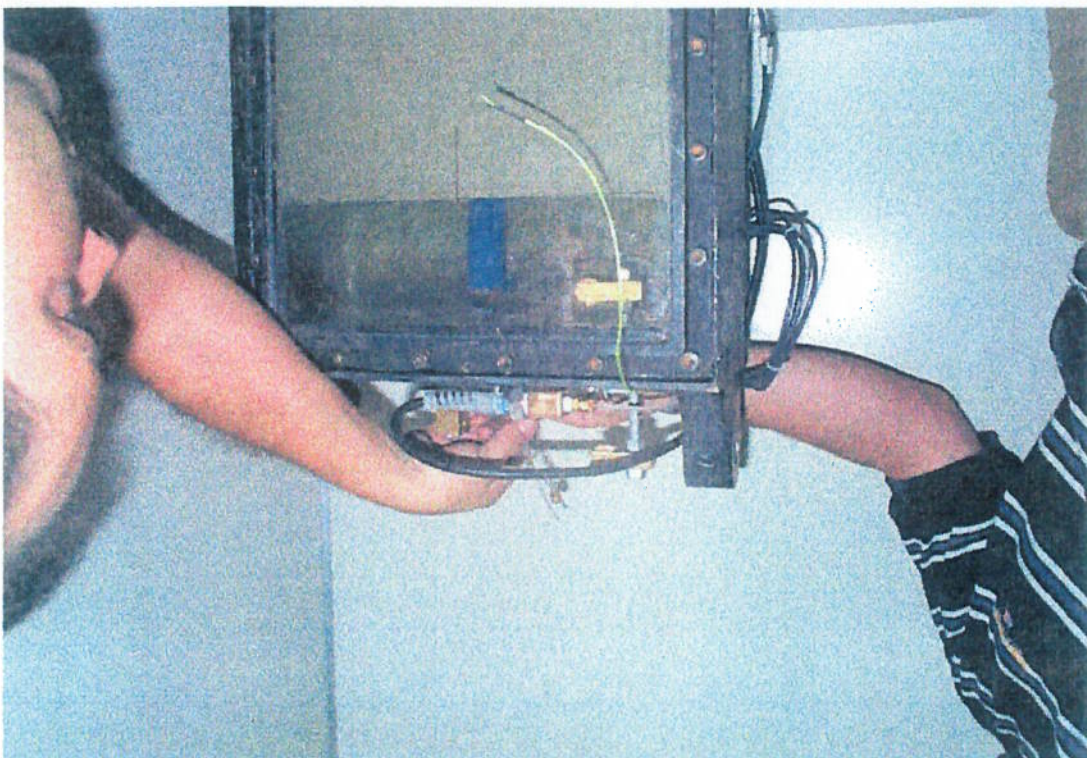
Testes preliminares do solo para verificação de eventual variação dos parâmetros de resistência após o voo - aceleração à 150 g.



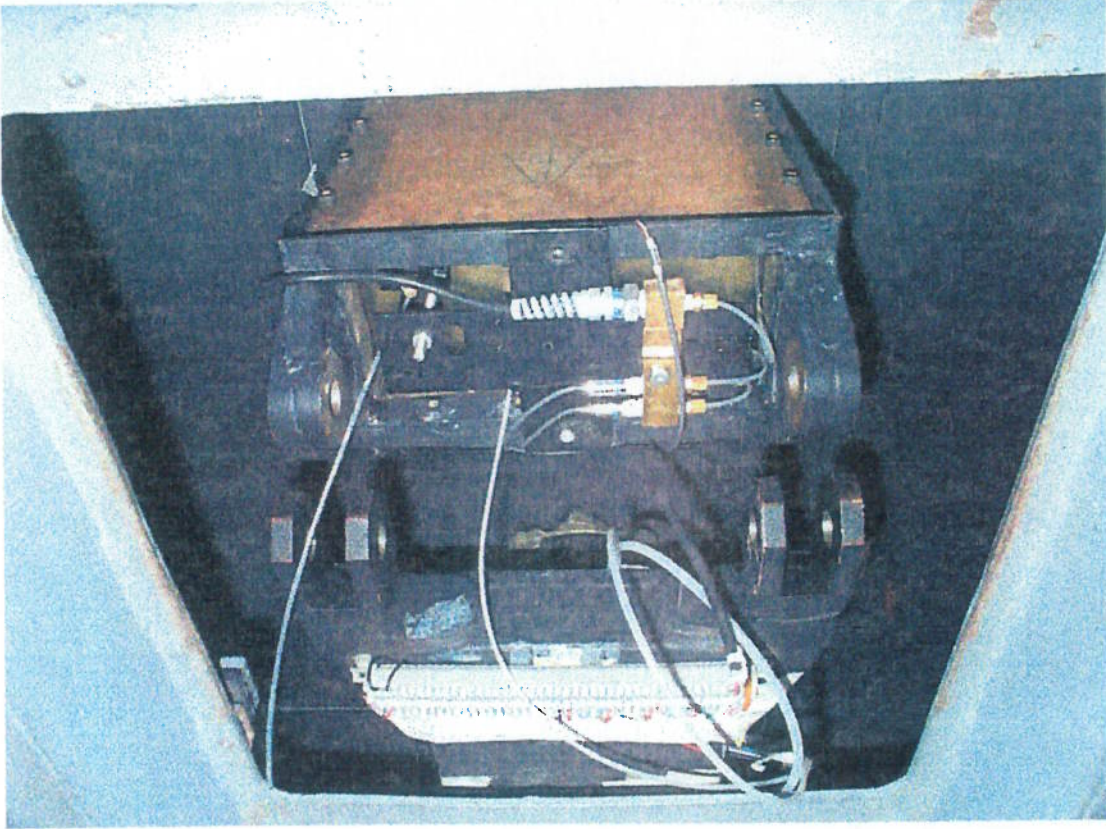


Após a montagem do solo, colocação de água deaerada.

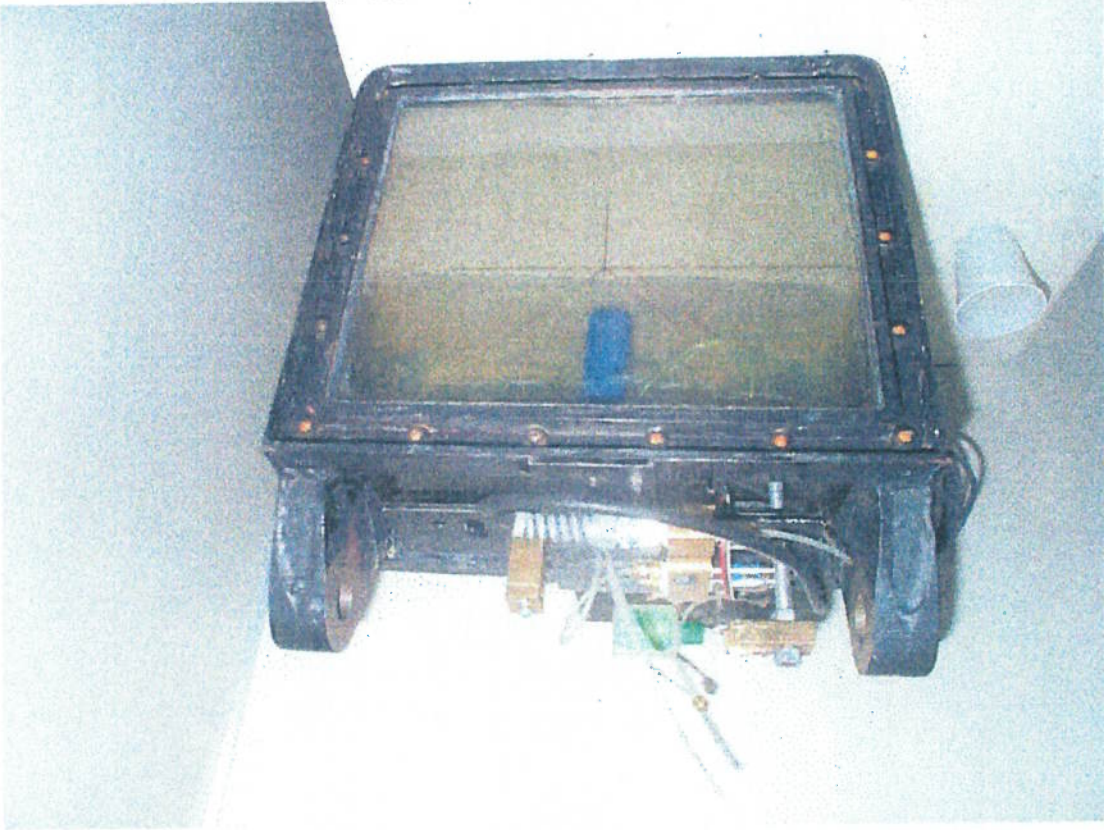
Posicionamento da estaca modelo no interior do cesto.



Montagem do Ensaio, Detalhe da Instrumentação e das Mangueiras



Montagem da Instrumentação no Cesto com o Modelo de Estaca, Solo e Água



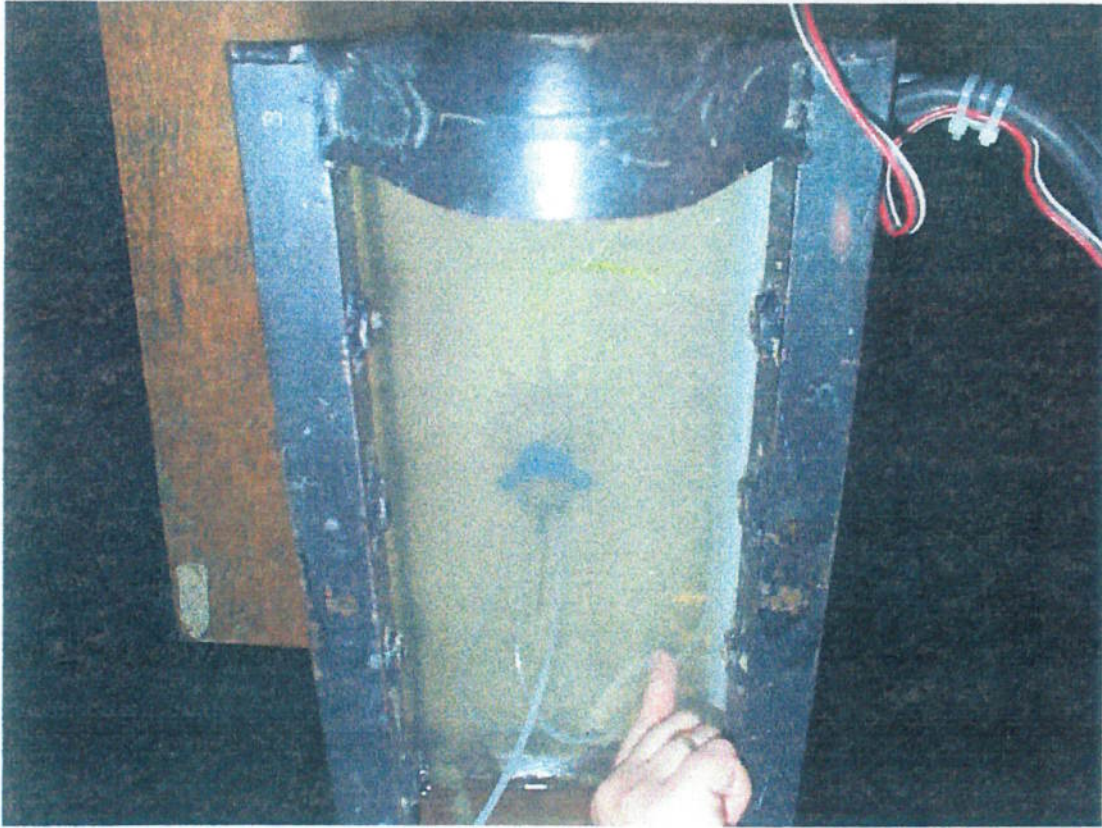
Detalhe do Arrancamento da Estaca de Sucção



Estaca Cravada por Sucção



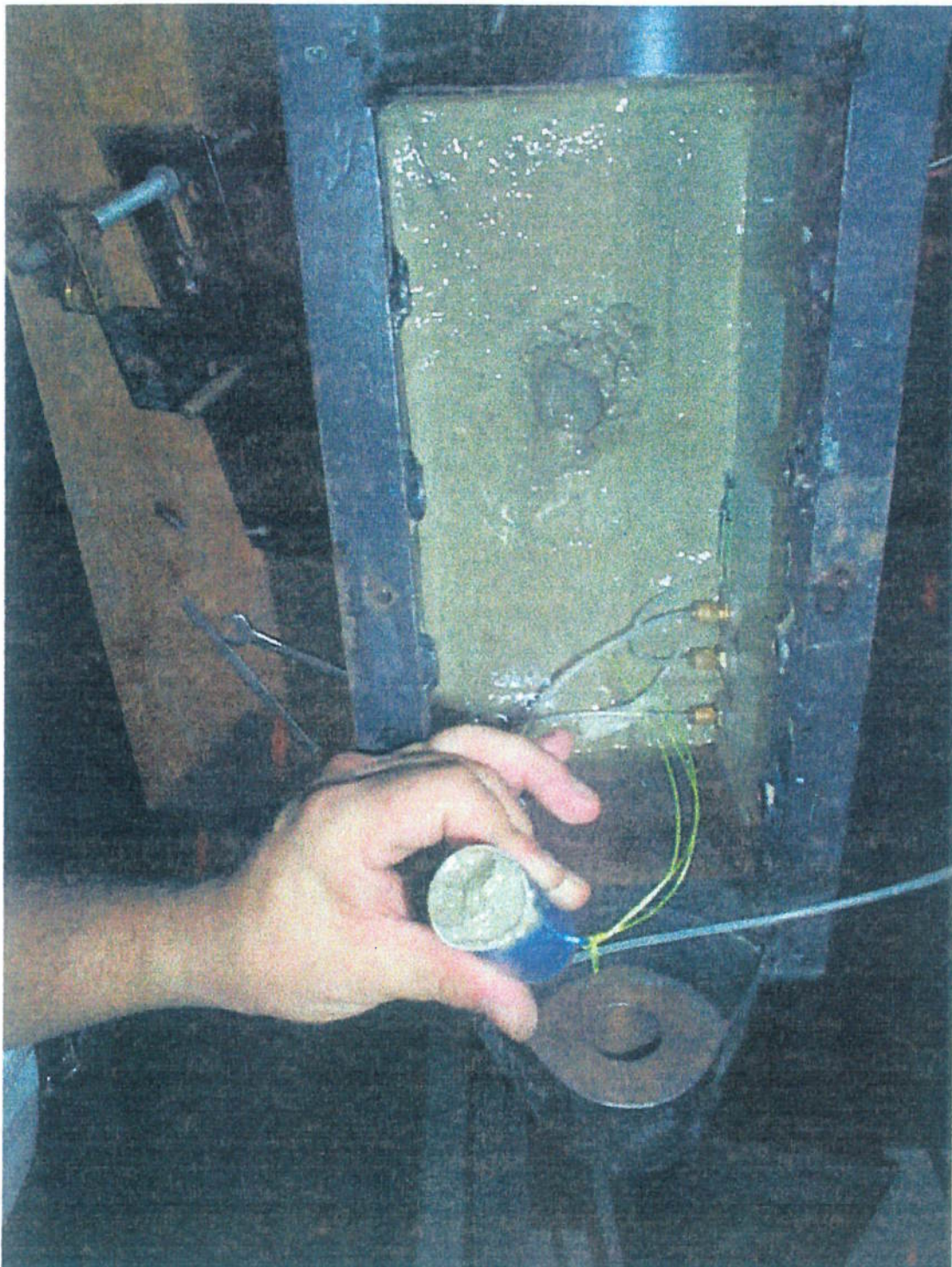
Formação de Cratera no Ensaio de Arrancamento



Estaca Arrancada do Solo



Formação de Bucha na Estaca





Vista Geral das Lâmpadas Estroboscópicas, Sistema de Sucção e Janela de

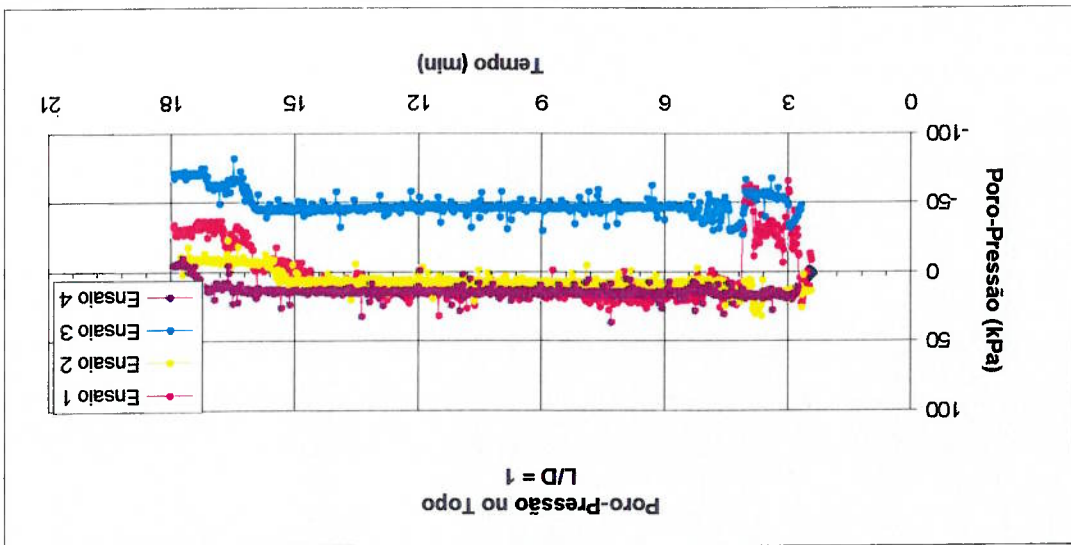
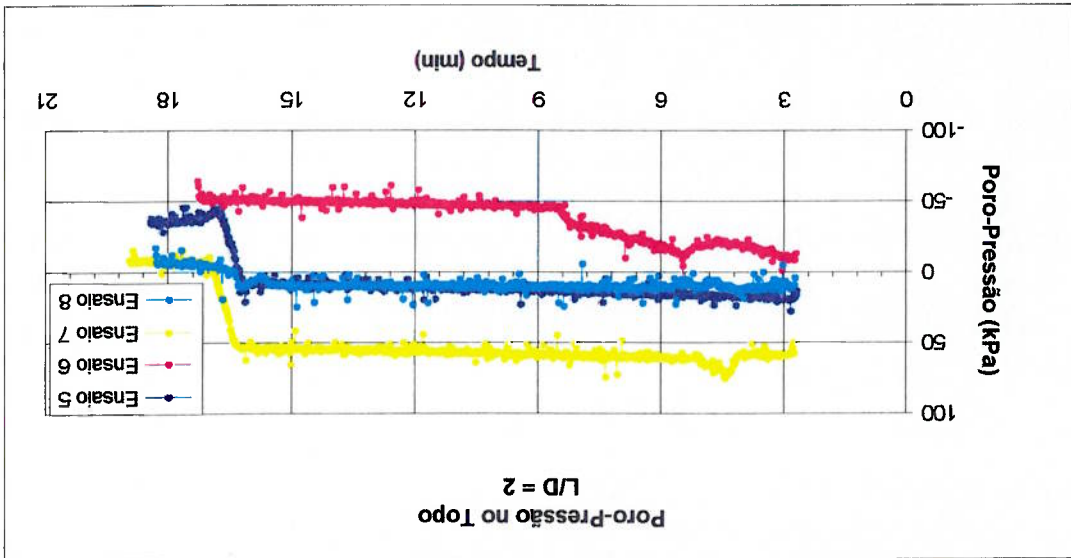
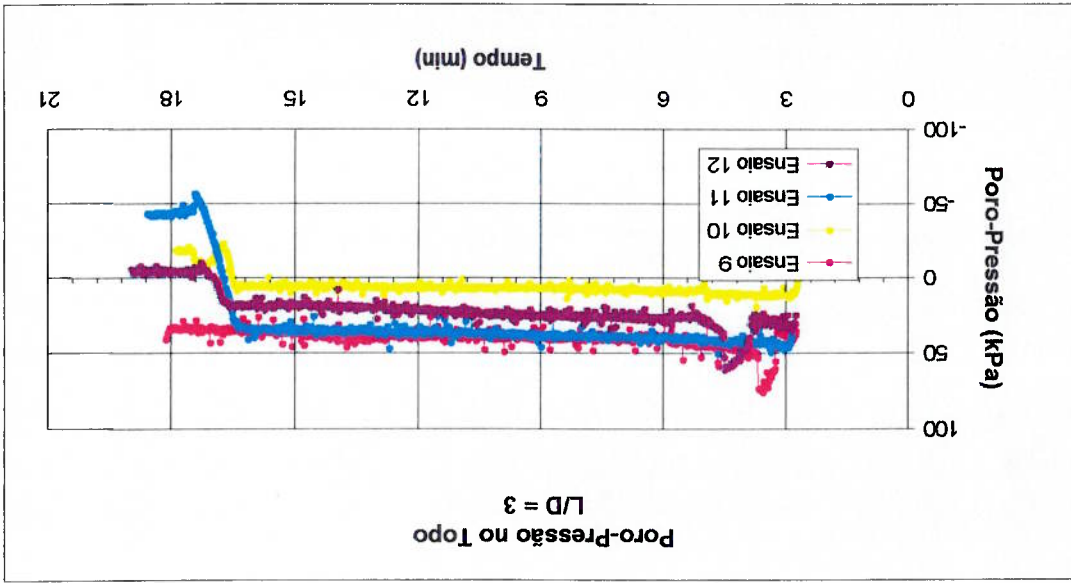
Visualização



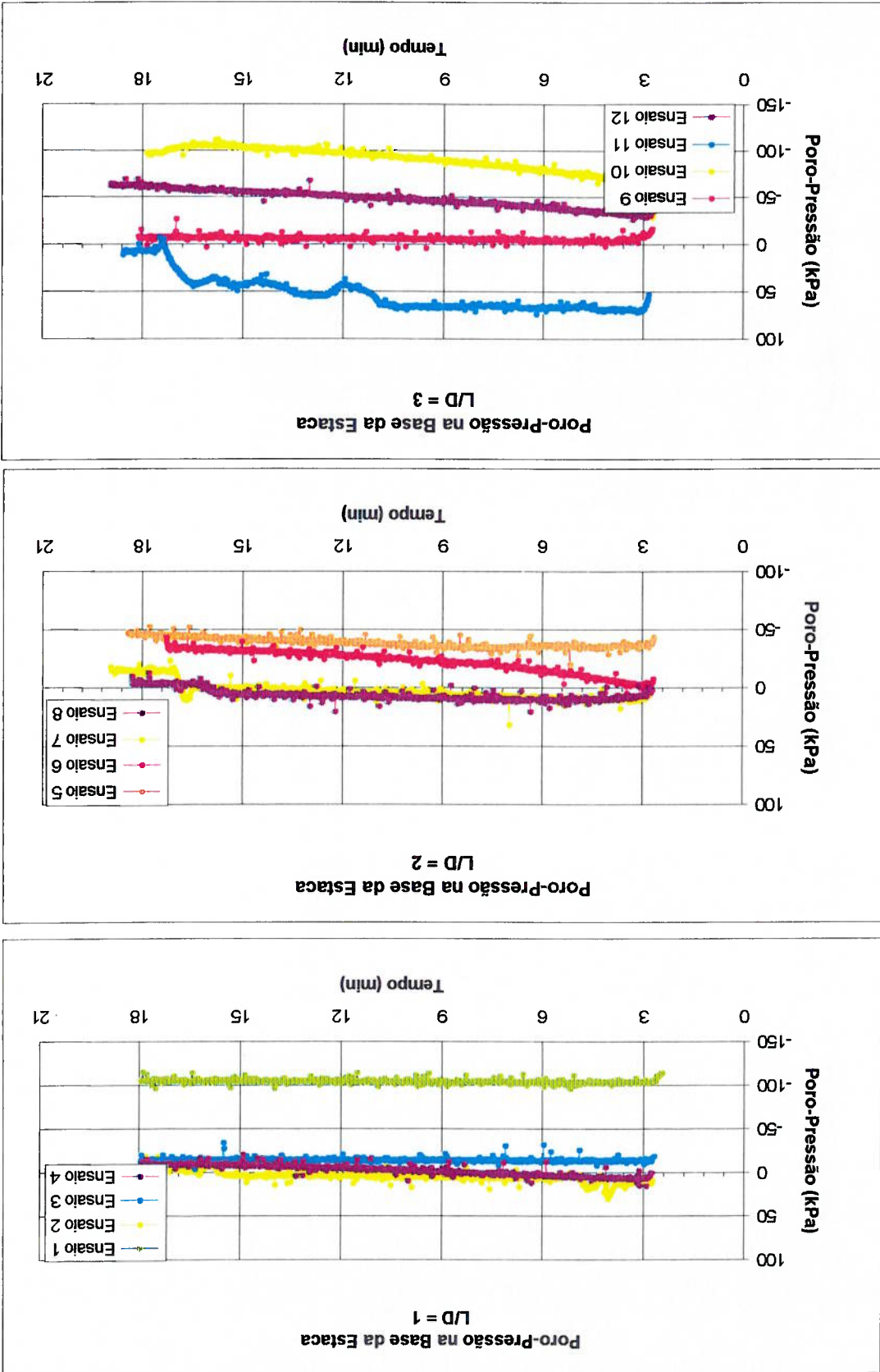
Detalhe de Parte do Sistema de Sucção e Controle de Nível D'água

**ANEXO 4 – COMPORTAMENTO DOS MODELOS DURANTE A
CRAVAÇÃO E ARRANCAMENTO**

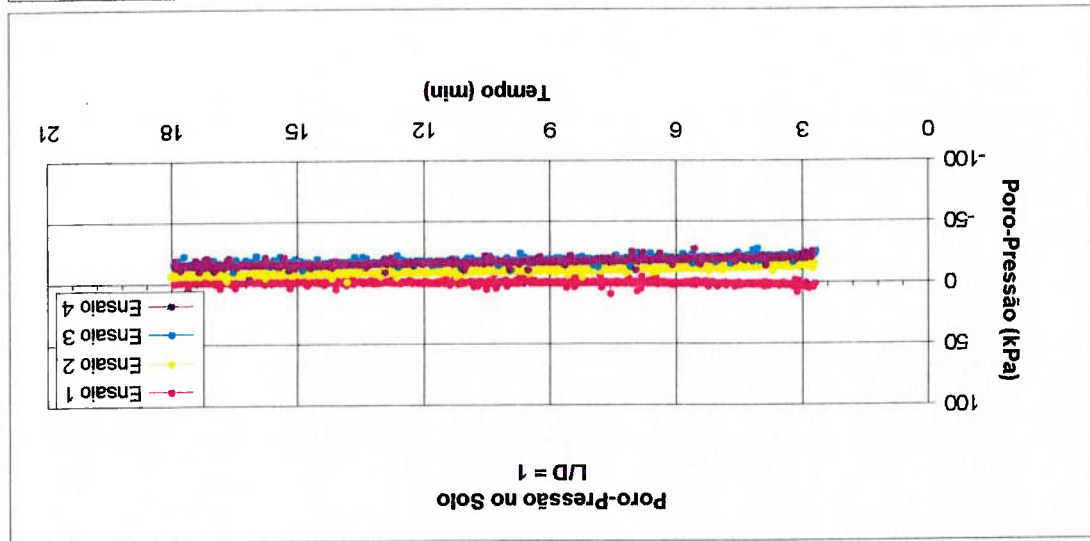
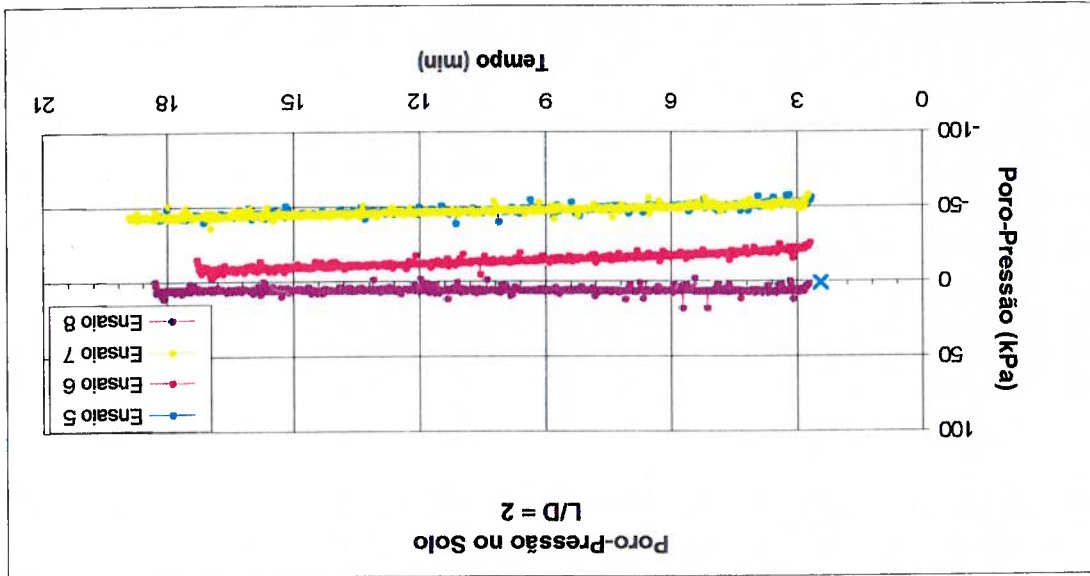
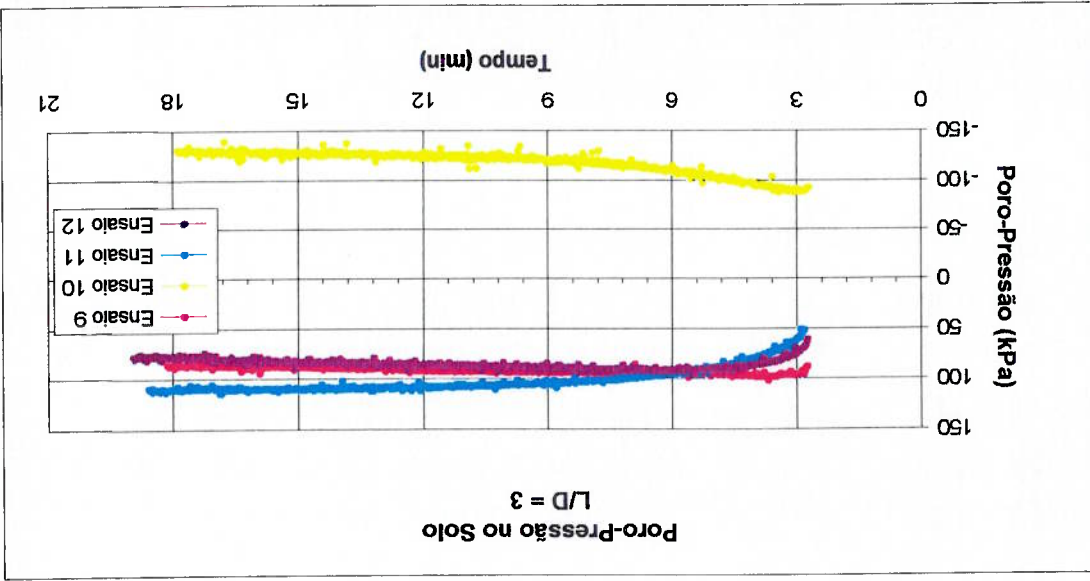
Comportamento da Poro - Pressão no Topo das Estacas de Sucção



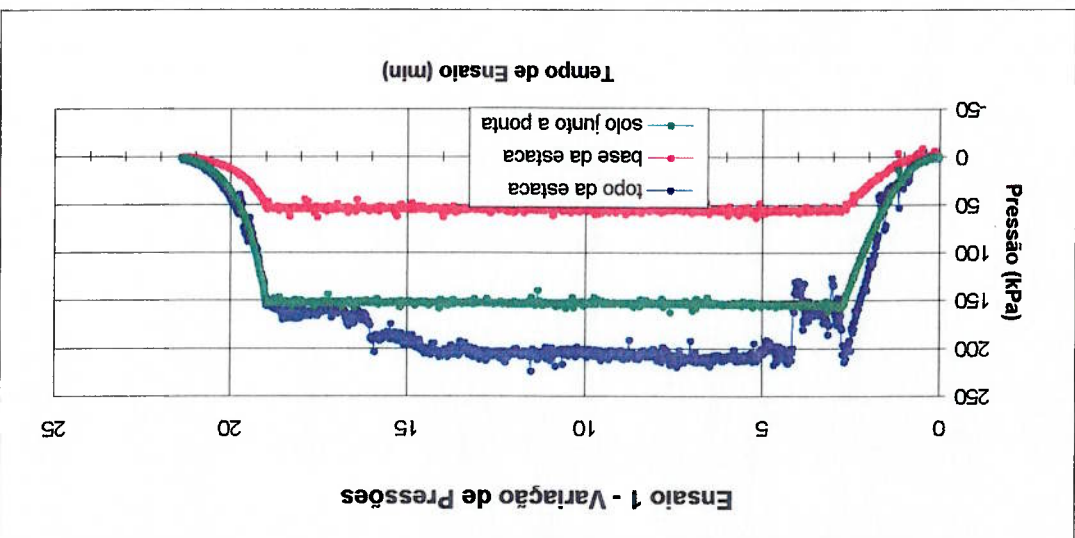
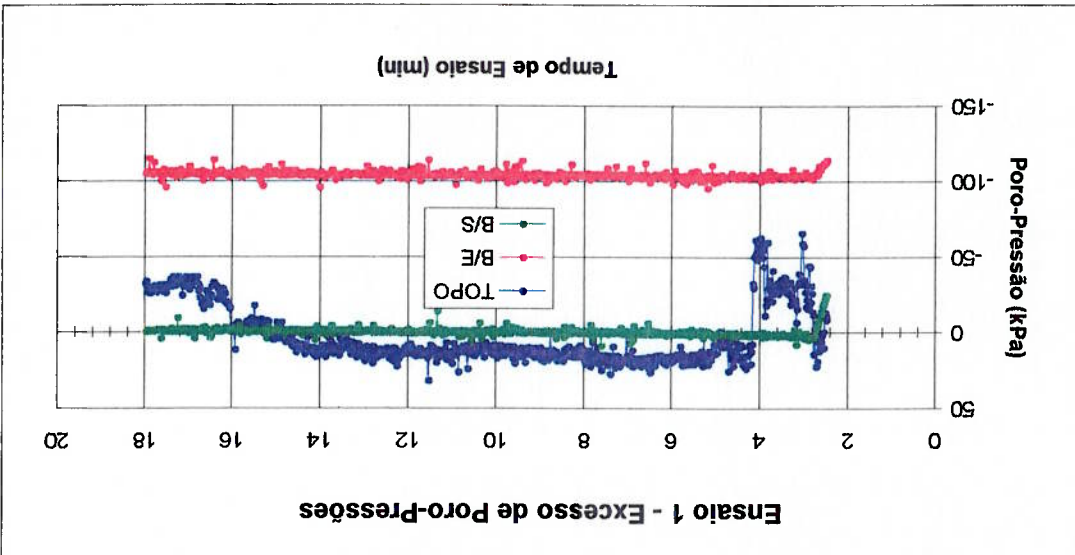
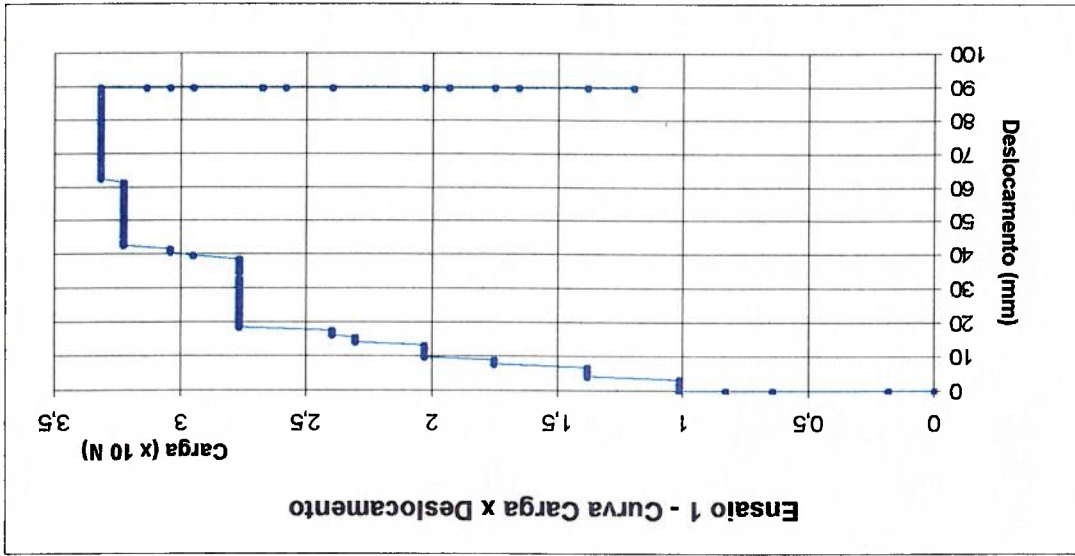
Comportamento da Poro - Pressão na Base das Estacas de Sucção



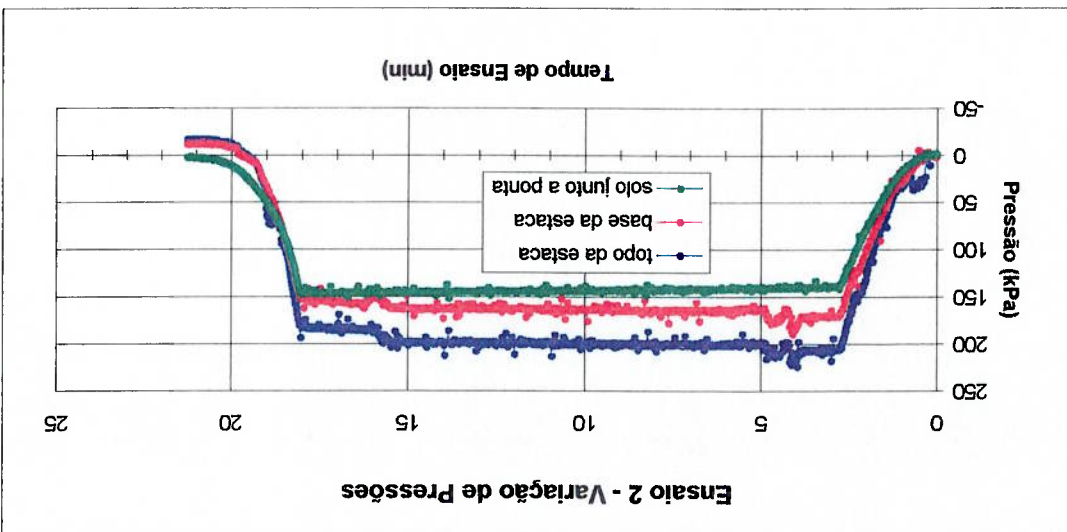
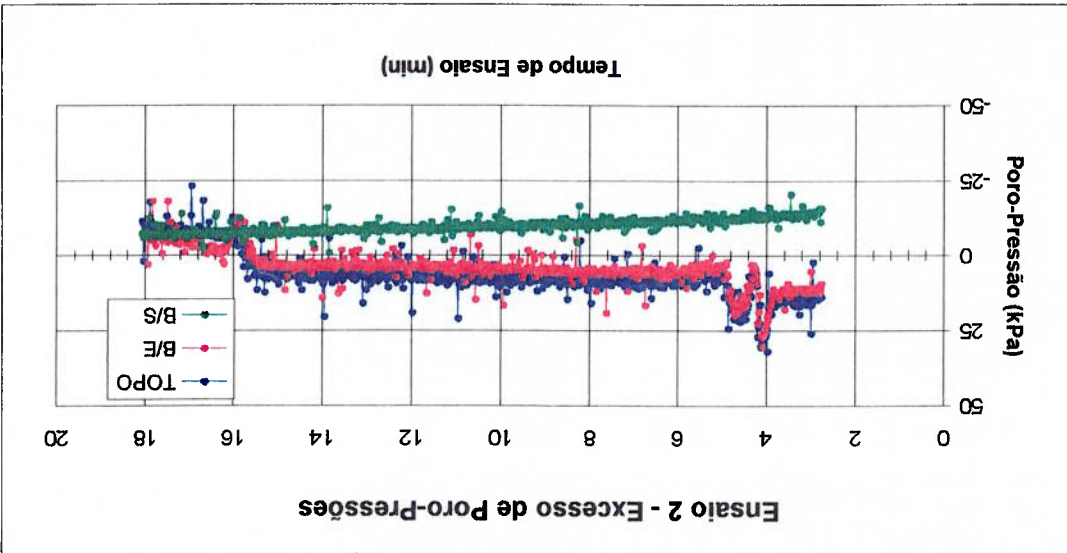
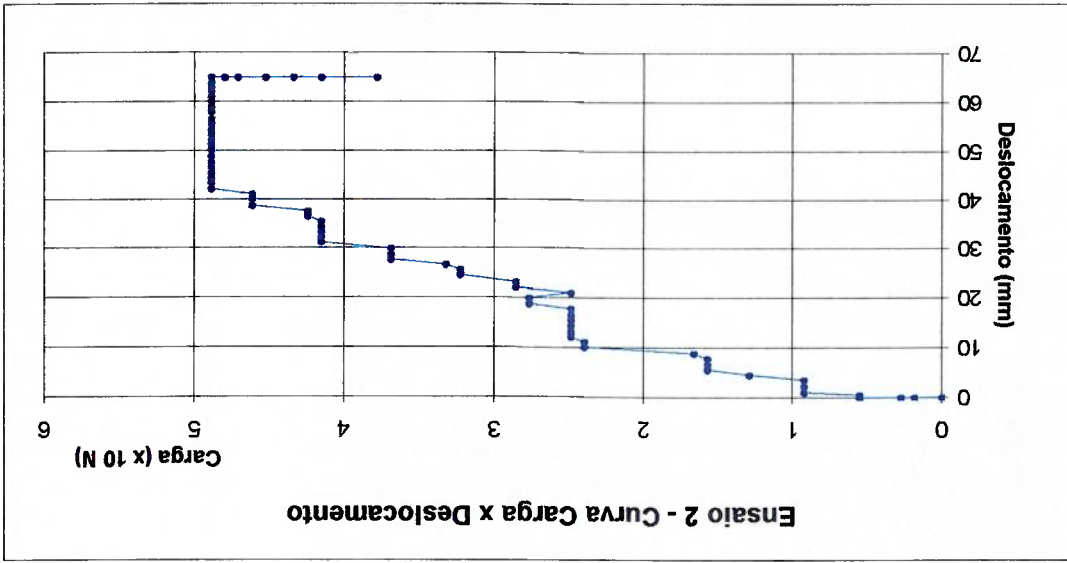
Comportamento da Poro - Pressão no Solo



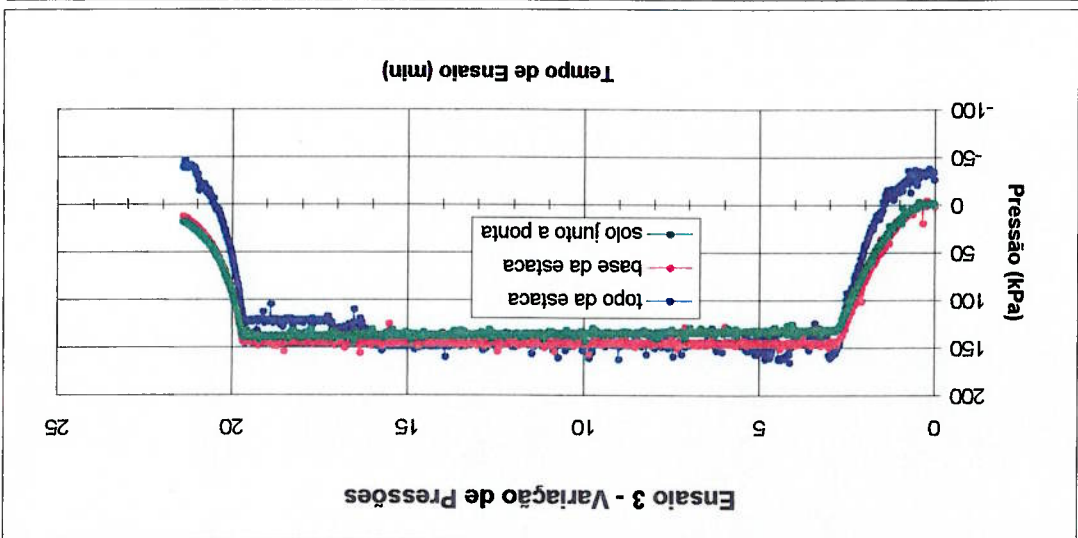
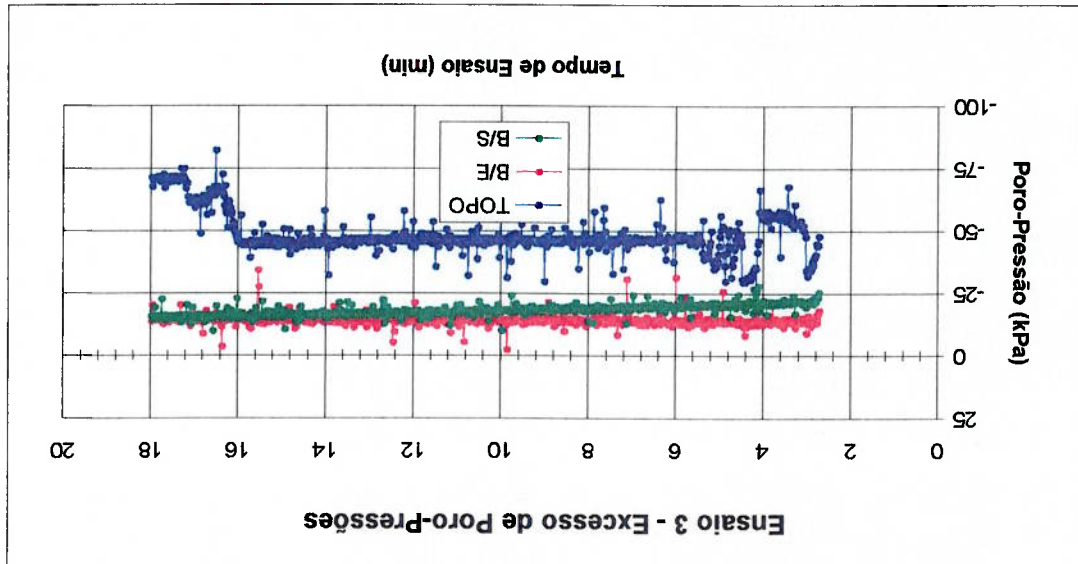
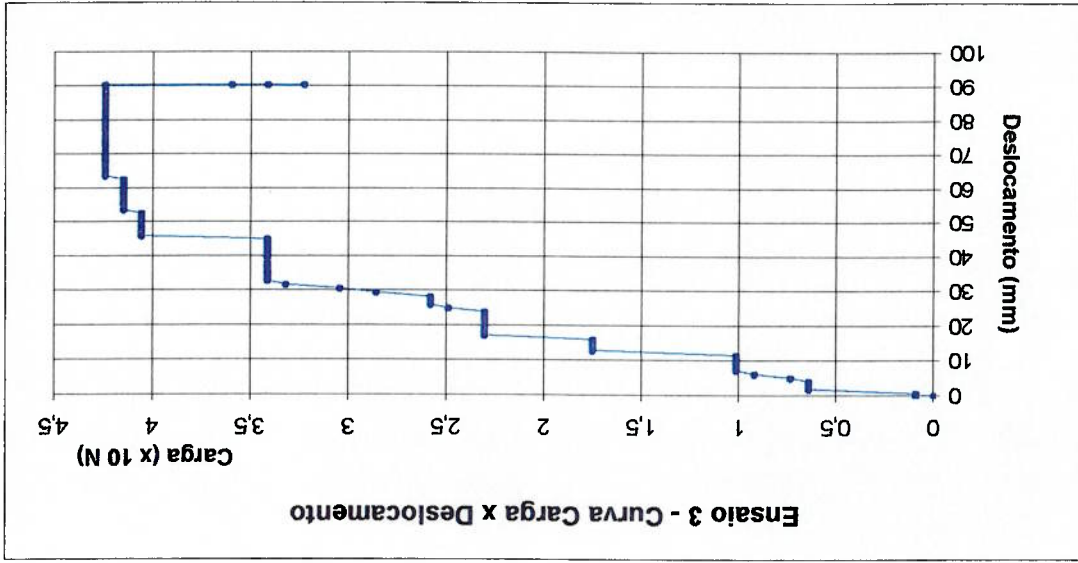
Ensaio 1 - Estaca de Sucção L/D = 1(sem aleta e com olhal superior)



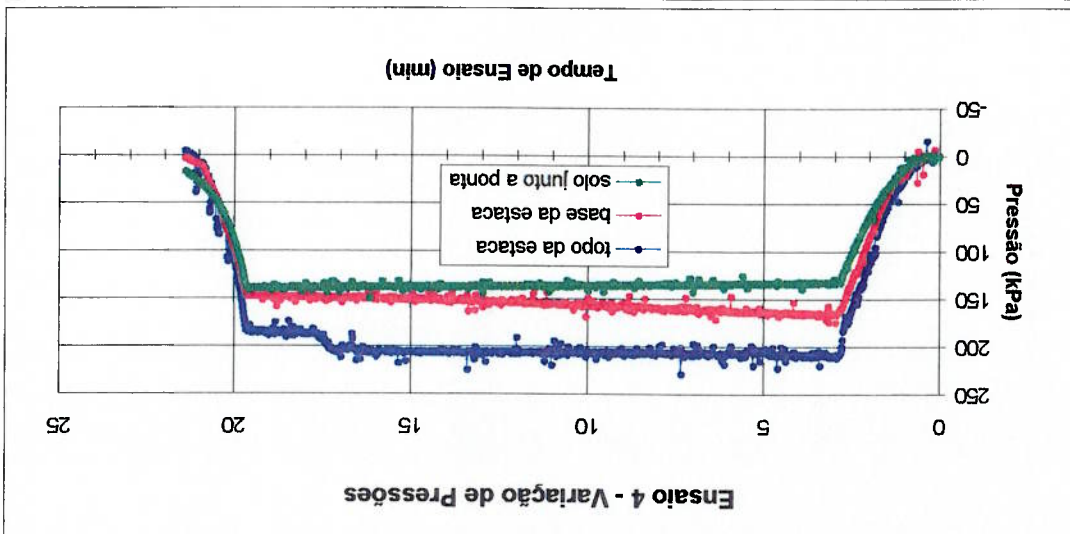
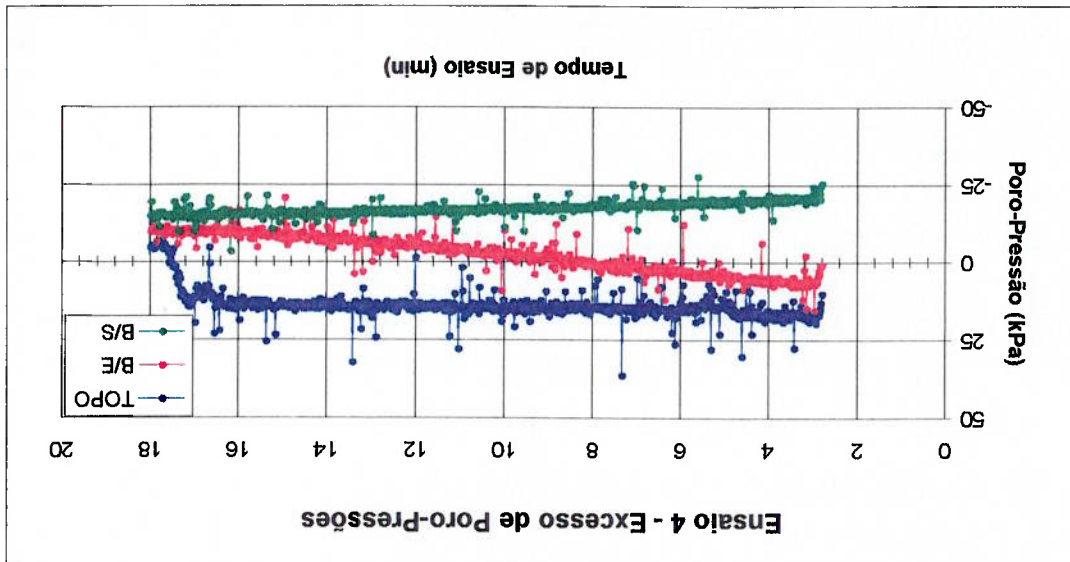
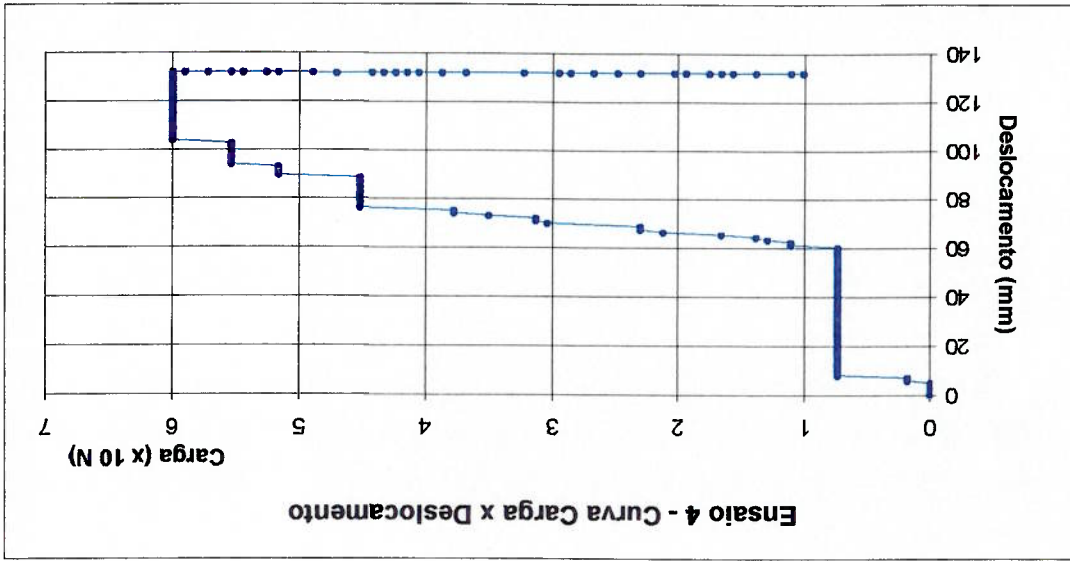
Ensaio 2 - Estaca de Sucção L/D = 1 (sem aleta e com olhal inferior)



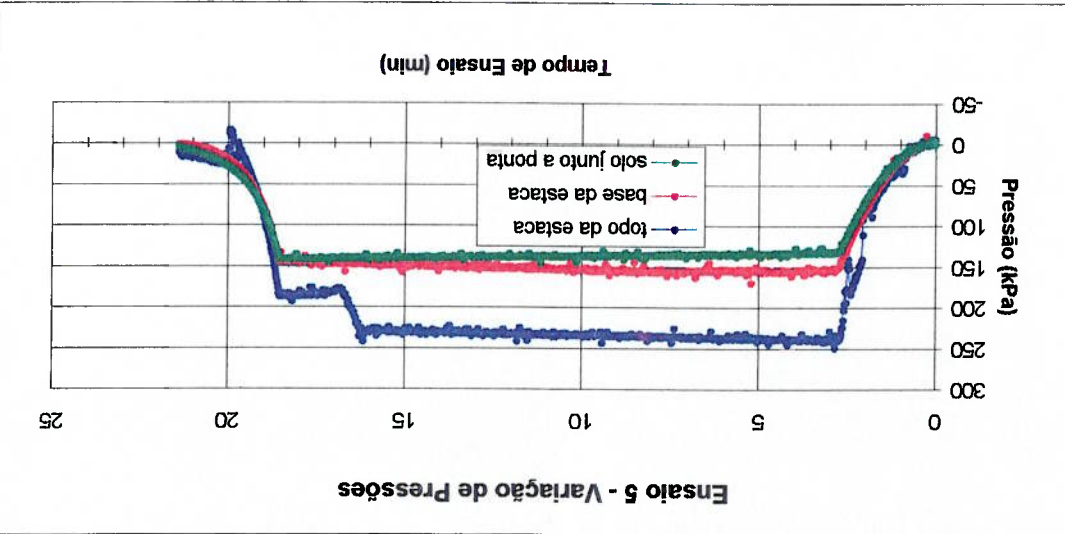
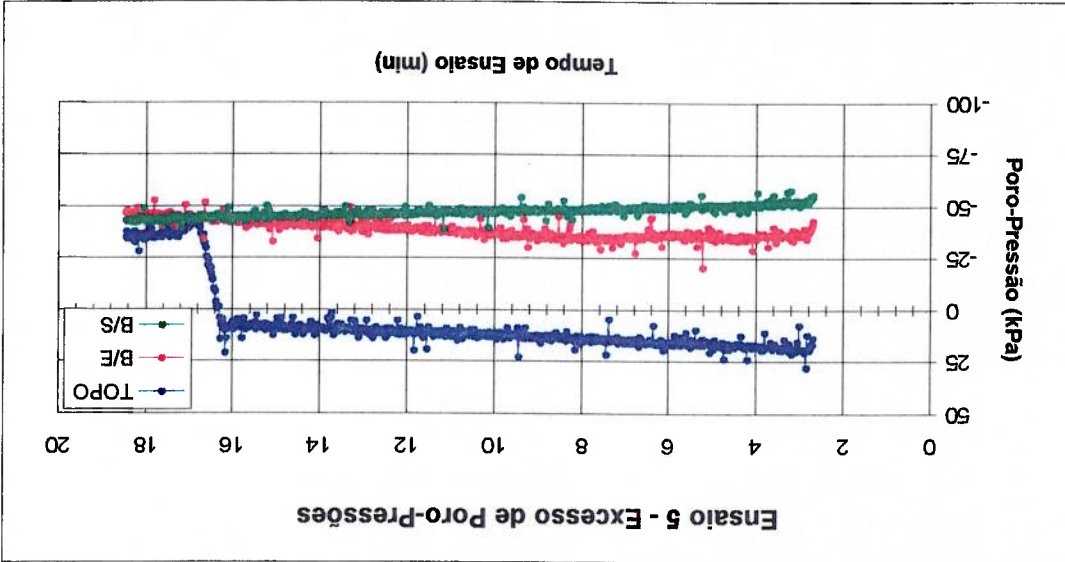
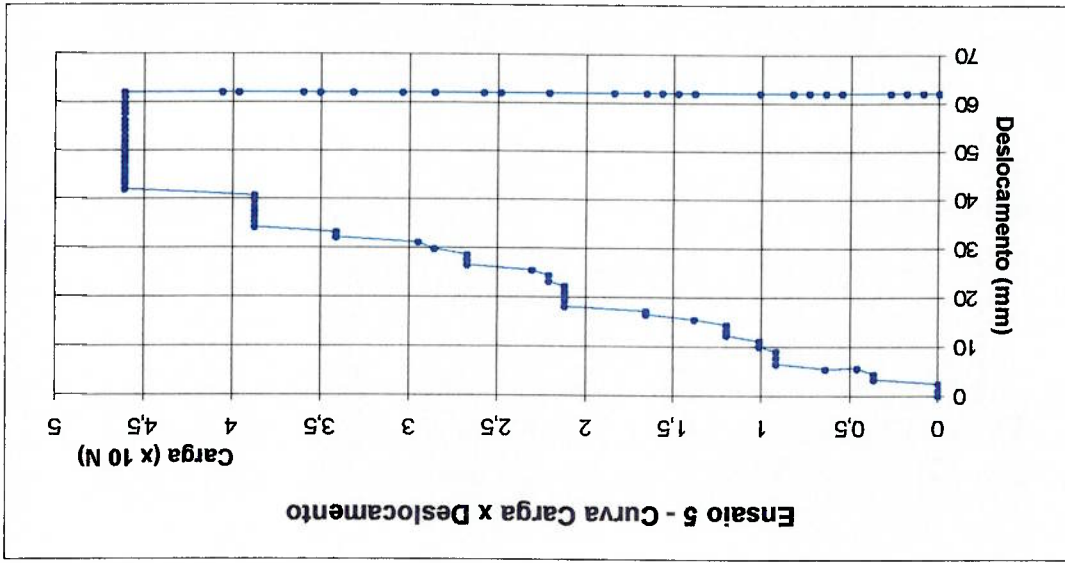
Ensaio 3 - Estaca de Sucção L/D = 1 (com aleta e olhal superior)



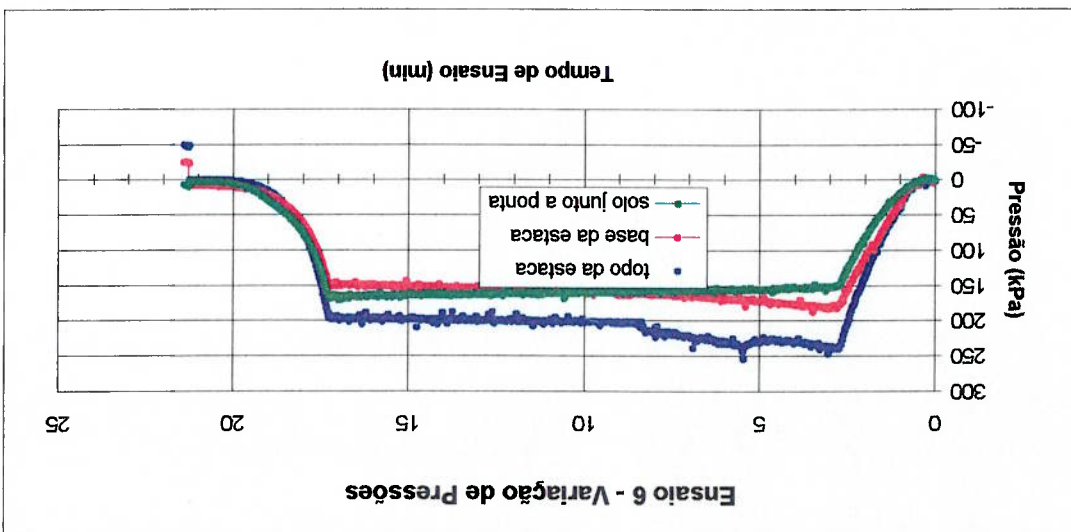
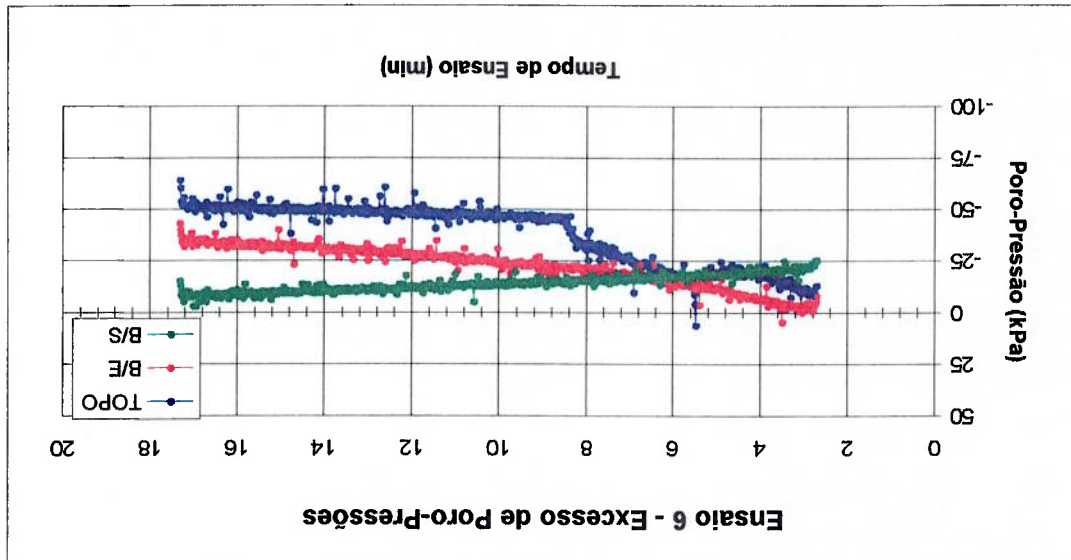
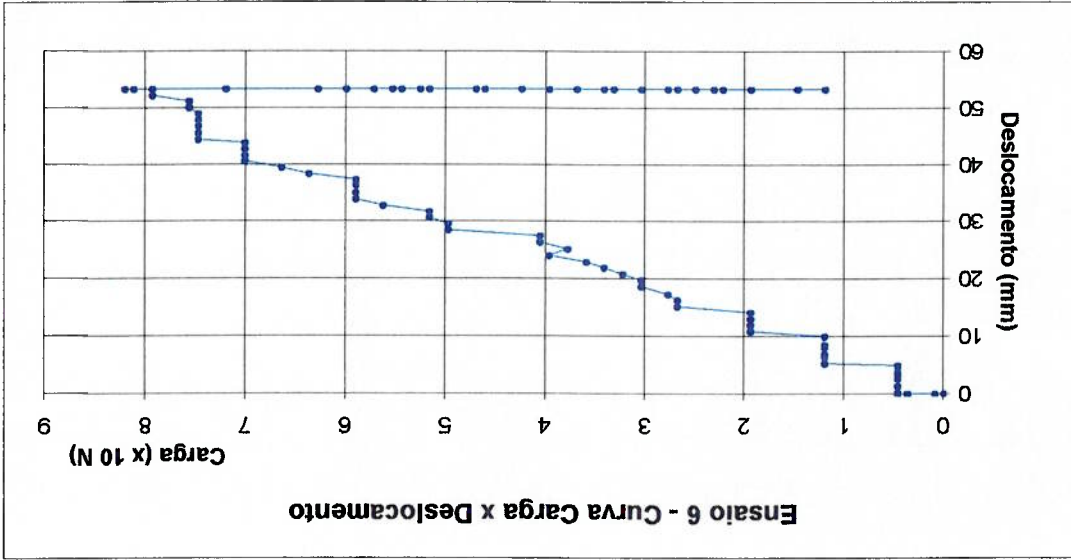
Ensaio 4 - Estaca de Sucção L/D=1 (com aleta e olhal inferior)



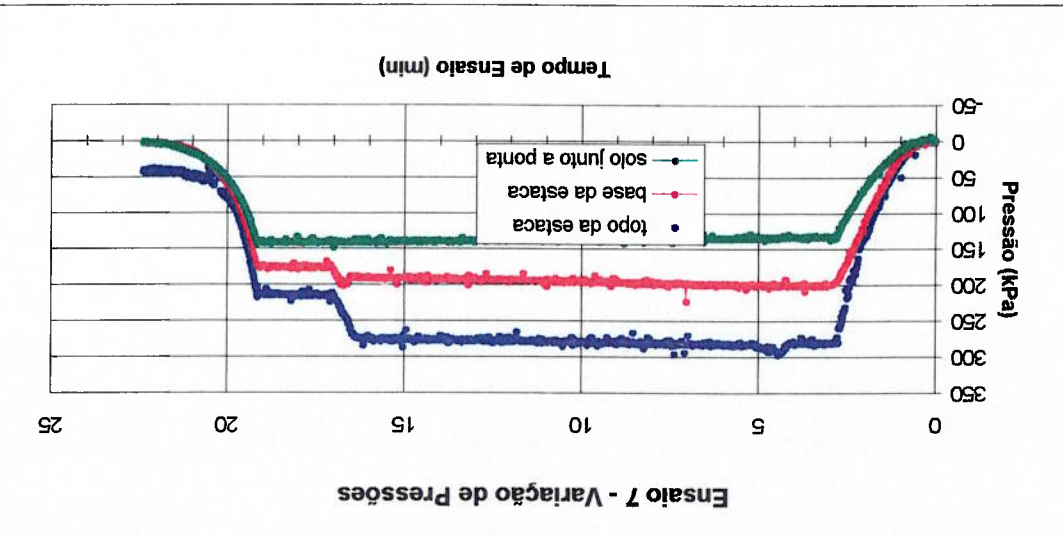
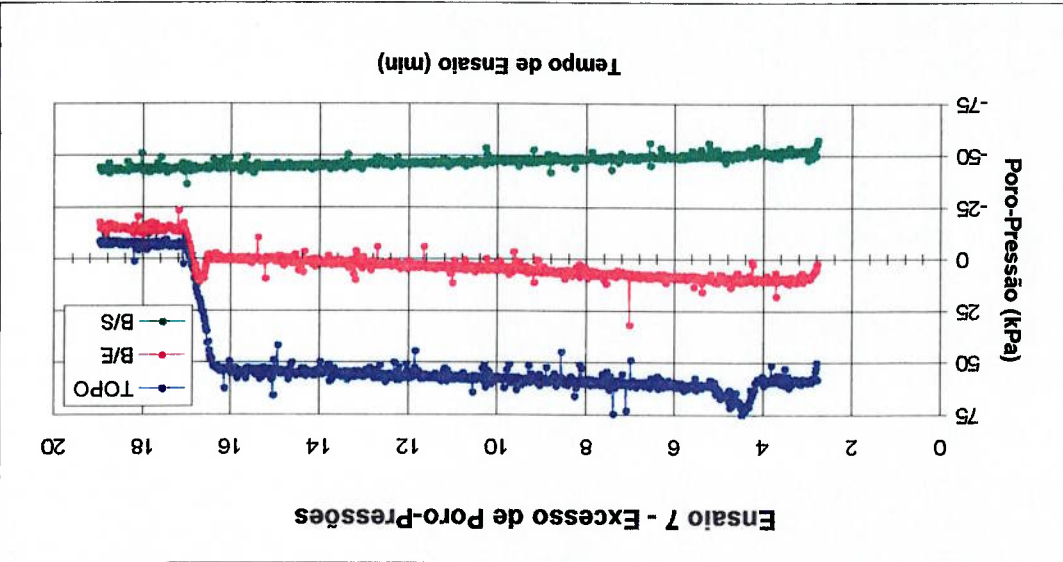
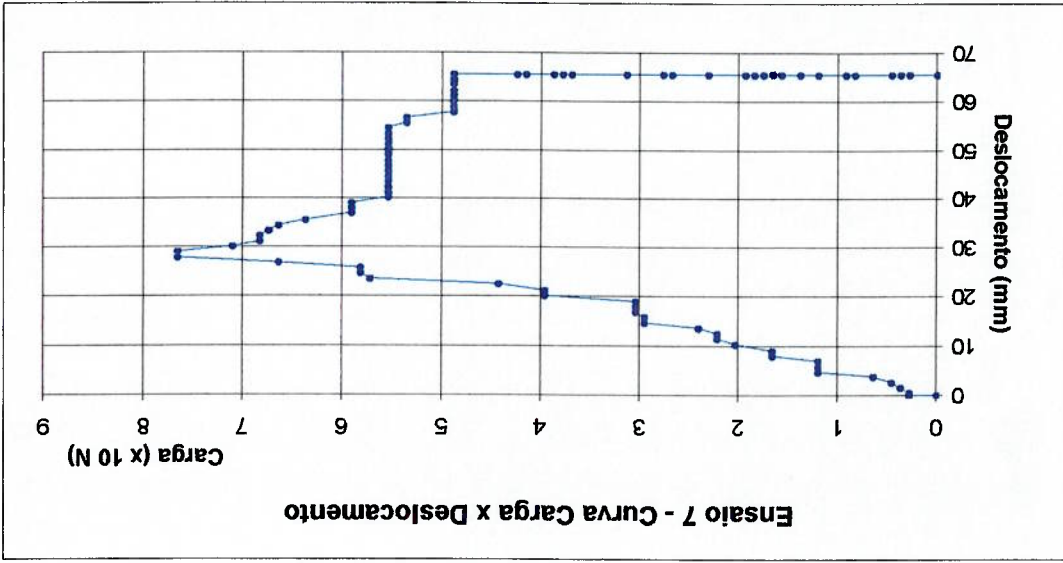
Ensaio 5 - Estaca de Sucção L/D=2(sem aleta com olhal superior)



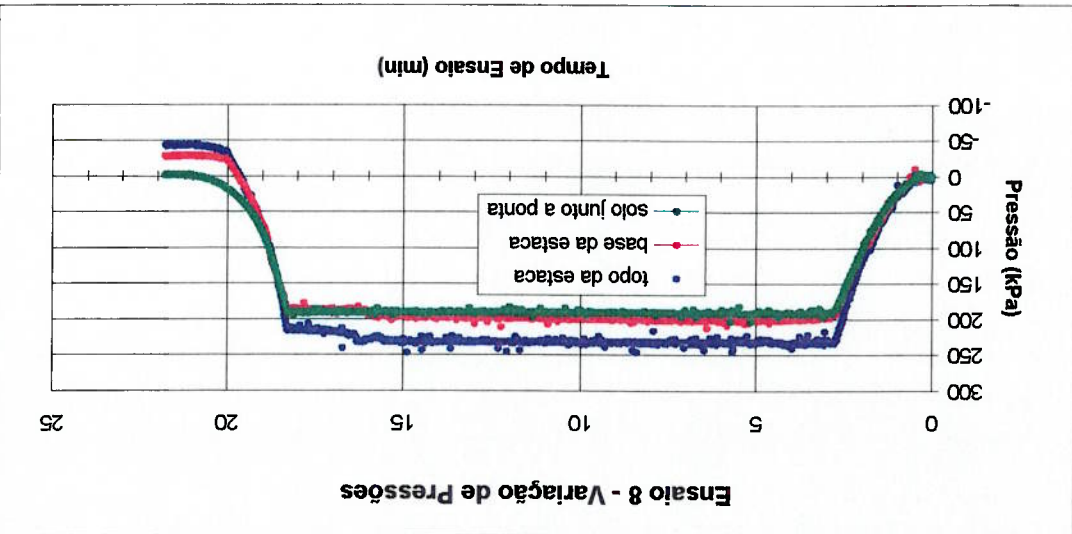
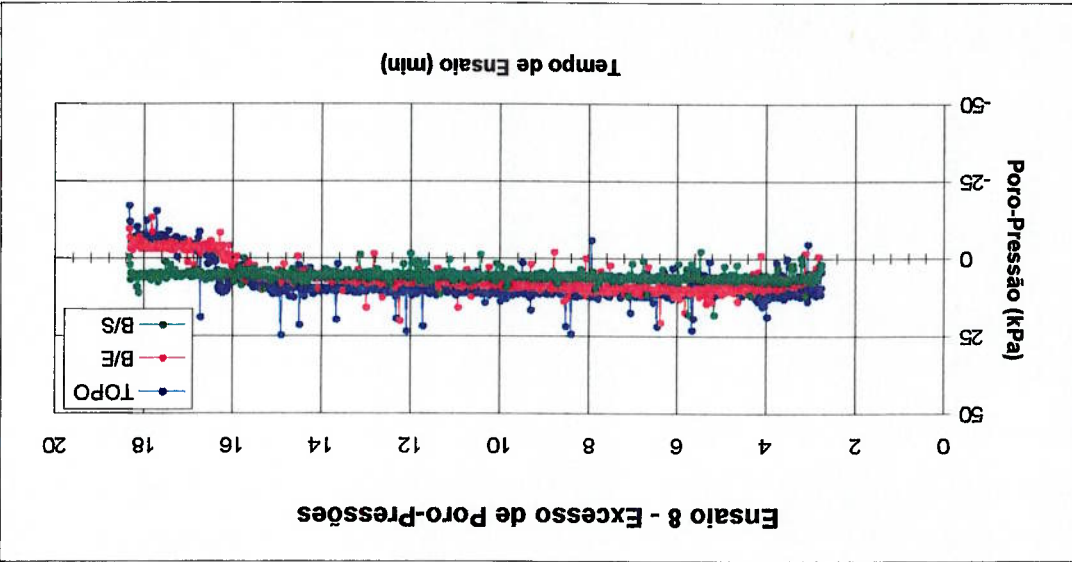
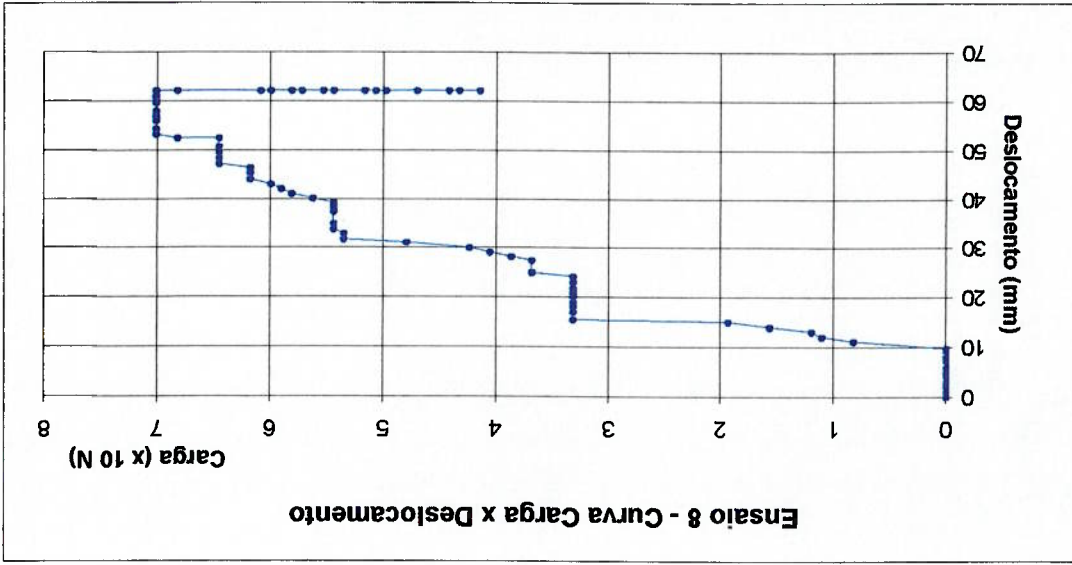
Ensaio 6 - Estaca de Sucção L/D=2(sem aleta com olhal inferior)



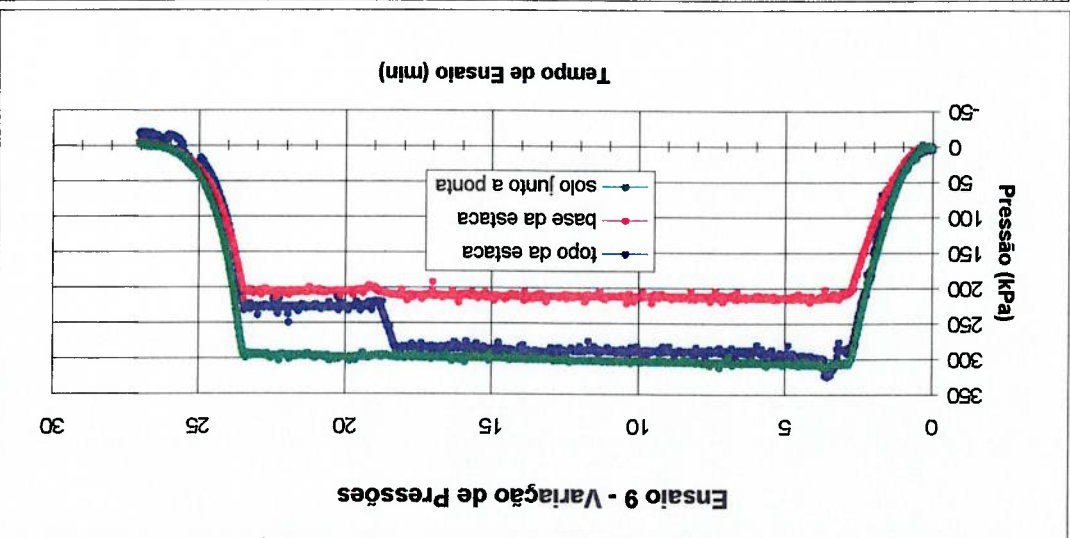
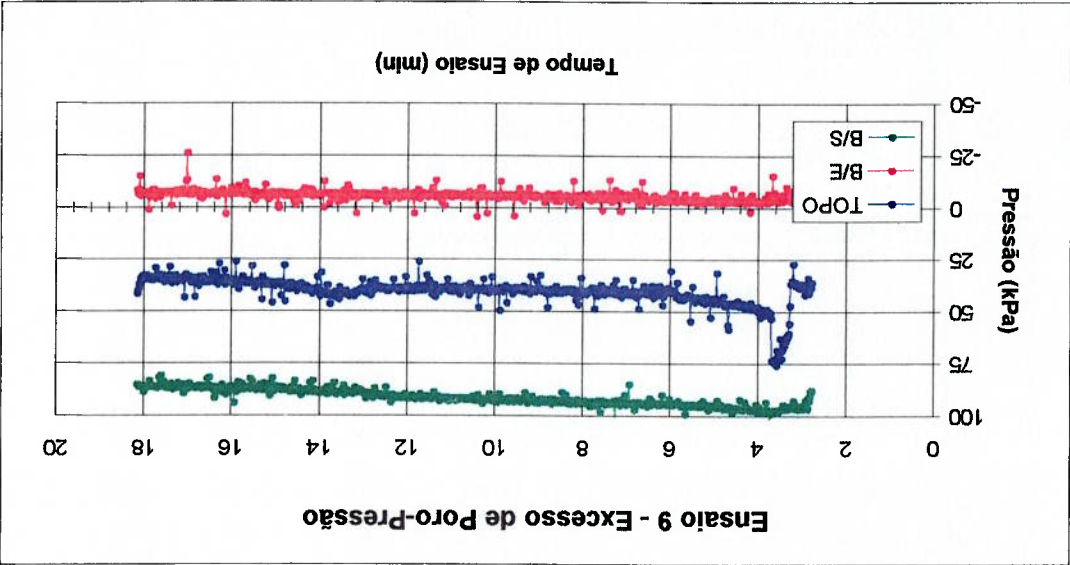
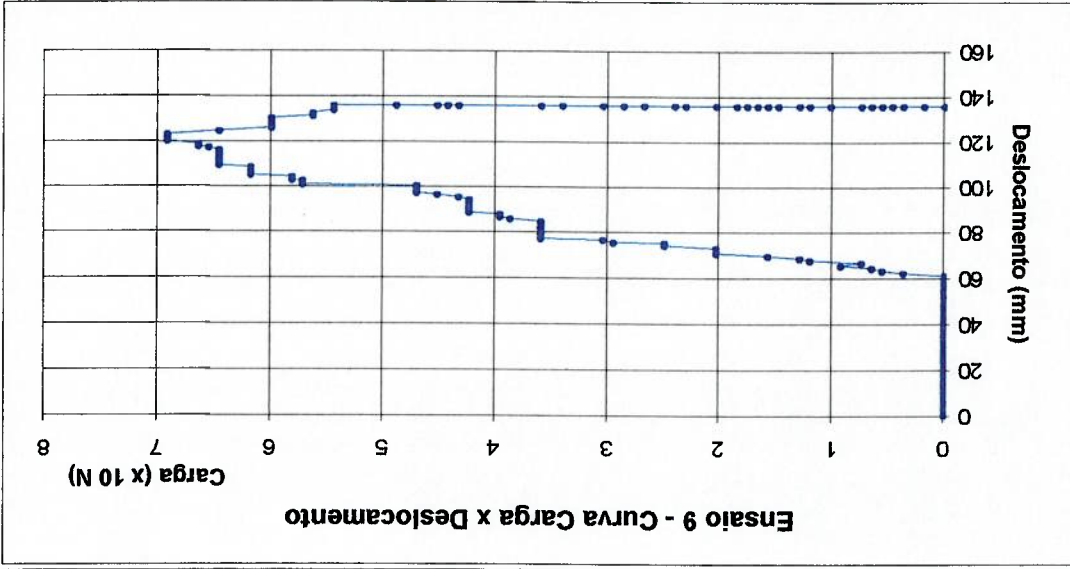
Ensaio 7 - Estaca de Sucção L/D=2 (com aleta e olhal superior)



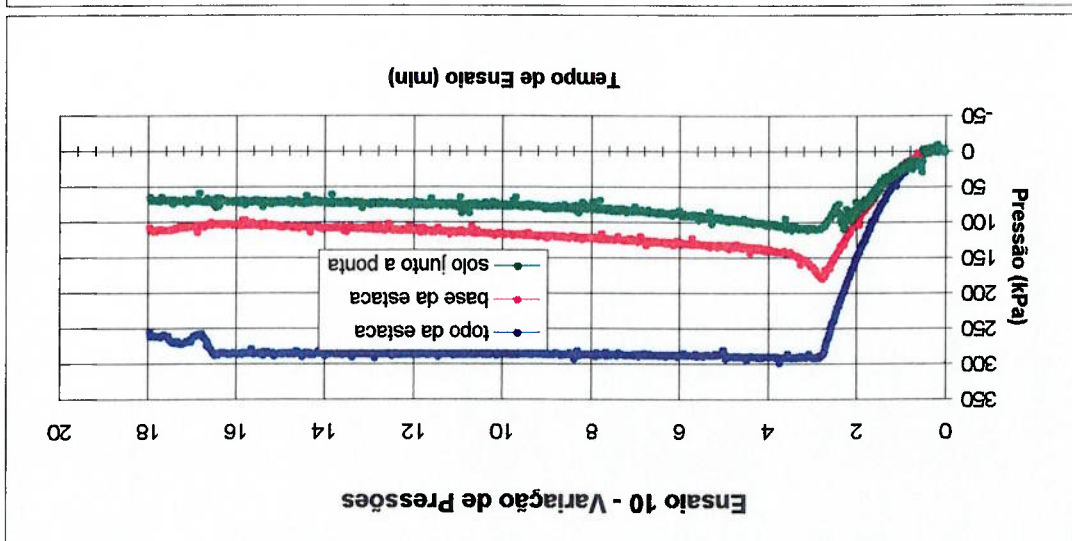
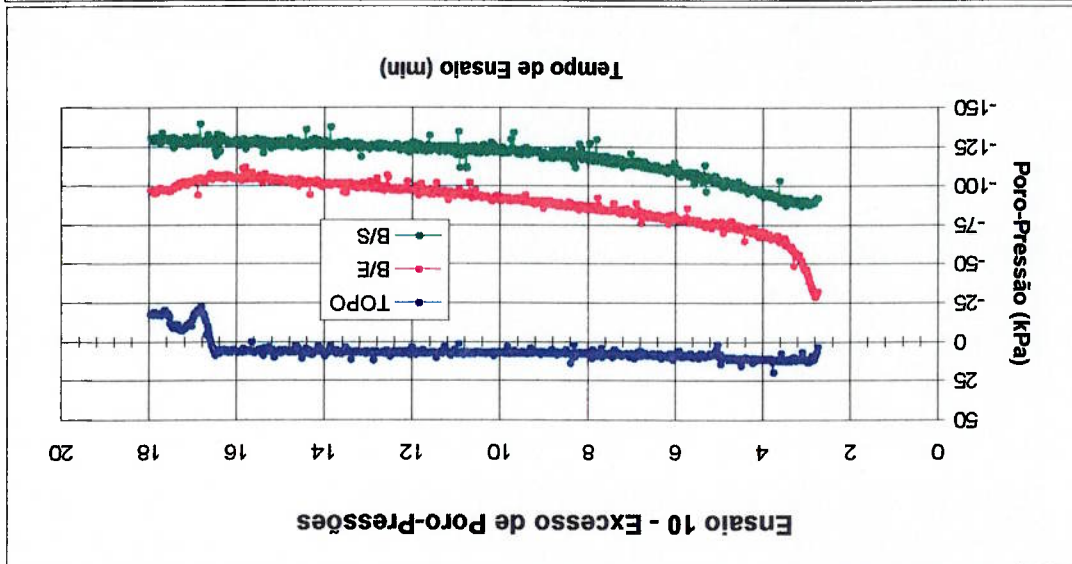
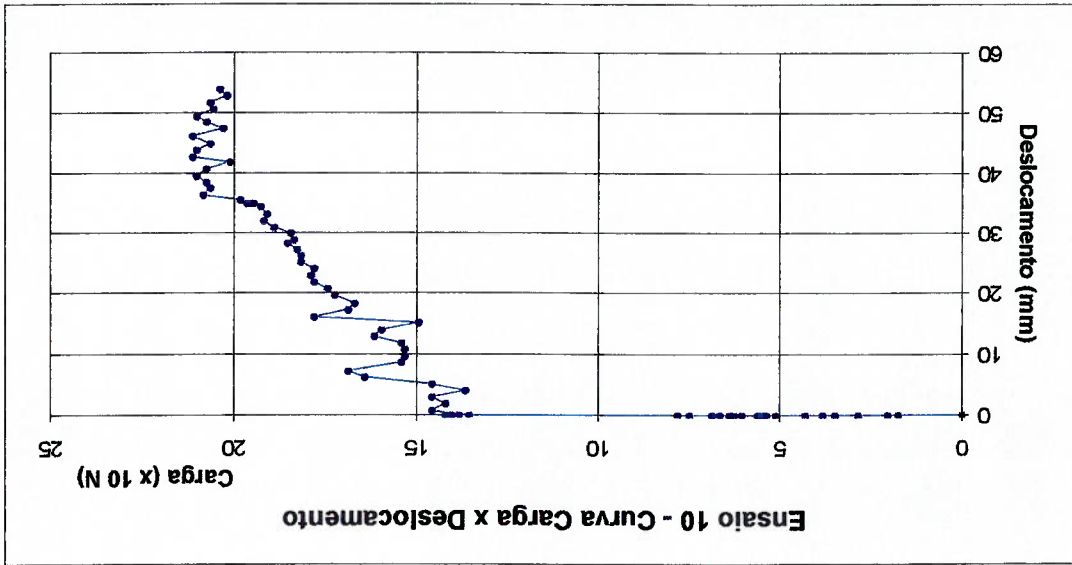
Ensaio 8 - Estaca de Sucção L/D=2 (com aleta e olhal inferior)



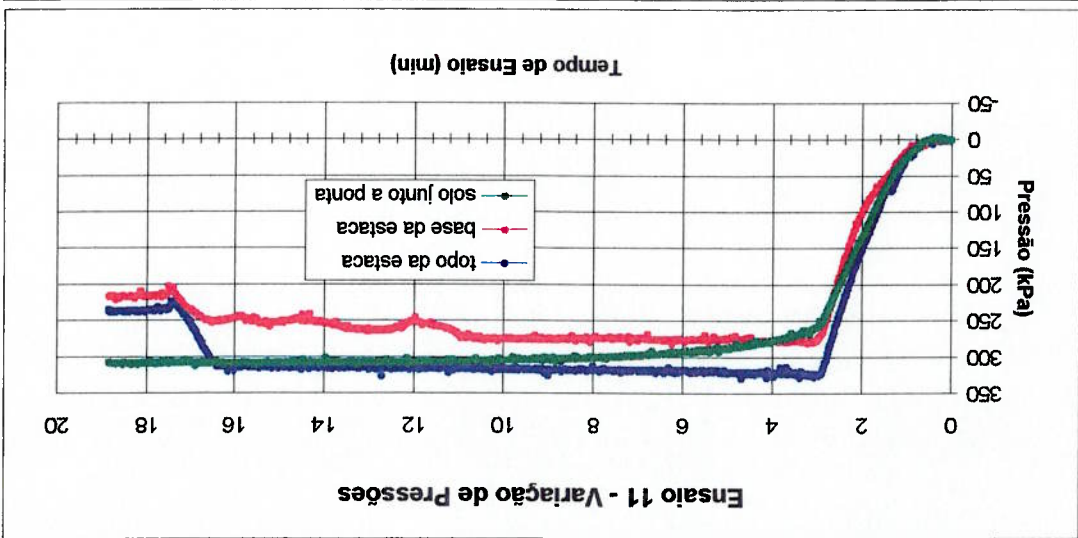
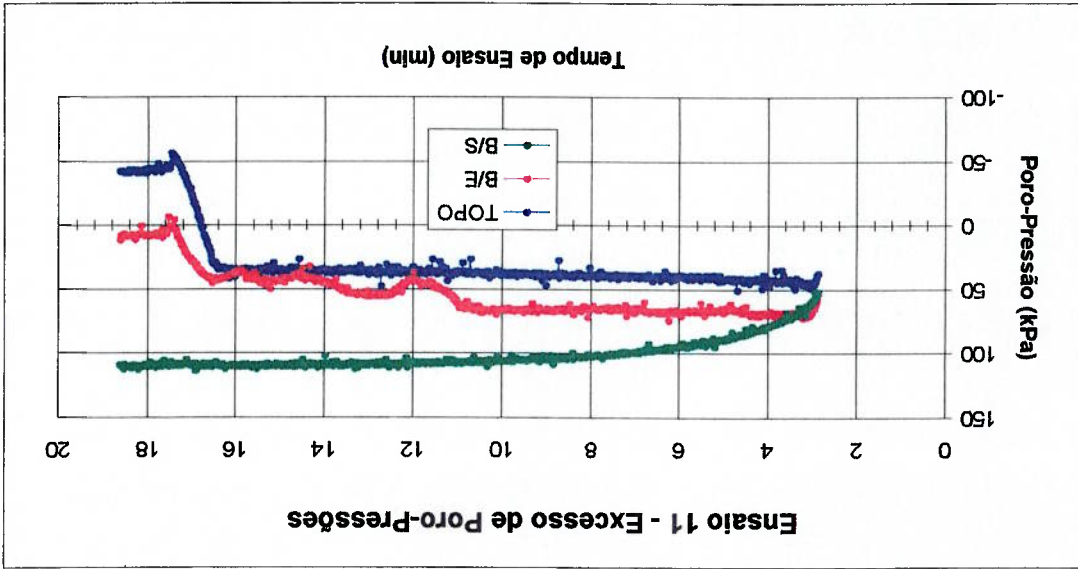
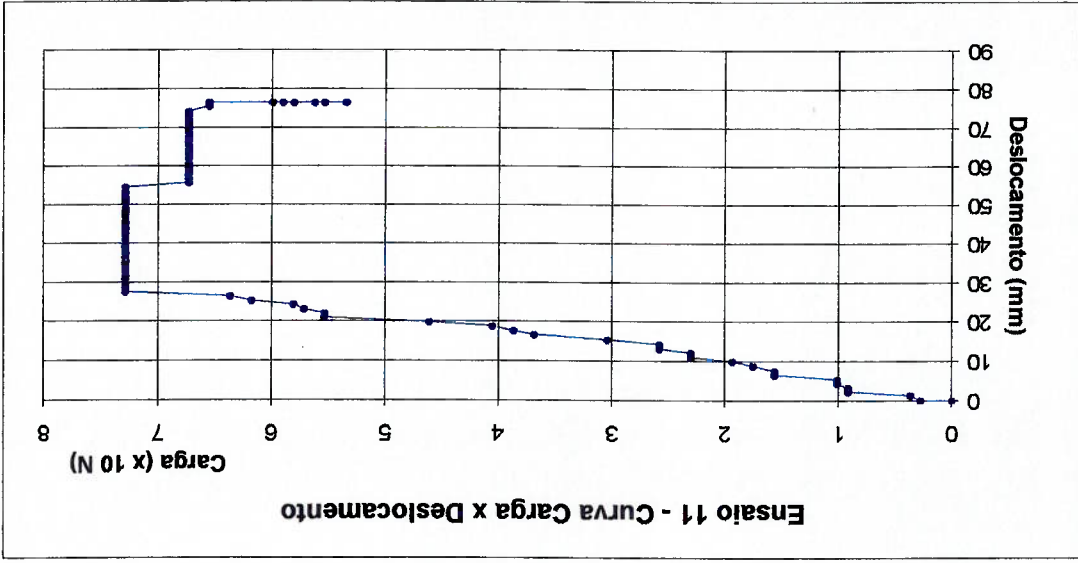
Ensaio 9 - Estaca de Sucção L/D=9(sem aleta e com olhal superior)



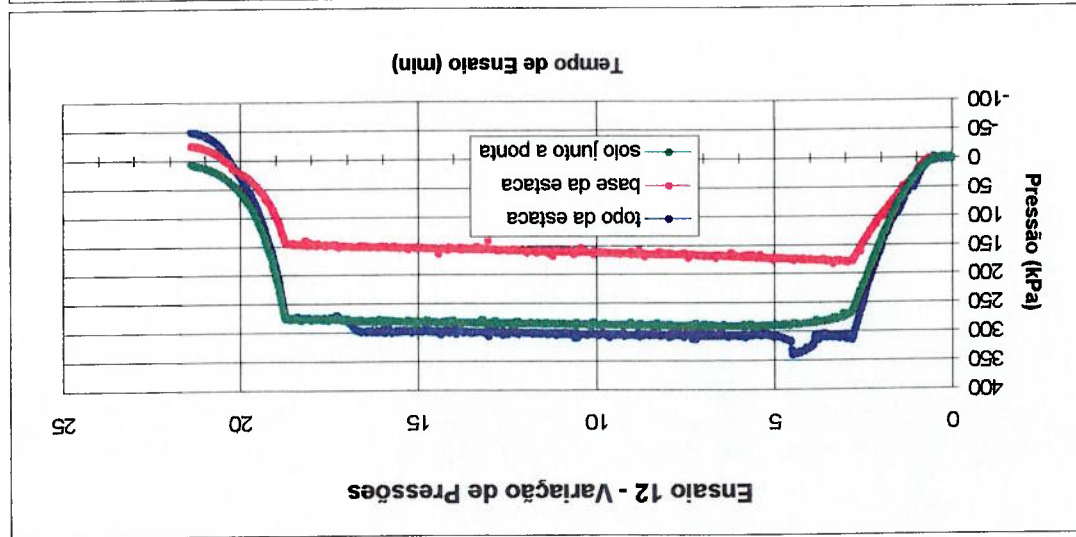
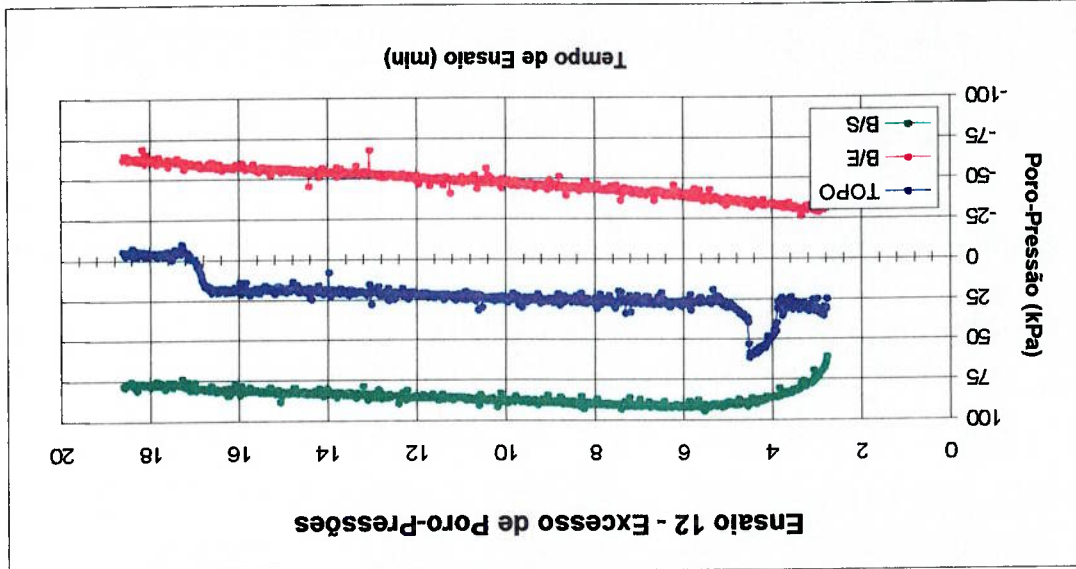
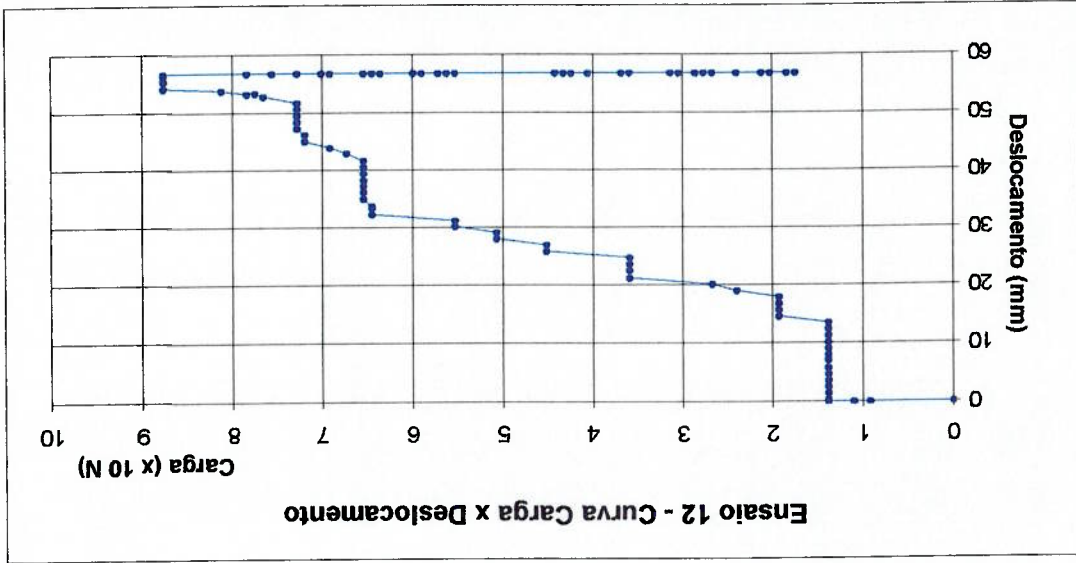
Ensaio 10 - Estaca de Sucção L/D=3(sem aleta com olhal inferior)



Ensaio 11 - Estaca de Sucção L/D=3 (com aleta e olhal superior)

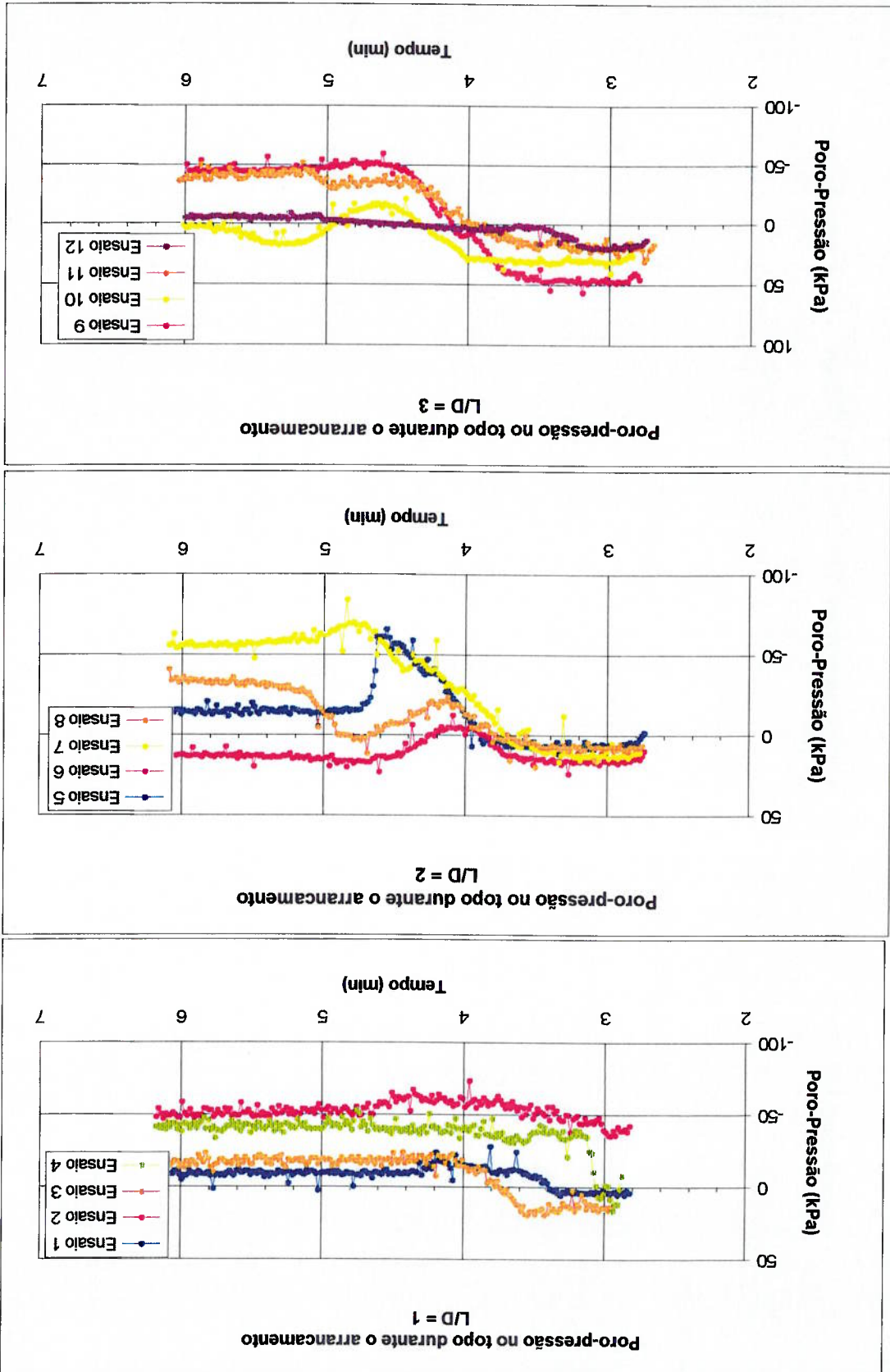


Ensaio 12 - Estaca de Sucção L/D=3(Com aleta e ohal inferior)

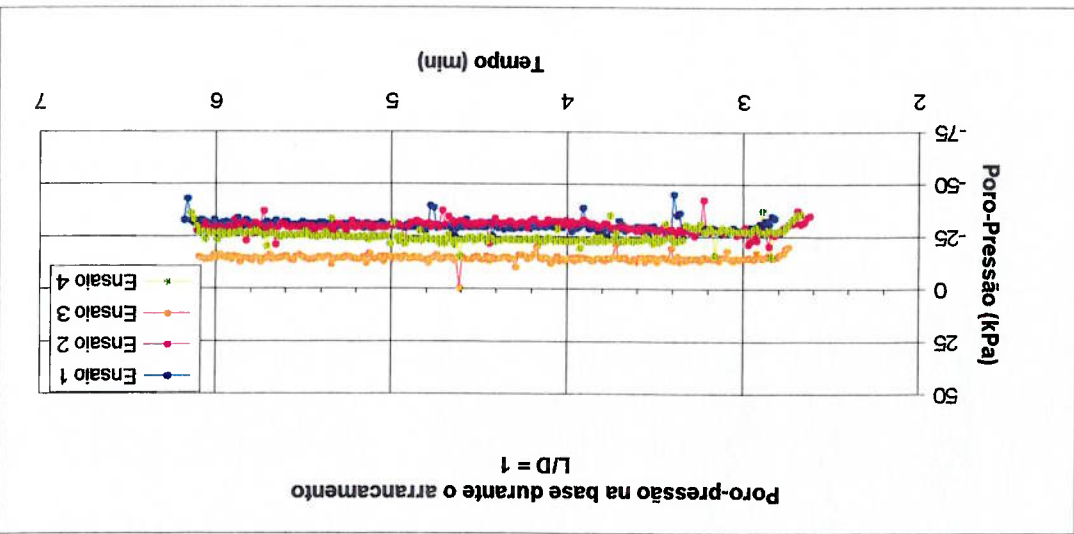
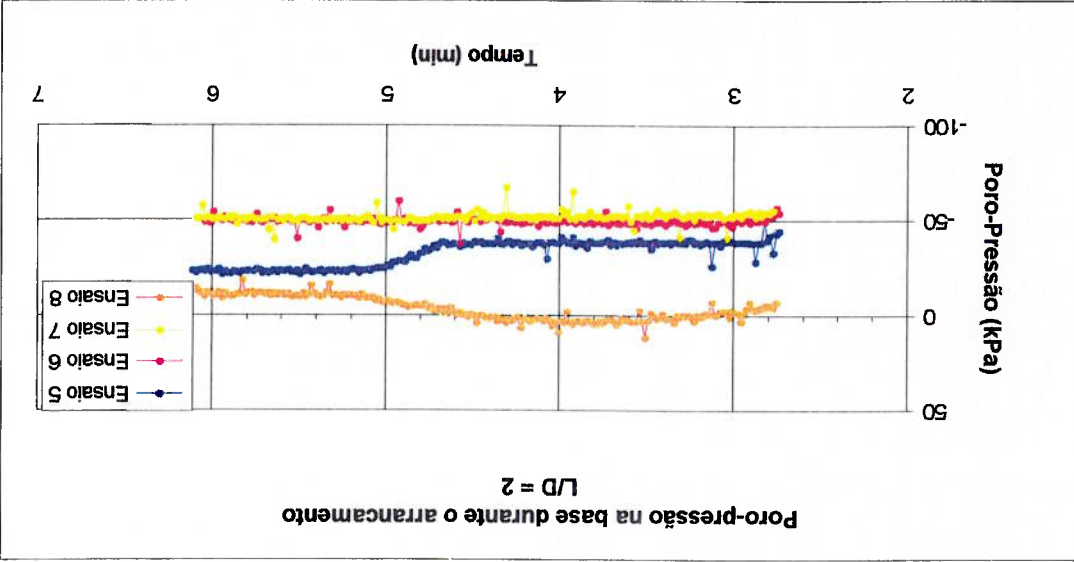
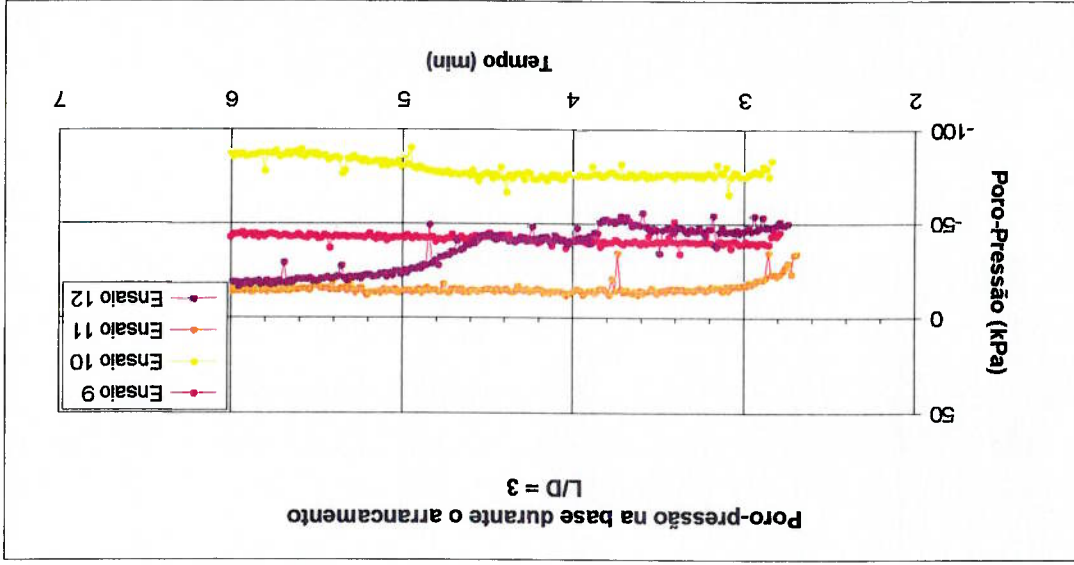


**ANEXOS - COMPORTAMIENTO DOS MODELOS DURANTE
ARRANCAMIENTO**

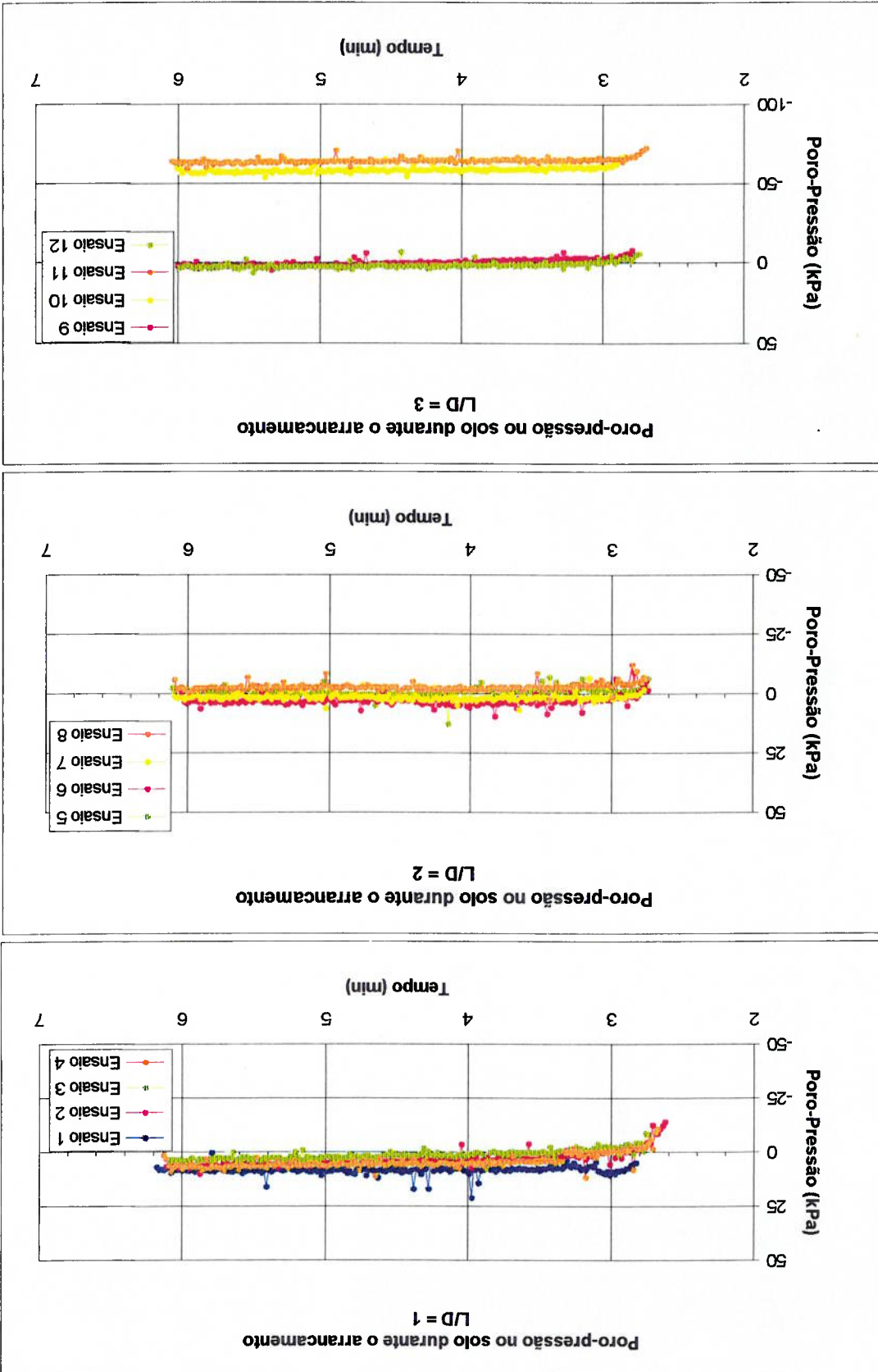
Comportamento da Poro - Pressão no Topo das Estacas de Sucção



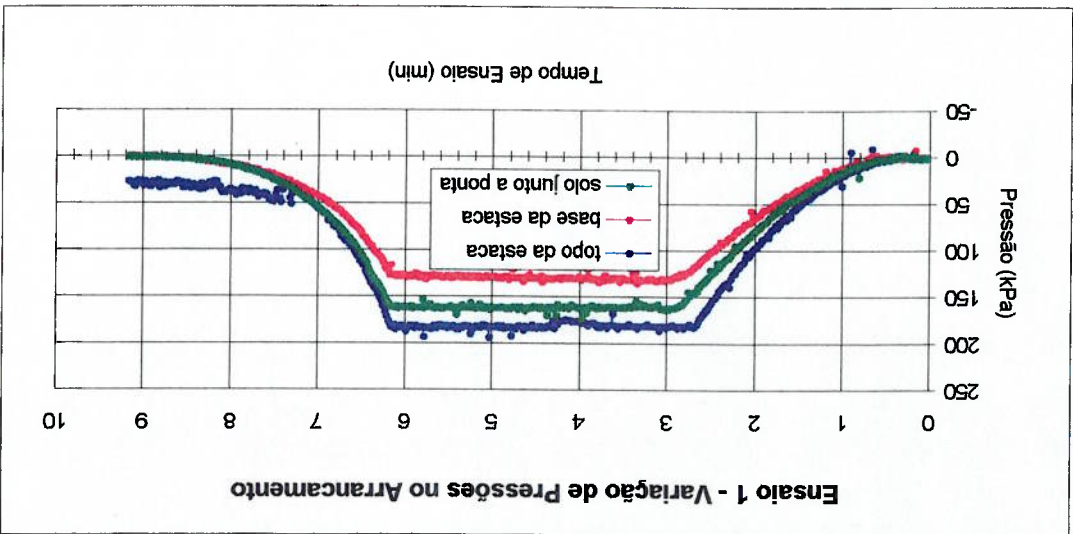
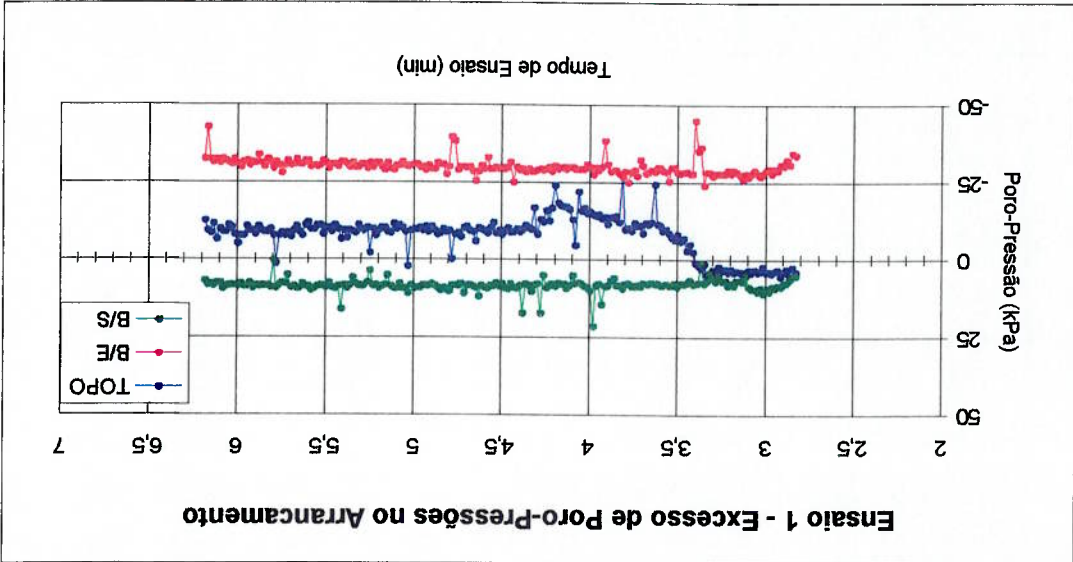
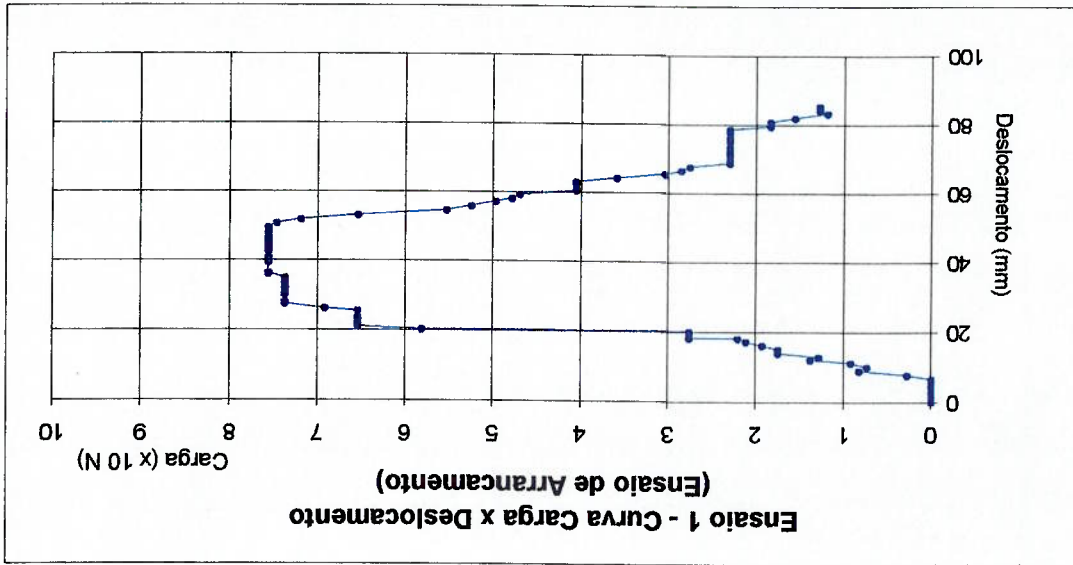
Comportamento da Poro - Pressão na Base das Estacas de Sucção



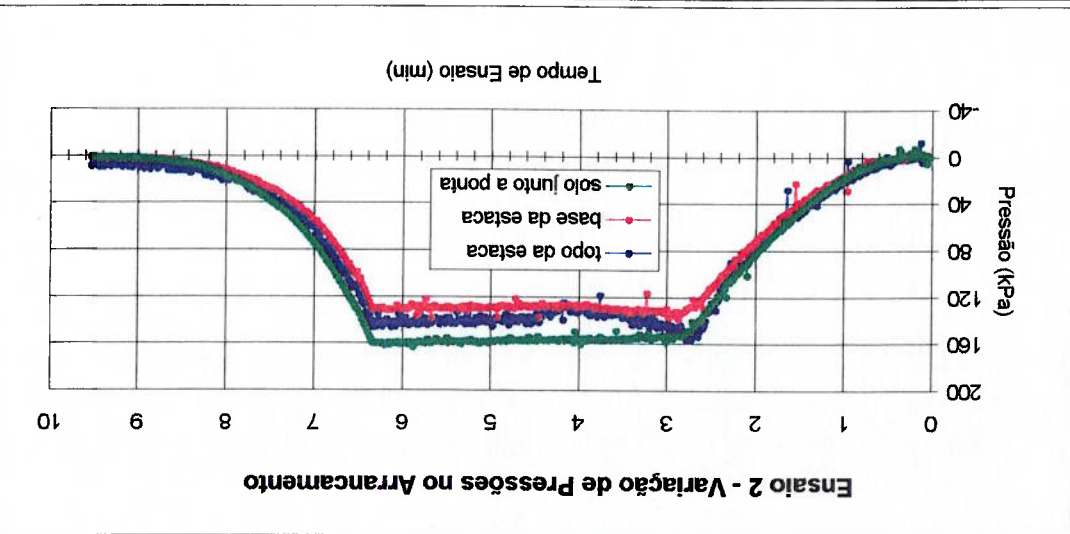
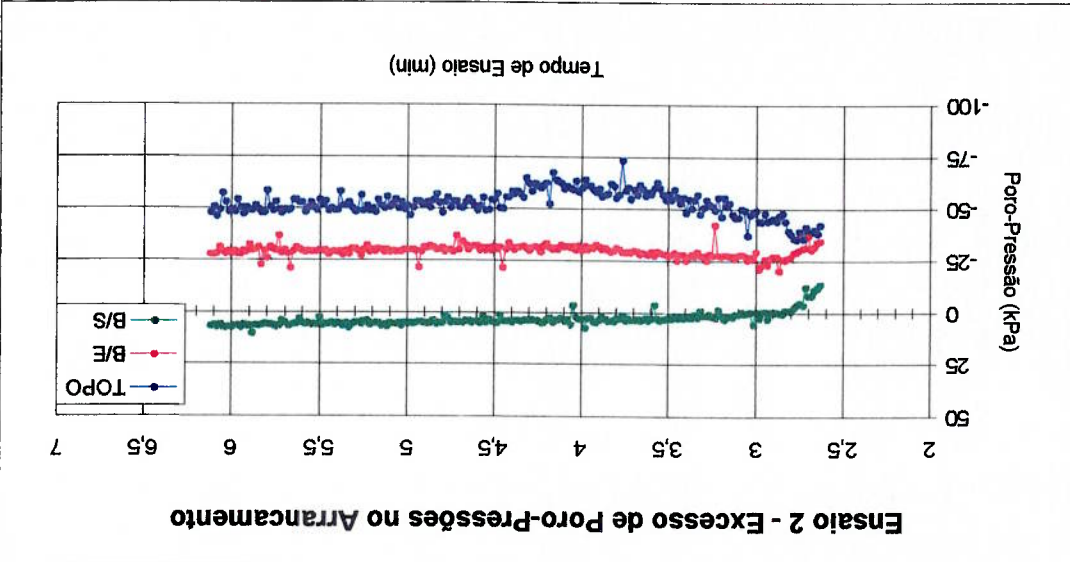
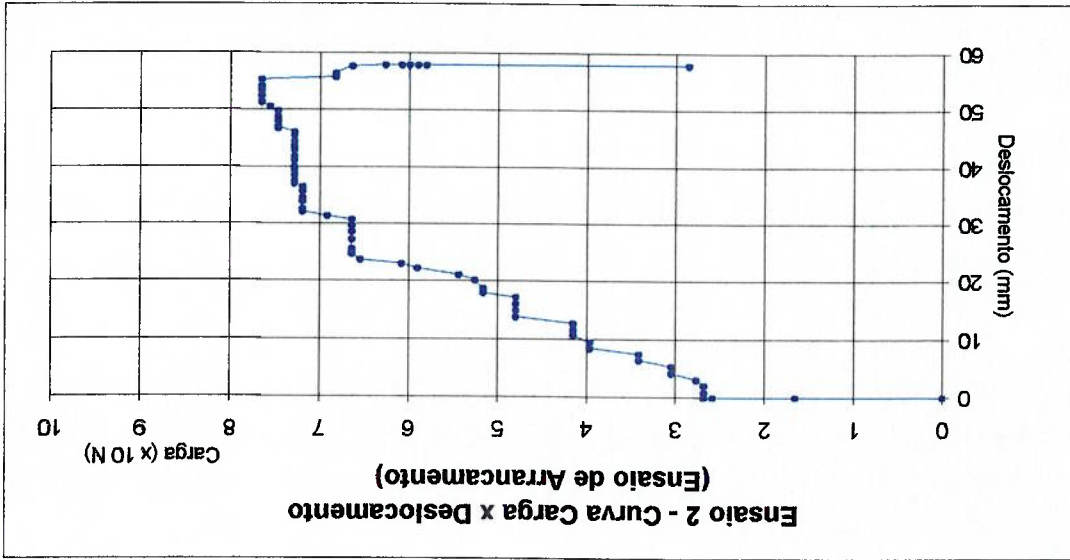
Comportamento da Poro - Pressão no Solo



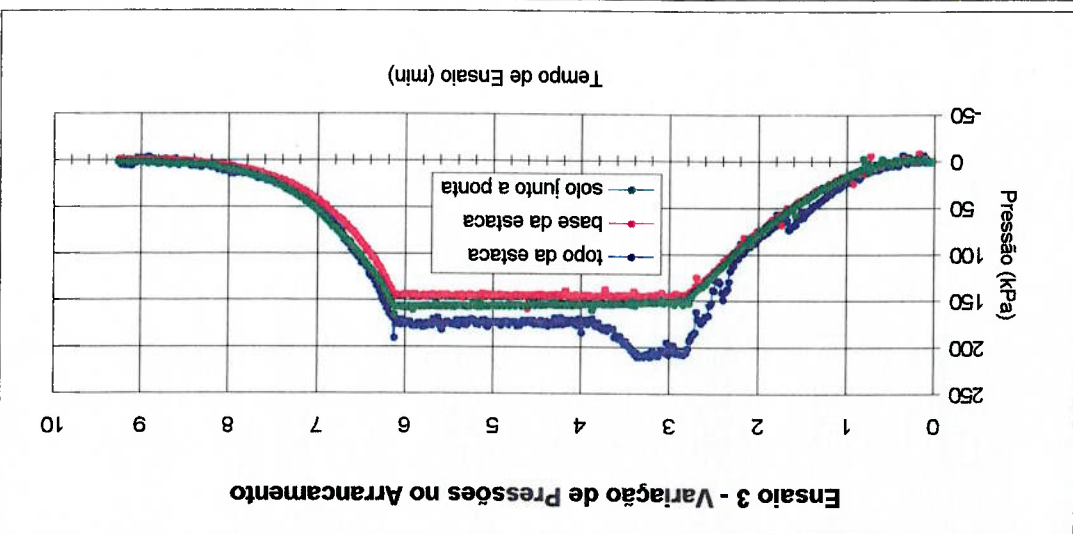
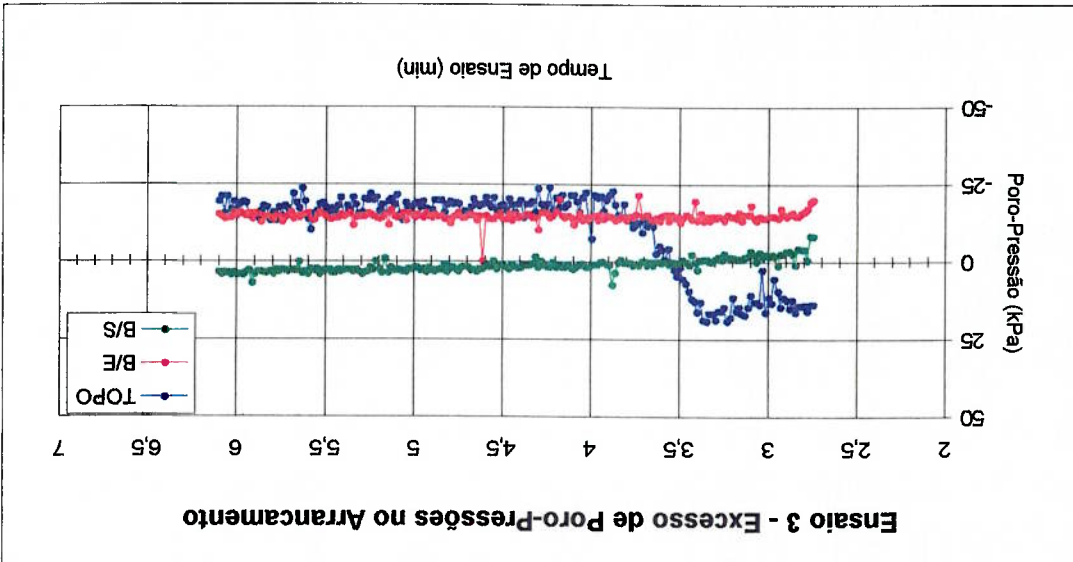
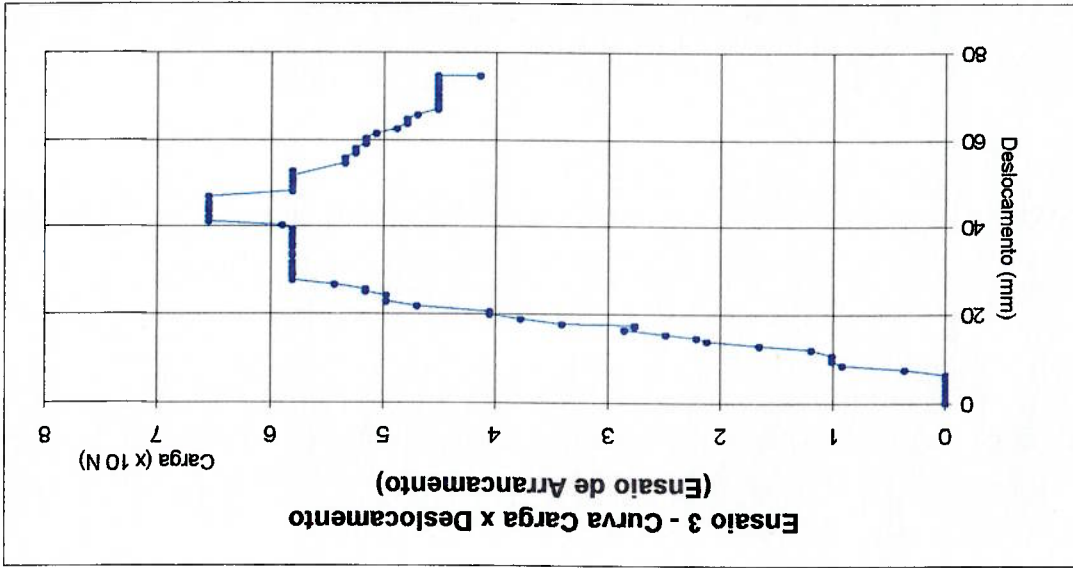
Ensaio 1 - Estaca de Sucção L/D=1(sem aleta com ohal superior)



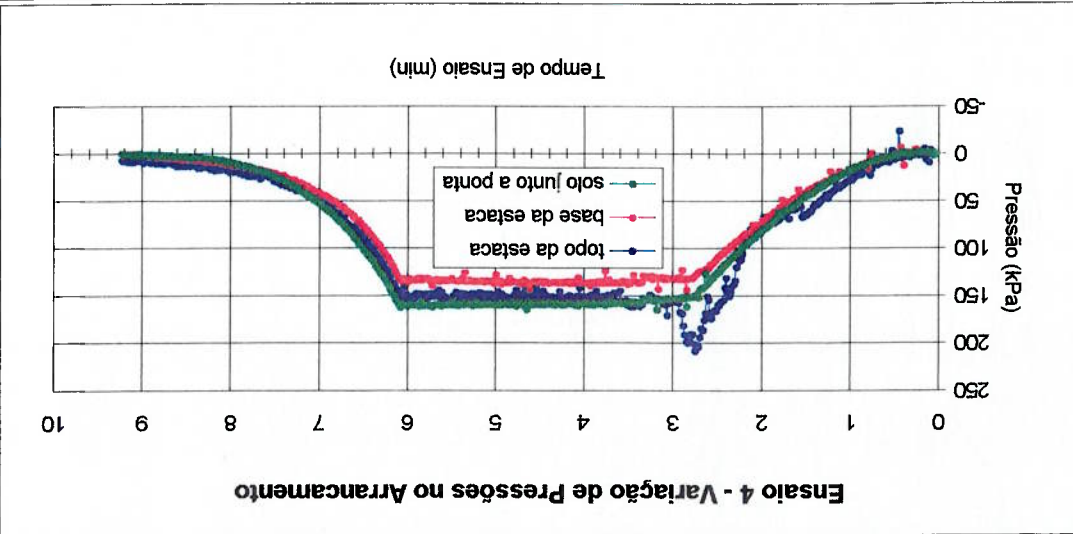
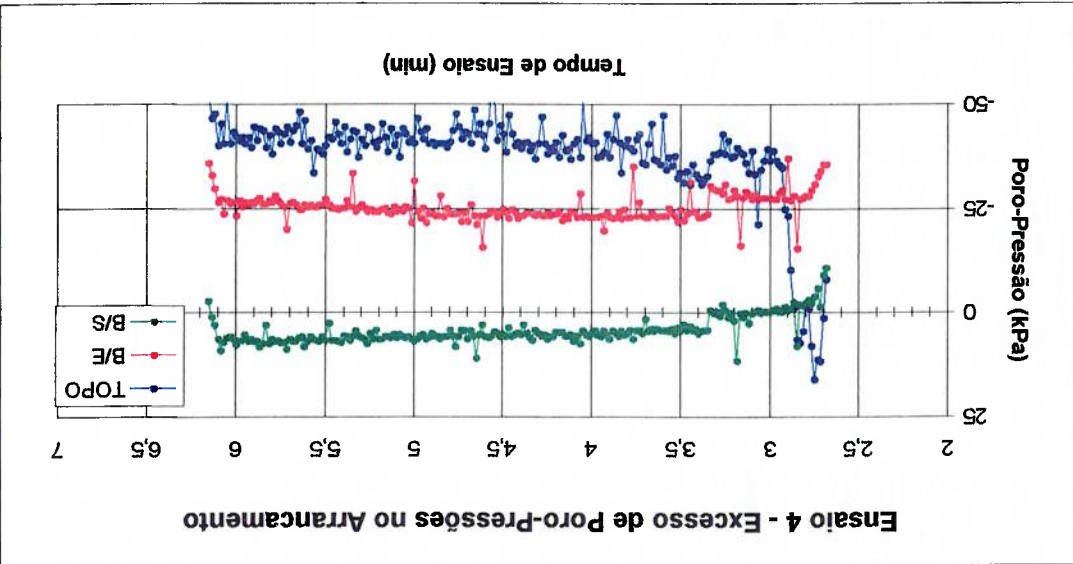
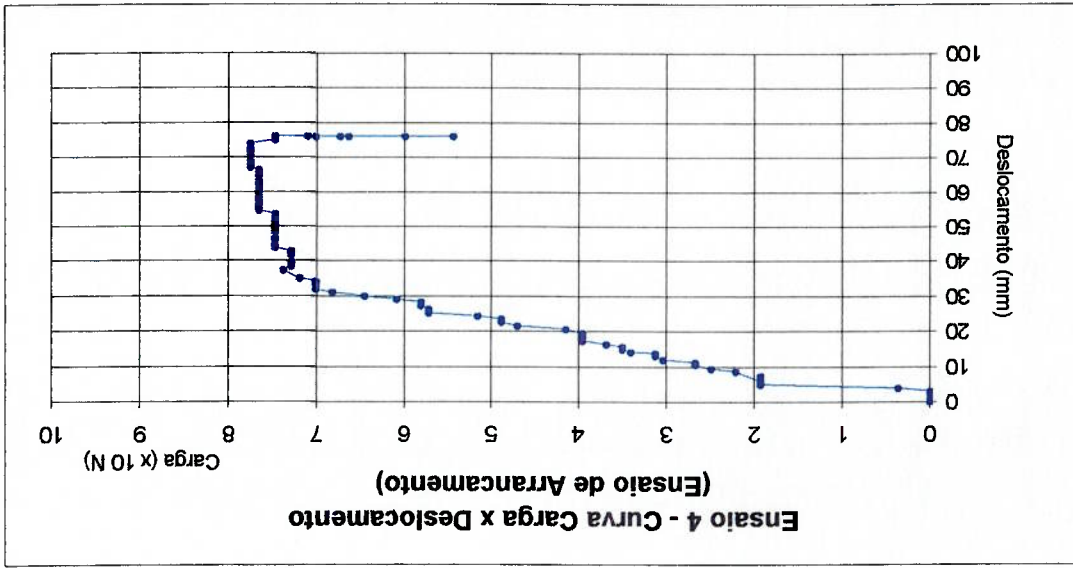
Ensaio 2 - Estaca de Sucção L/D=1(sem aleta com olhal inferior)



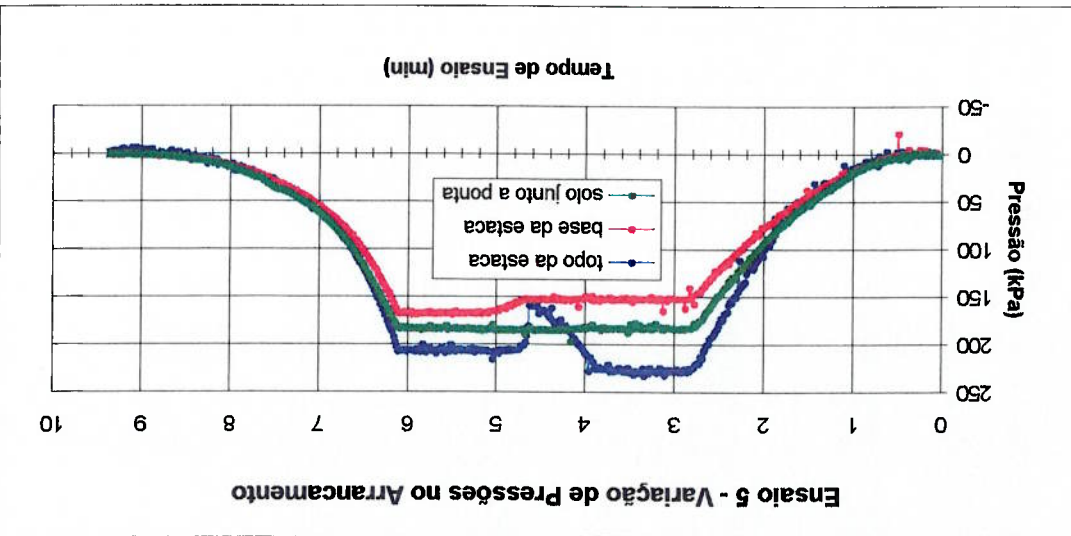
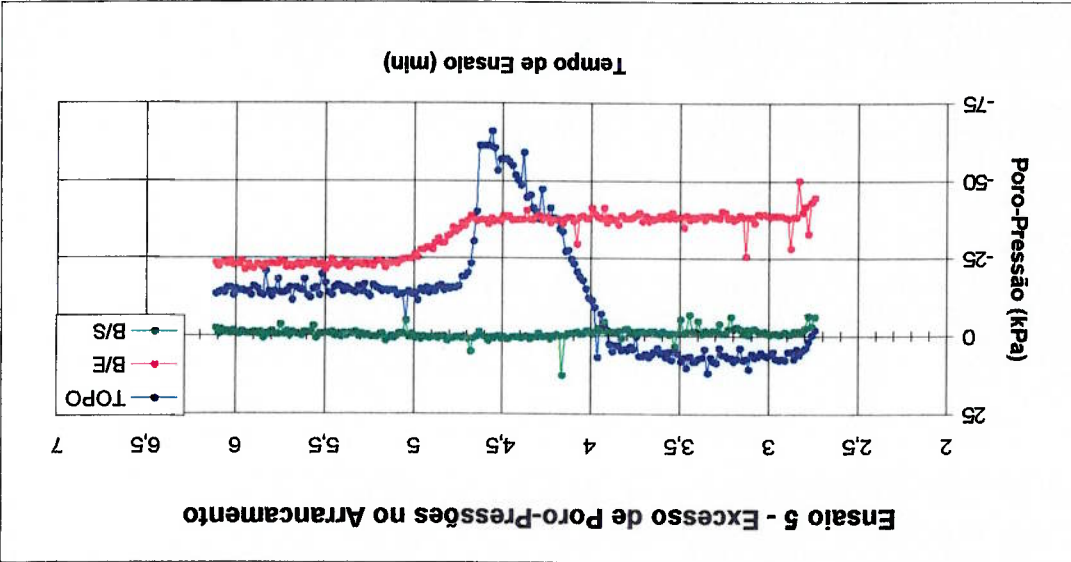
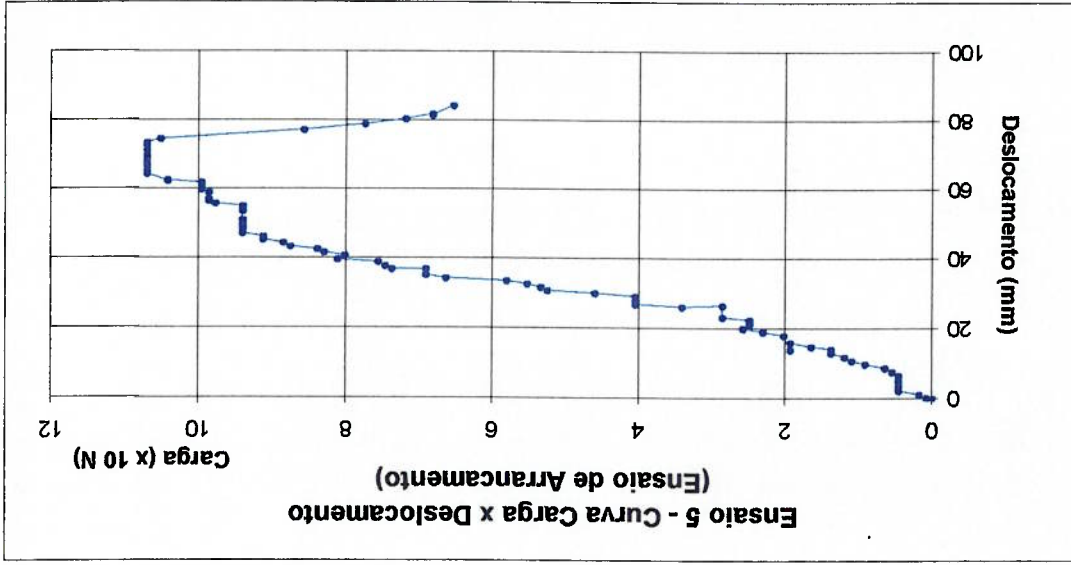
Ensaio 3 - Estaca de Sucção L/D=1 (com aleta e olhal superior)



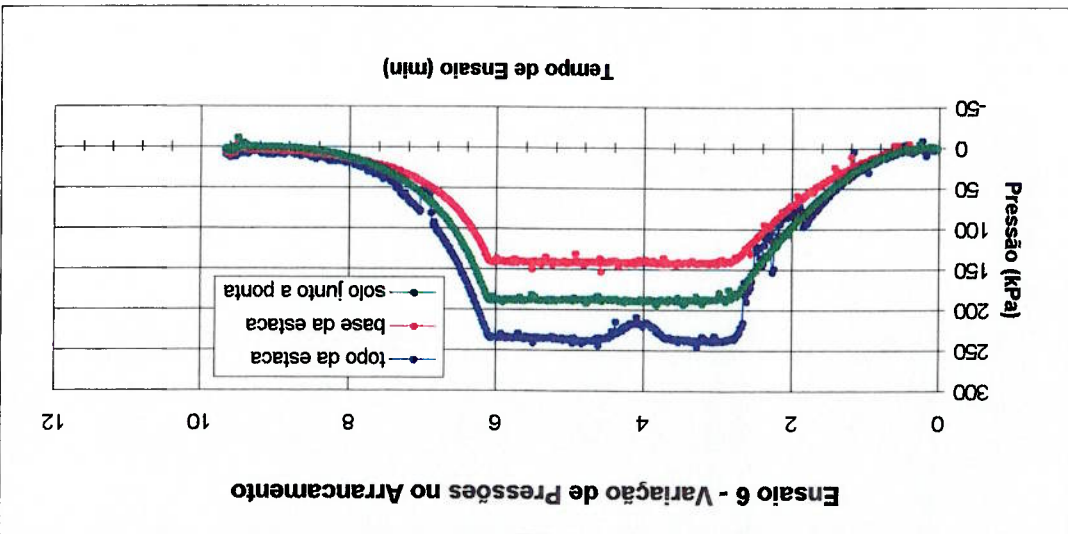
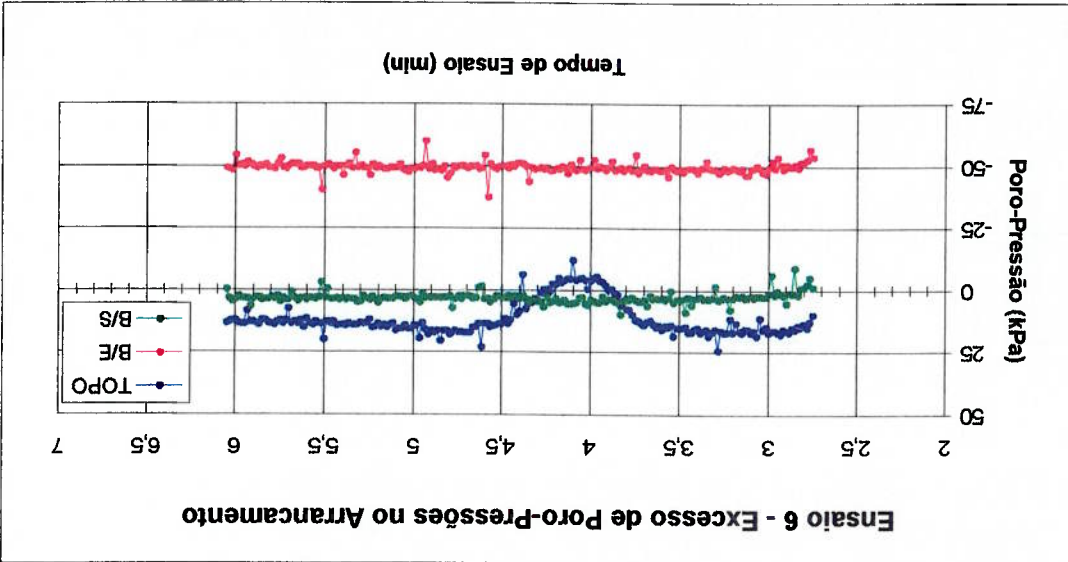
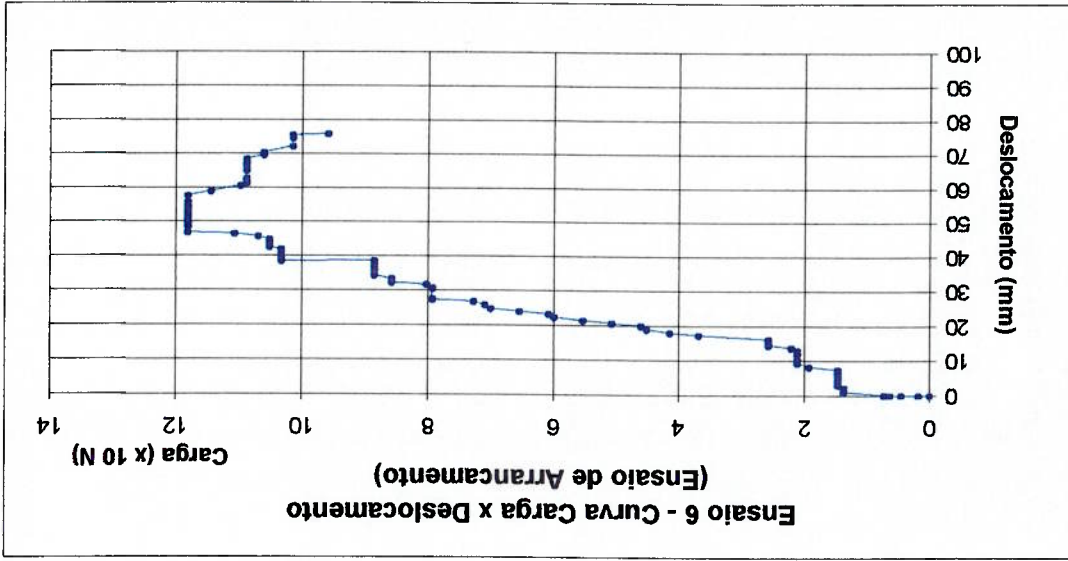
Ensaio 4 - Estaca de Sucção L/D=1 (com aleta e olhal inferior)



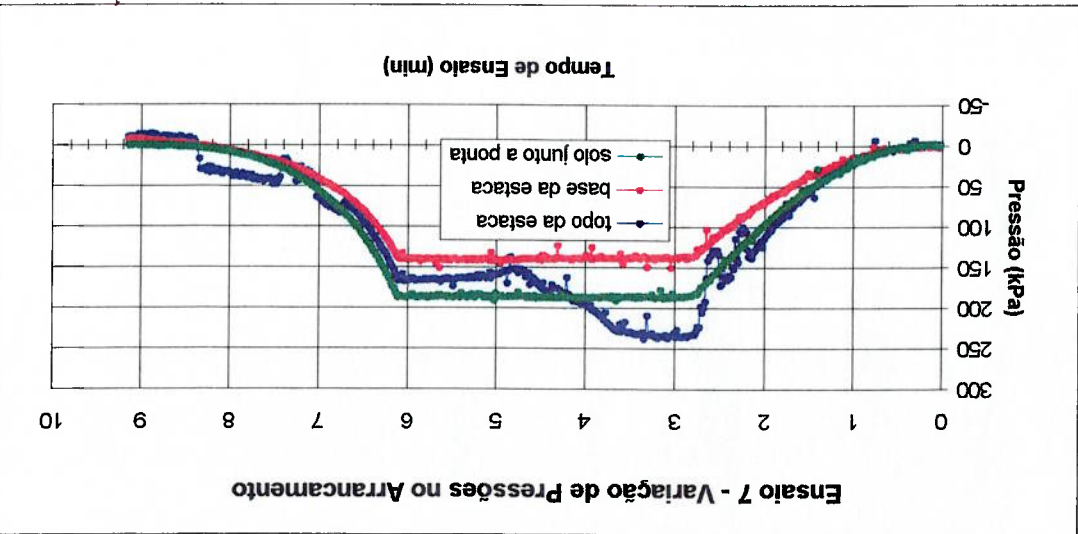
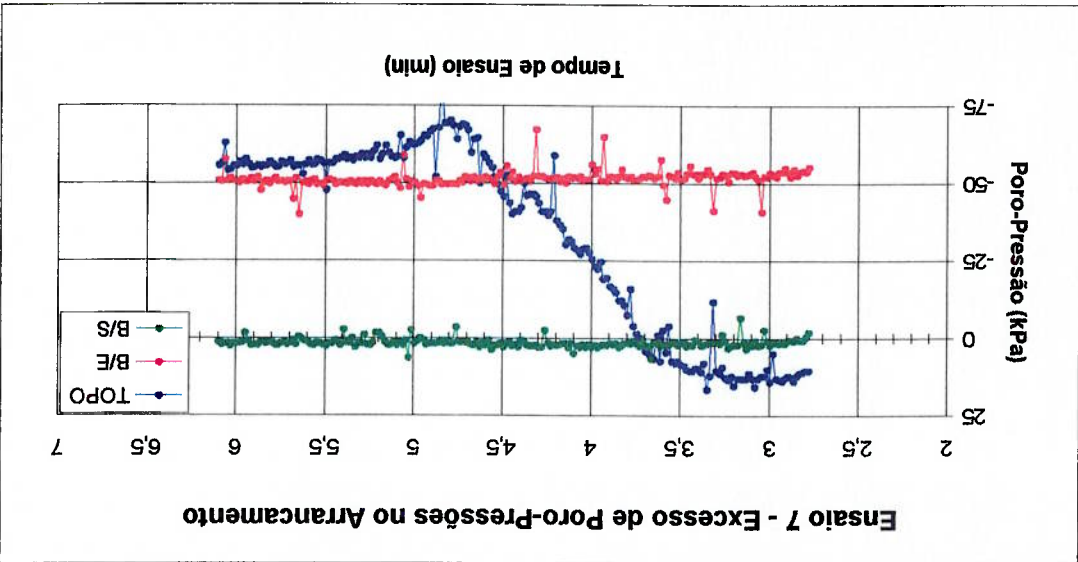
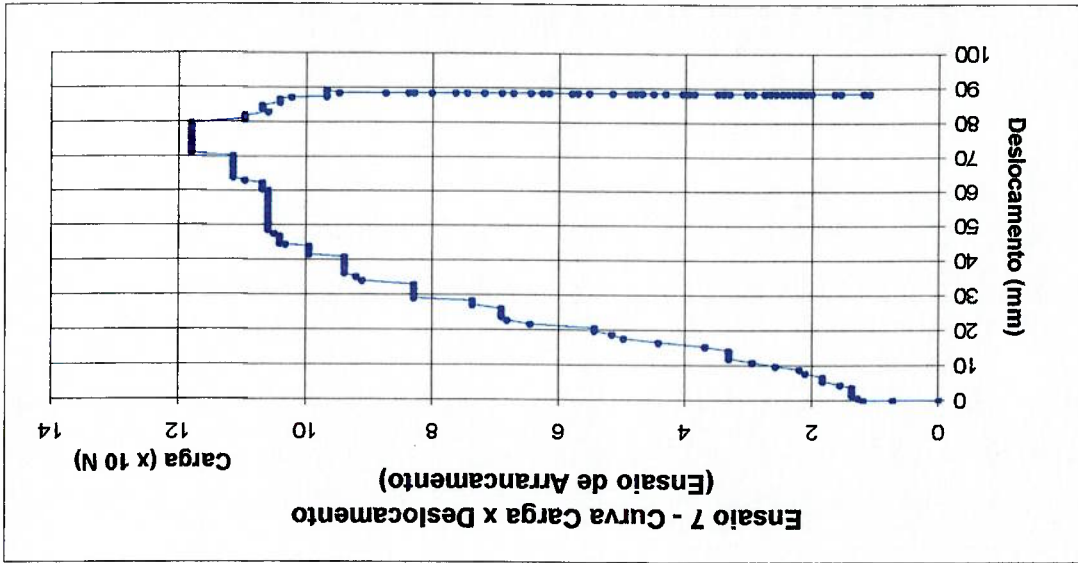
Ensaio 5 - Estaca de Sucção L/D=2(sem aleta com olhal superior)



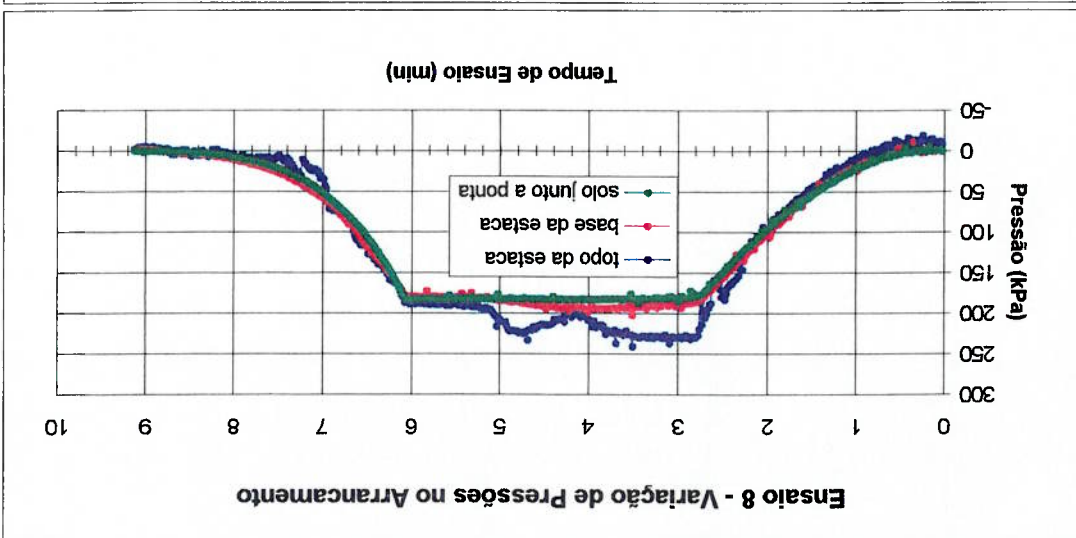
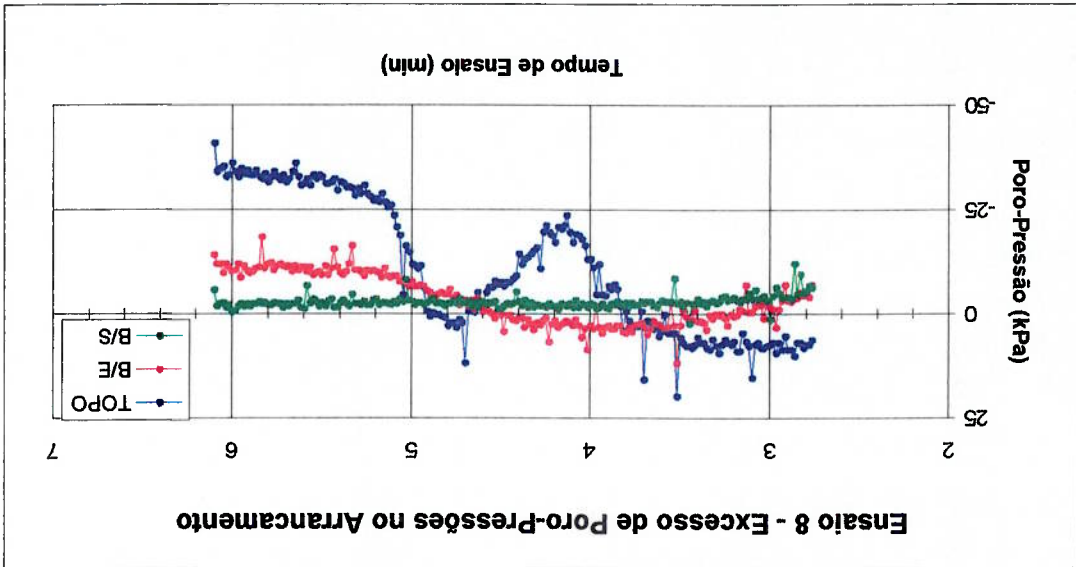
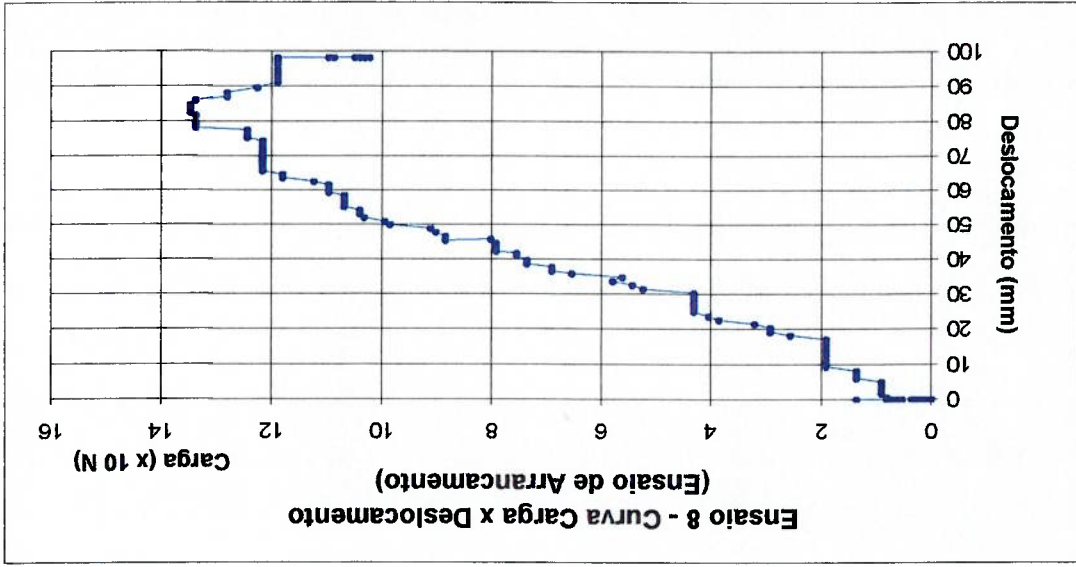
Ensaio 6 - Estaca de Sucção L/D=2(sem aleta com olhal inferior)



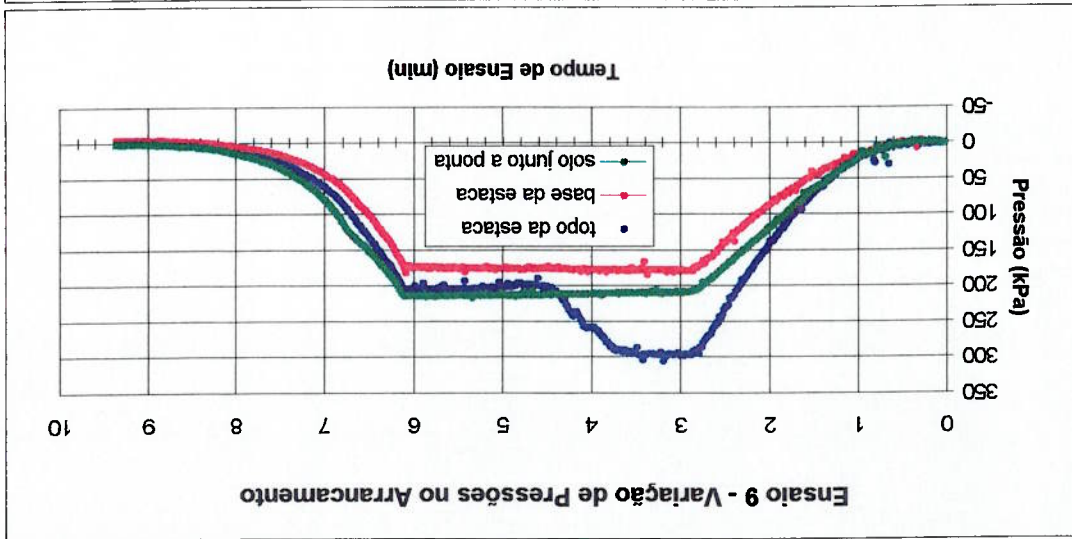
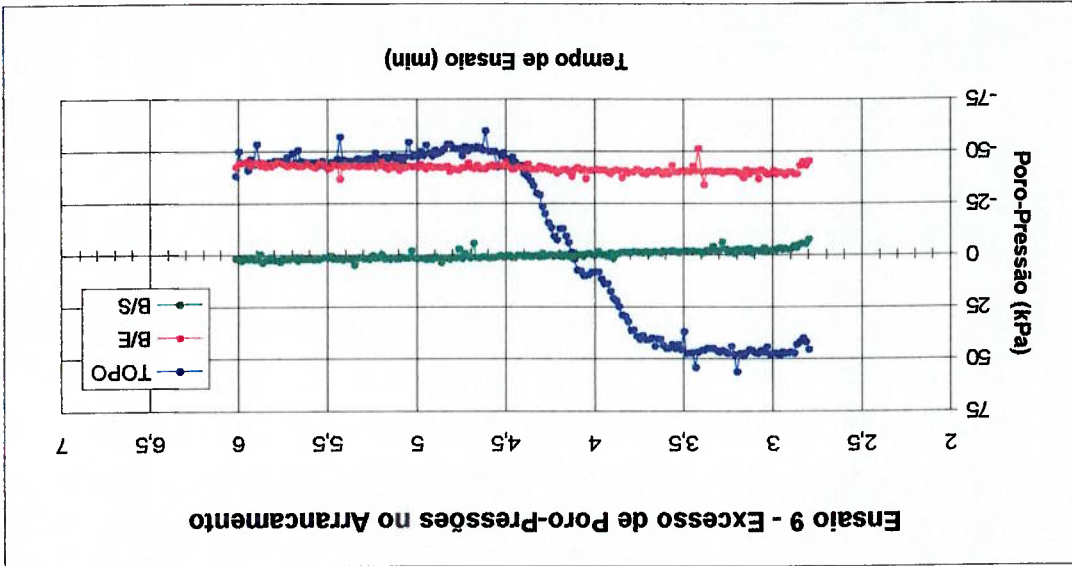
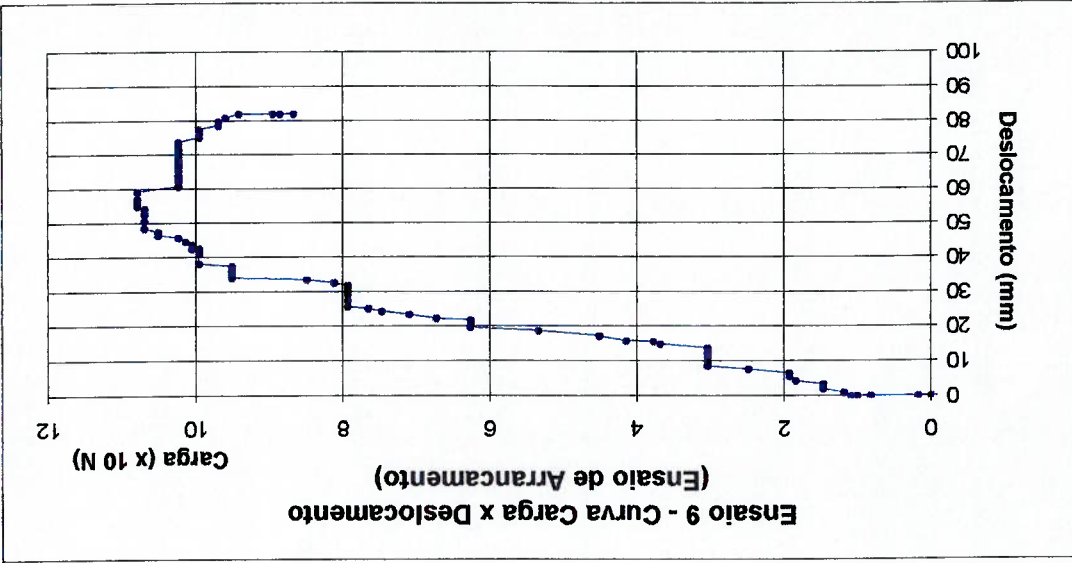
Ensaio 7 - Estacas de Sucção L/D=2 (com aleta e olhal superior)



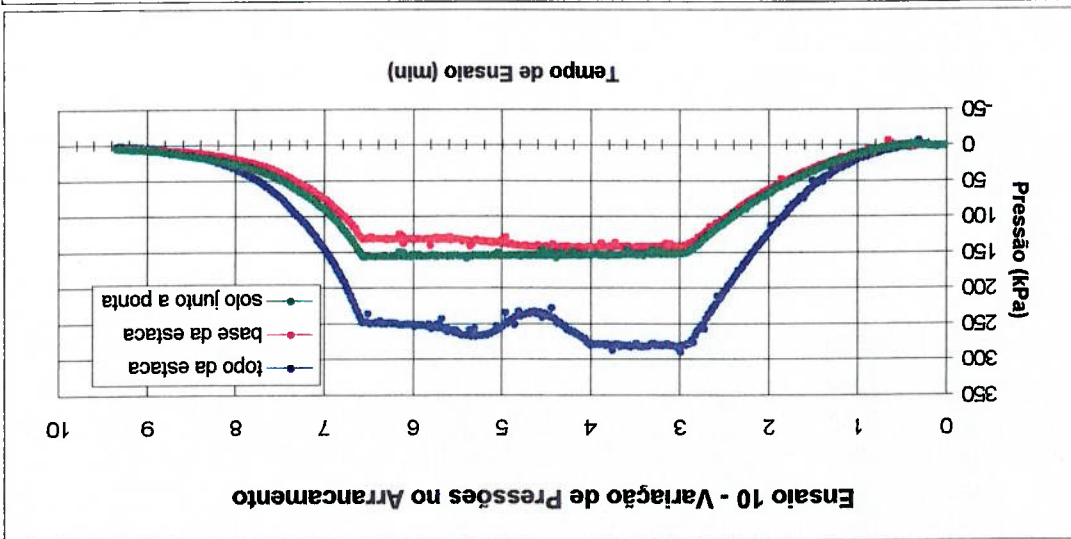
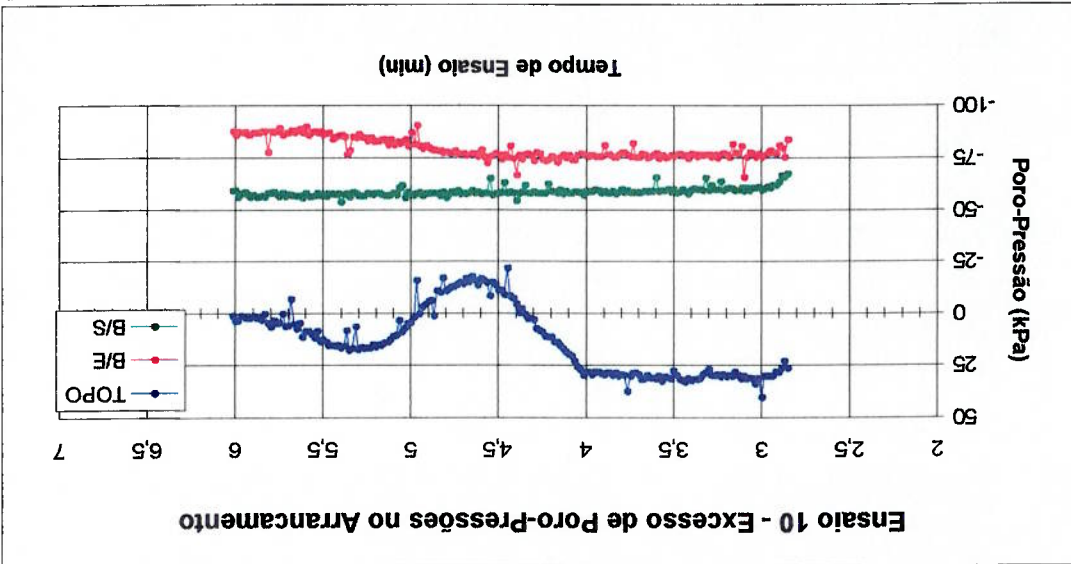
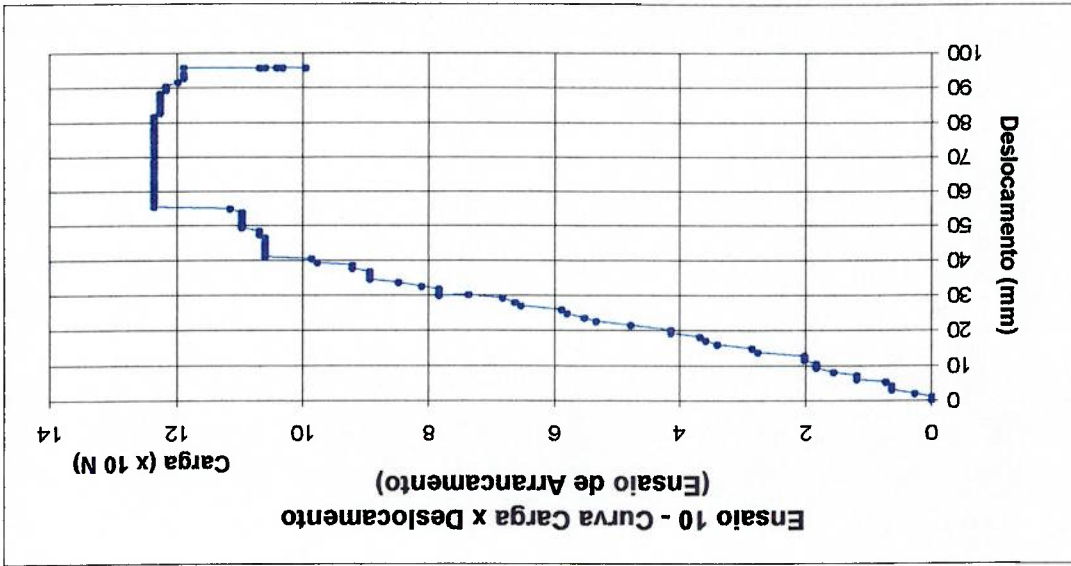
Ensaio 8 - Estaca de Sucção L/D=2(com aleta e olhal inferior)



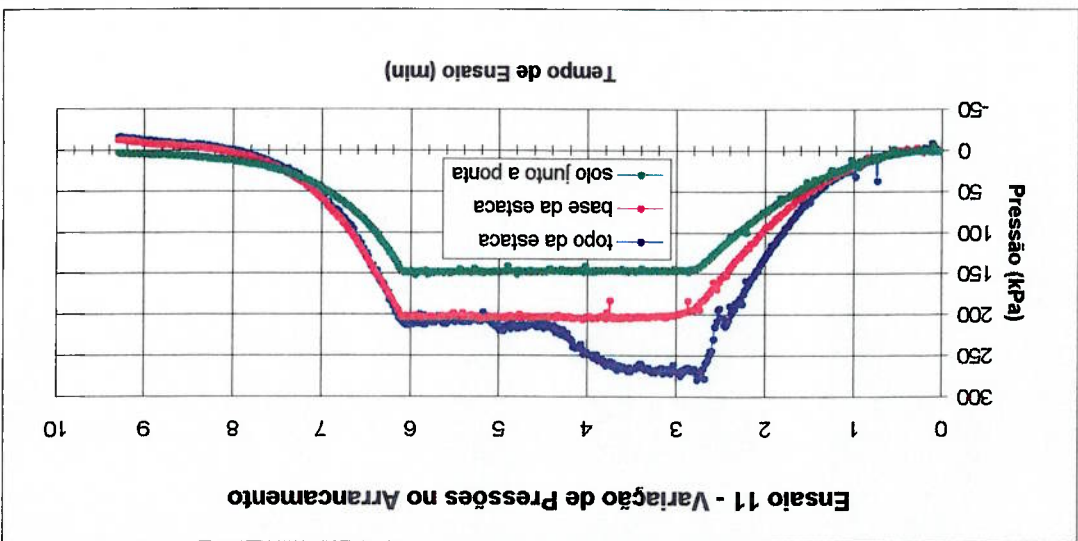
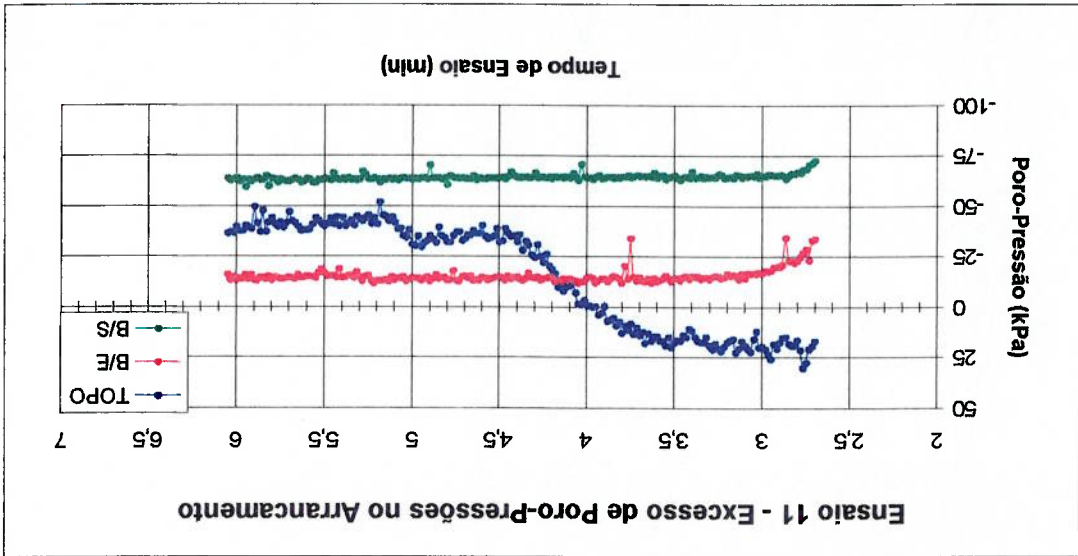
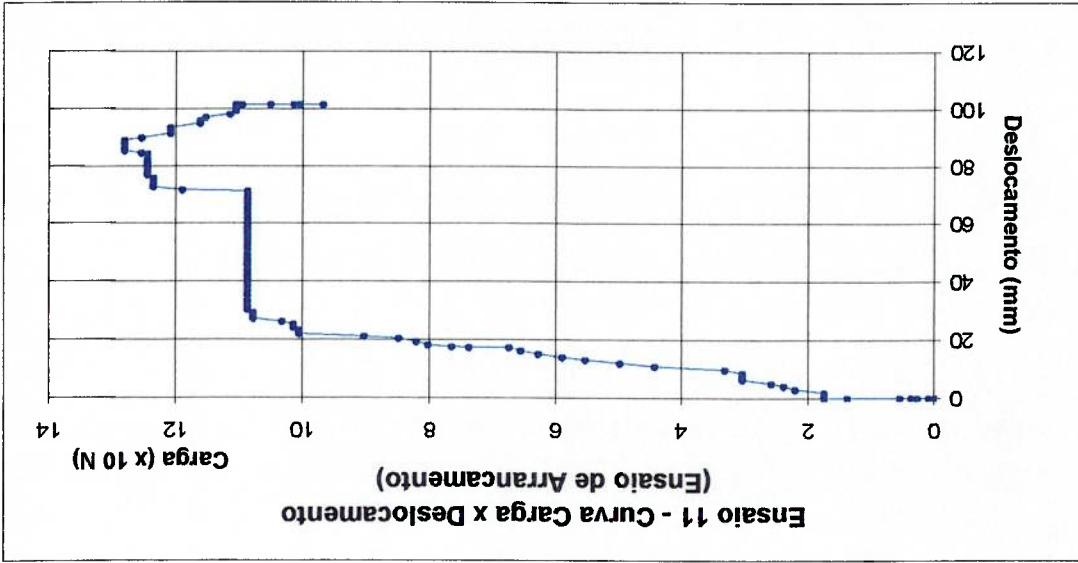
Ensaio - 9 Estaca de Sucção L/D=3(sem aleta e com olhal superior)



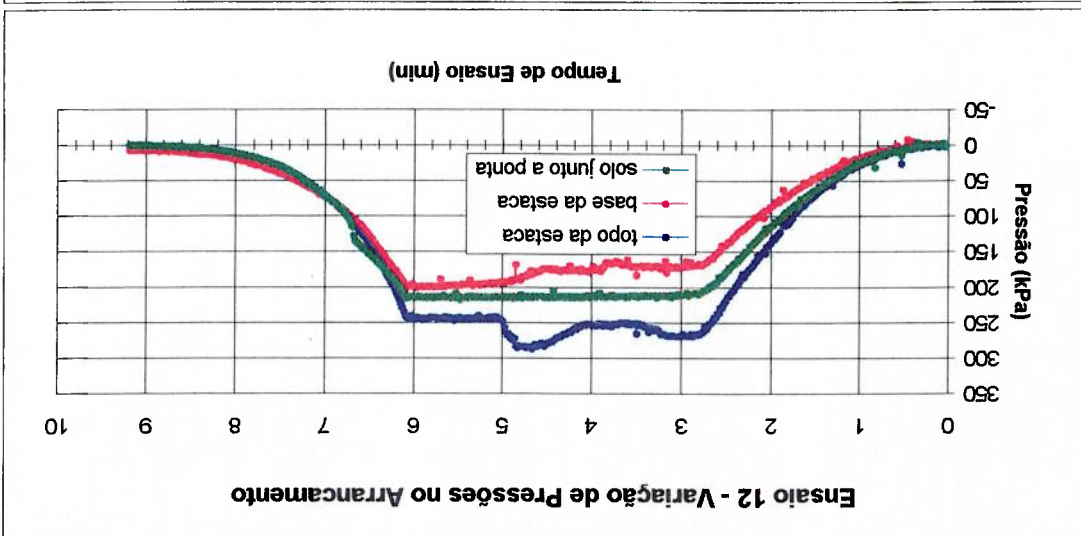
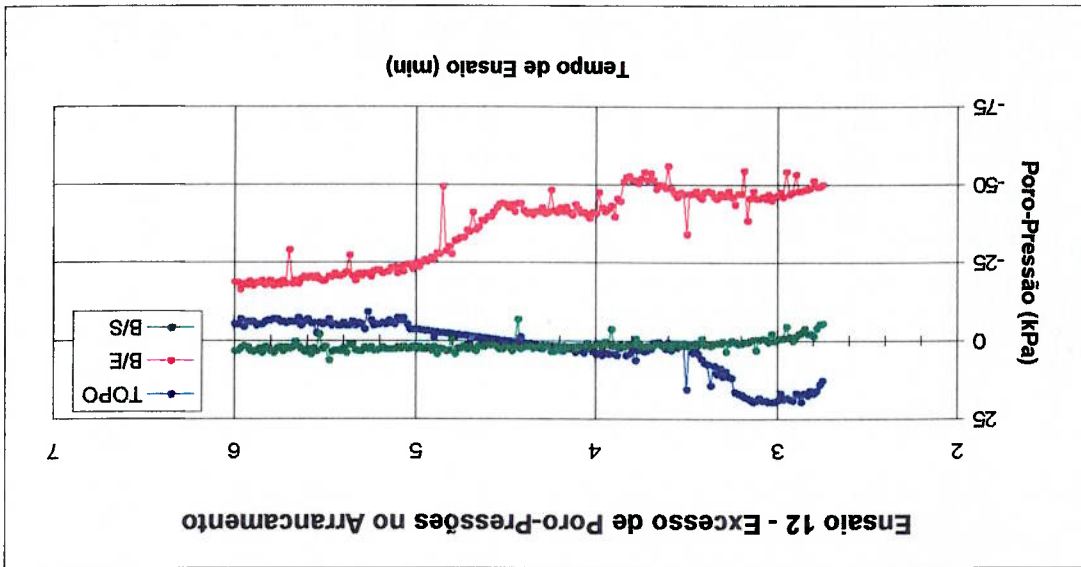
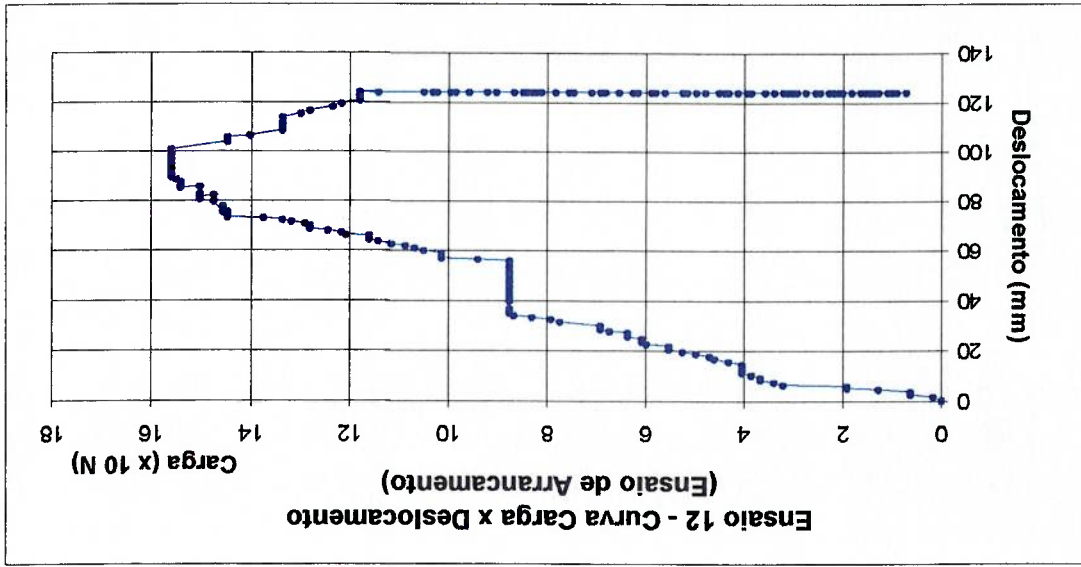
Ensaio 10 - Estaca de Sucção L/D=3(sem aleta com olhal inferior)



Ensaio 11 - Estaca de Sucção L/D=3 (com aleta e ohal superior)



Ensaio 12 - Estaca de Sucção L/D=3 (com aleta e olhal inferior)



APÊNDICE 1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE MODELOS DE ESTACAS DE SUÇÃO

Fuglsang et al. (1991) realizaram ensaios de modelos em laboratório bem como em centrífuga para investigar a resistência à ruptura das estacas de sucção, a influência da resistência da argila empregada e a velocidade de carregamento. Nestes experimentos observou-se que a capacidade de carga da estaca sob condições de não drenagem foi aumentada significativamente devido a redução de pressão dentro e abaixo da estaca durante o arrancamento.

Os ensaios em modelos foram realizados com estacas de 65mm e 80mm de diâmetro, onde foi utilizada argila com duas resistências, 10kPa e 20 kPa e profundidade de penetração das estacas foi de 2 diâmetros. A Figura A1 mostra a seção vertical do equipamento experimental utilizado. Em todos os ensaios a estaca foi carregada verticalmente de uma maneira tal que a deformação fosse controlada até a ruptura.

Dois tipos diferentes de carregamento foram utilizados, 1mm/s e 0,1mm/s, para provar que nenhuma drenagem significativa aparecesse na zona de ruptura abaixo da estaca. A carga da estaca foi medida através de um anel de força montado com extensômetros elétricos.

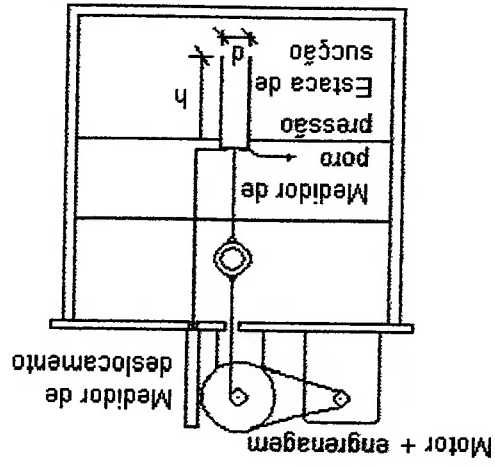


FIGURA A1 - MONTAGEM DO ENSAIO (FUGLSANG, 1991)

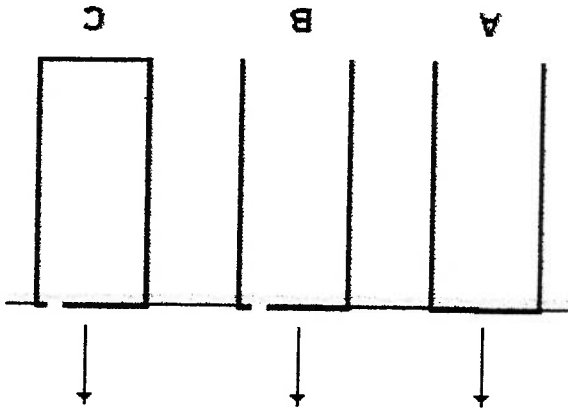


FIGURA A2 - TIPOS DE ENSAIOS (FUGLSANG, 1991)

Além dos ensaios de arrancamento em estacas fechadas no topo, também foram realizados ensaios em estacas abertas para medir somente o atrito lateral. A Figura A2 mostra os 3 tipos de ensaios realizados.

O ensaio (A) foi realizado com a estaca de sucção fechada no topo, enquanto os ensaios (B) e (C) foram com estacas abertas no topo. No ensaio (B) foi medida a soma dos atritos interno e externo.

No ensaio (C) somente a força externa de cisalhamento foi medida, sendo retirada a argila do interior da estaca antes do carregamento. Foi observado que no ensaio (B) o solo sempre voltava à sua posição original quando a estaca era arrancada. No ensaio (A) foi medida a poro pressão na parte superior da estaca. Um transdutor de pressão da *Druck* foi montado rente à superfície interna no topo da estaca.

No entanto, quando a estaca foi cravada dentro da argila, foi permitido o fluxo de água através do topo para evitar o excesso de poro pressão.

Havia uma fina camada de água acima da estaca nos ensaios em laboratório, enquanto um reservatório de 100 a 200mm foi empregado nos ensaios em centrífuga para simular a submersão no mar. Os ensaios em centrífuga foram realizados a 40 vezes a aceleração da gravidade (40g).

Em ambos os ensaios a 1g e a 40g as estacas fechadas no topo romperam gradualmente e a argila embaixo das estacas sofreu grande deformação plástica. Após os ensaios, uma cratera rasa com diâmetro de aproximadamente de 3 estacas foi observada.

As curvas típicas de carga x deslocamento são mostradas na Figura A3. A Figura A4 mostra a poro pressão no topo da estaca nos mesmos ensaios. De acordo com os autores, em seis dos quinze ensaios a 1g a argila rompeu repentinamente após uma deformação extensa, a primeira curva na Figura A3 ilustra este fenômeno.

Todos os ensaios realizados a 1g e comparados a 40g foram essencialmente não drenados. Em alguns ensaios a 1g a ruptura ocorreu na base da estaca após extensiva deformação. A análise indicou tensões de até 100kPa na base. Por outro lado, ruptura elástica não foi observada nos ensaios a 40g. Os experimentos mostraram que os ensaios a 1g não revelaram nenhum mecanismo de ruptura relevante.

FIGURA A4 - PORO PRESSÃO NO TOPO DA ESTACA DE SUÇÃO (FUGLSANG, 1991)

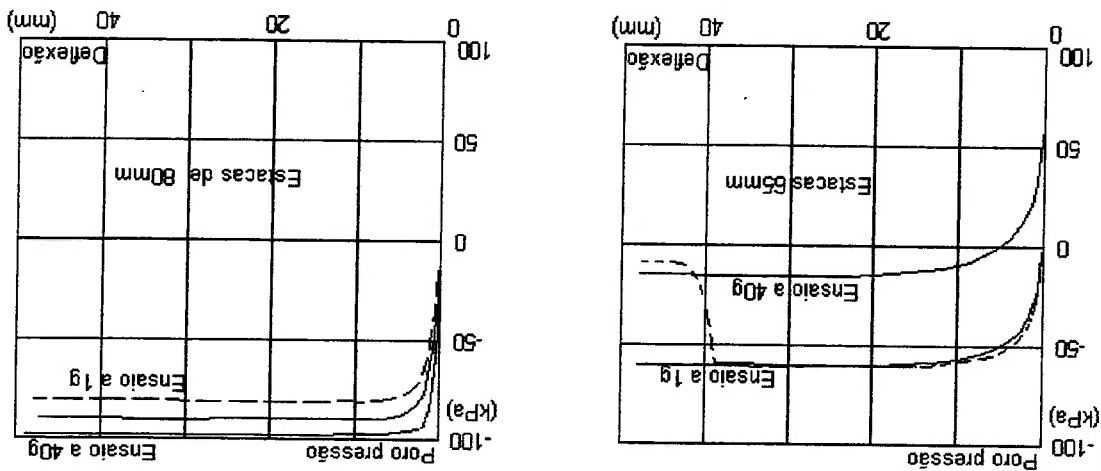
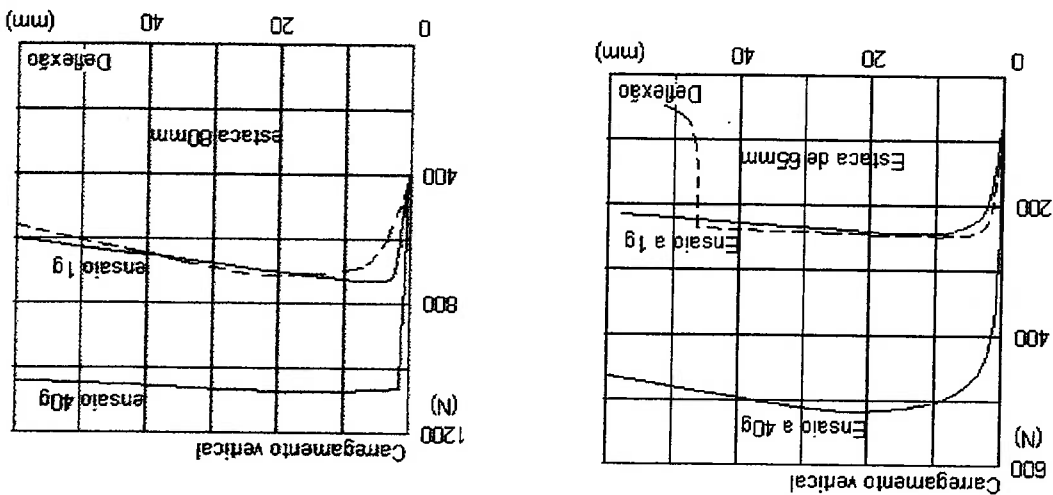


FIGURA A3 - CURVAS DE CARGA x DESLOCAMENTO (FUGLSANG, 1991)



Para avaliar o comportamento das estacas de sucção relativos a sua instalação e o comportamento desta fundação submetida às cargas estáticas, um estudo foi realizado por Renzi et al. (1991) utilizando uma centrífuga.

Os ensaios em centrífuga foram executados em modelo com escala 1:100 de uma estaca protótipo de concreto, com diâmetro externo igual a 15m, uma altura igual a 21m e 0,4m de espessura de parede, instalada numa argila com propriedades geotécnicas encontradas nas costas litóranas da Itália.

Os ensaios envolveram instalação da estaca modelo usando sucção, medidas de deslocamento da estaca sob carga de trabalho e a avaliação da capacidade de carga vertical da estaca.

Foi realizado também ensaio de cone durante o voo, onde foi usado um piezocone miniatura para avaliar a resistência da amostra de argila e reproduzi-la na preparação do modelo, medindo-se a resistência de ponta e poro pressão em função da profundidade.

A estaca modelo foi construída em alumínio, sendo apresentada na Figura A5. Foram feitos quatro furos no topo da estaca, dois foram utilizados para a redução da pressão dentro da estaca.

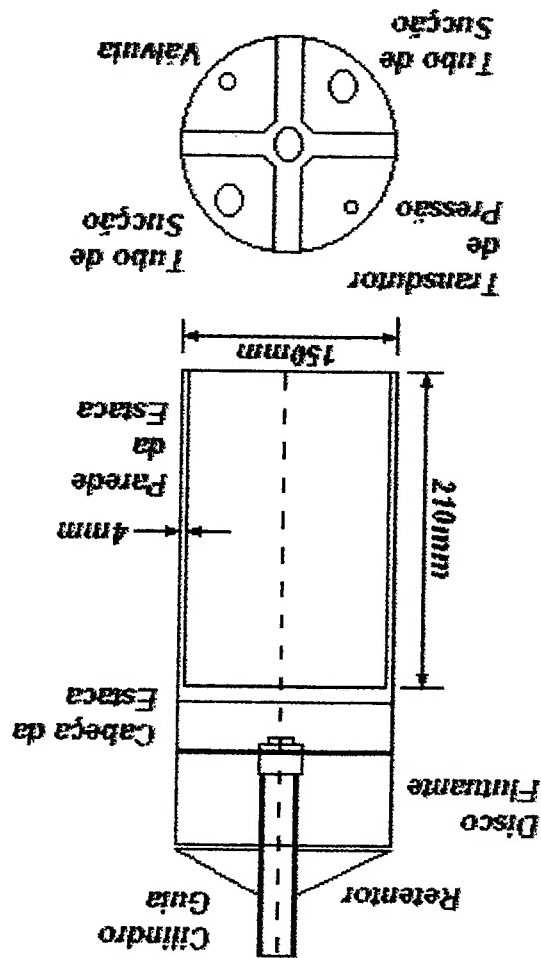
Um transdutor para monitorar a pressão da cavidade da estaca e uma válvula para permitir o retorno da pressão hidrostática da cavidade da estaca foram instalados no seu interior, permanecendo ainda dois furos.

Um tubo de alumínio de parede fina foi encaixado no centro do topo da estaca para mantê-la na posição durante a sua instalação através de um pistão de carregamento como guia. Para reduzir o peso do modelo de estaca que excedeu em comparação com o protótipo, um disco flutuante foi fixado no topo da estaca. Deste modo o modelo de estaca simulou uma estaca protótipo com um peso flutuante de 10,6 MN.

Um diagrama esquemático do equipamento de ensaio utilizado está apresentado na Figura A6. O recipiente do solo foi constituído de um cilindro de aço com um diâmetro interno de 40mm, encaixado a uma plataforma de base retangular. A parede do cilindro possuía furos para permitir a instalação de transdutores de poro pressão.

Furos também foram feitos na base retangular para drenagem da amostra. A amostra de solo simulava uma camada de 30m de argila adensada. Outro cilindro de diâmetro interno igual foi encaixado no topo do recipiente de solo para permitir a modelagem de uma lâmina de água do protótipo de 27,5m.

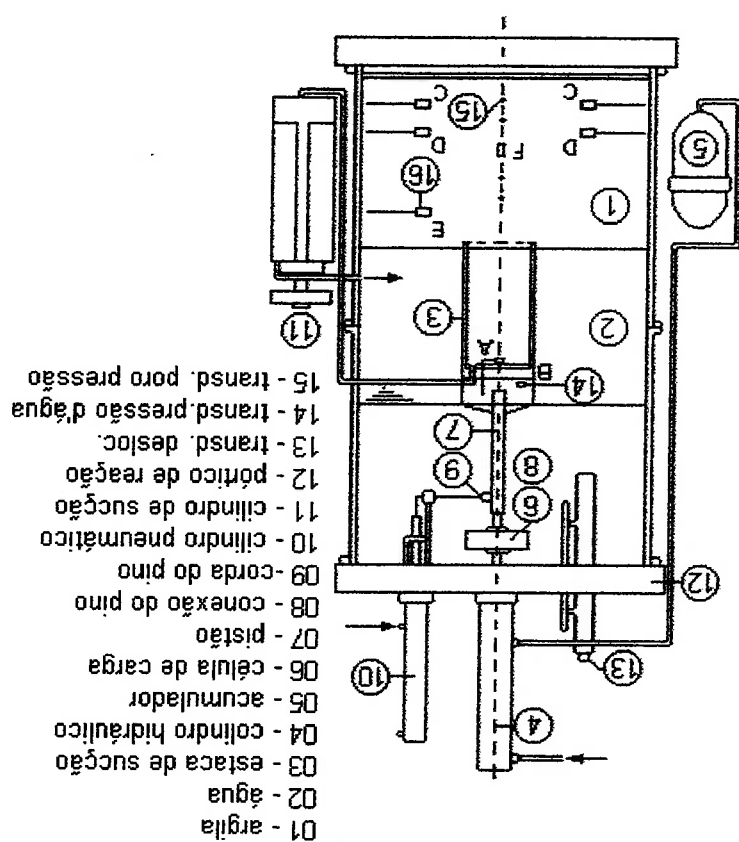
FIGURA A5 – MODELO DE ESTACA (RENZI, 1991)



em voo a ponta da estaca ficou suspensa em relação a amostra de solo. Durante o adensamento célula de carga encaixada no pistão em contato com a estaca. A força aplicada foi monitorada por uma câmara de retorno foi conectada a um acumulador pressurizado para evitar a pressão de óleo foi regulada por uma válvula proporcional. Esta sustentação foi obtida por um pino de metal entre o tubo guia e o pistão. O pino foi liberado usando uma corda de aço conectada a um cilindro pneumático instalado numa estrutura de reação. Para instalação da estaca sob sucção, encheu-se um cilindro, equipado com um pistão, com água, que foi conectado hidráulicamente à cavidade interna da estaca de sucção. Elevando o pistão do cilindro de sucção a uma

A carga vertical foi aplicada por meio de um atuador de duas direções e a entrada de pressão de óleo foi regulada por uma válvula proporcional.

FIGURA A6 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE EQUIPAMENTO DE ENSAIO (RENZI, 1991)



velocidade constante, extraia-se água da cavidade da estaca a uma taxa constante causando uma velocidade de penetração da estaca no solo.

Um transdutor de deslocamento potenciométrico fixado na armação de reação foi usado para medir o deslocamento vertical da estaca. Dois dos transdutores de poro pressão mediam as pressões que agiam no topo da estaca, sendo o transdutor (B) situado imediatamente sobre o topo da estaca e o transdutor (A) ficou posicionado para medir a pressão que fluía dentro da cavidade da estaca.

No plano ortogonal vertical foram colocados estes transdutores de poro pressão, nas linhas horizontais foi colocada uma mistura de pó e óleo. Ao término do ensaio foram observadas deformações nestas linhas devido a penetração da estaca pela radiografia da amostra.

A amplitude do campo gravitacional imposta no modelo foi igual a 100g num ponto a 10cm abaixo da superfície do solo. Este ponto ficou situado a uma distância radial igual a 1990mm do eixo de rotação. A sequência de operações adotada para cada ensaio está resumida como segue:

1. Tempo de espera para a aceleração de 100g para readensamento completo da amostra de argila sob seu peso próprio.

2. Execução de um ensaio de penetração com o piezocône miniatura e controle da dissipação da poro pressão devido a penetração em função do tempo.

3. Penetração pelo peso próprio da estaca na amostra de argila.

4. Penetração da estaca por sucção a uma profundidade abaixo da superfície do solo igual a 80% da altura máxima da estaca. A velocidade de penetração do modelo de estaca foi constante de 0,8cm/s, correspondendo a uma taxa de penetração do protótipo de 0,3m/h.

5. Espera por um período de tempo igual a 70 minutos, correspondendo a 16 meses no protótipo, para a dissipação da poro pressão induzida pela penetração. Depois foi iniciado o programa de carregamento como mostrado na Figura A7. O carregamento consistiu das seguintes fases:

- a. aplicação de uma carga vertical igual a 2,4 kN para um período de 52 minutos, simulando na estaca protótipo uma carga de trabalho igual a 24MN mantida durante um ano;
- b. aplicação de uma carga vertical cíclica para o dobro da amplitude igual a 0,5kN com um período de 8 segundos. Esta condição de carregamento simula o carregamento relativo à maré de magnitude de 5MN no protótipo. A amplitude de carga cíclica representa 20% da carga de trabalho aplicados à estaca;
- c. avaliação da capacidade de carga da estaca através da aplicação de incrementos de carga.

Foi executada uma série de ensaios de capacidade de carga, em duas amostras seguindo o esquema de carga indicado na Figura A7.

Os ensaios foram conduzidos adotando uma velocidade de carregamento igual a 0,5kN/s e espaçamento de tempo a intervalos regulares de 26minutos. Um ensaio de capacidade de carga também foi executado depois de manter a carga de projeto de 2,4kN durante 52 minutos.

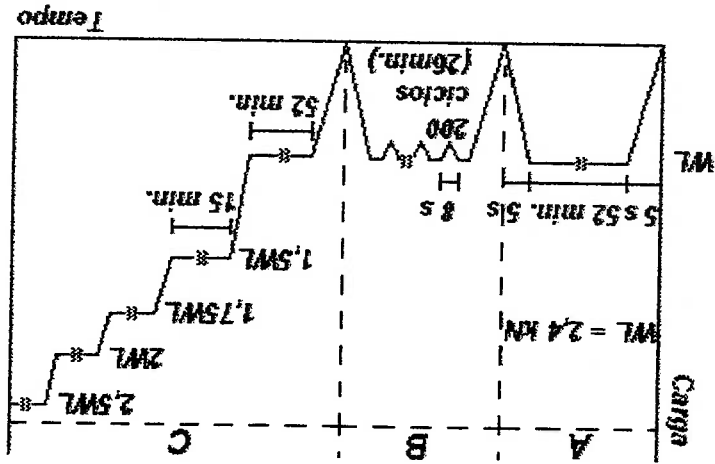


FIGURA A7 - PROGRAMA DE CARREGAMENTO (RENZI, 1991)

Outros ensaios em centrífuga foram feitos num total de quatro amostras, sendo que para cada readensamento na centrífuga foram necessários 20 horas. O grau de

adensamento alcançou um ponto em que a poro pressão estava medindo valores em torno de 95%.

A ponta da estaca chegou à profundidades finais abaixo da superfície do solo, variando entre 88mm e 98mm. A velocidade máxima de penetração nos primeiros centímetros foi de aproximadamente 2cm/s, que corresponde a uma velocidade de 0,7m/h para o protótipo. O deslocamento parou após aproximadamente 300s desde o começo da penetração.

Os ensaios que envolveram a penetração da estaca por sucção demonstraram que houve redução da pressão para 50kPa dentro da cavidade da estaca. Isto foi necessário para alcançar uma penetração de ponta de 170mm.

Medidas externas indicaram aumento de poro pressão durante a penetração, enquanto a poro pressão interna diminuiu até a sucção terminar, voltando ao mesmo valor após o adensamento pelo peso próprio. Após o período permitido de dissipação devido à penetração induzida na poro pressão, dois aspectos de interesse foram notados pelos autores.

O primeiro foi o grau de adensamento encontrado fora da estaca. Dados de ensaios indicaram que 70 minutos após a penetração, o grau médio de adensamento alcançou entre 50% e 60%; neste ponto, medidas excessivas de poro pressão ficaram iguais a 30% da tensão vertical efetiva inicial. O segundo ponto de interesse concerne ao tempo necessário para dissipar a poro pressão induzida pela penetração, dentro da estaca e perto da ponta.

Após o período de 70 minutos de adensamento, somente 25% da poro pressão tinha dissipado e essa poro pressão foi de aproximadamente 70% da tensão vertical efetiva inicial. O ensaio de centrifuga indicou que após 70 minutos de dissipação, a estaca não foi capaz de suportar a carga de trabalho de 2,4kN. A aplicação de carga vertical na estaca causou um deslocamento vertical imediato de 2,6mm e mantendo a carga por 4 minutos resultou um deslocamento total foi de 32mm.

A dissipação da poro pressão induzida pela penetração, especialmente dentro da estaca, foi muito baixa. Como consequência, concluiu-se que 16 meses após a instalação o protótipo ainda não poderia suportar a carga de trabalho.

Foi observado que o solo mostrou-se capaz de resistir à carga de trabalho e a aplicação de carga cíclica para simular variações relativas a maré não causou condições críticas no solo. As poro pressões geradas foram pequenas e o deslocamento da estaca foi desprezível.

Os ensaios de capacidade de carga demonstraram que na condição de protótipo um fator de segurança adequado só é obtido se a carga de trabalho for aplicada 3 anos depois da instalação da estaca.

Para estudar a instalação de estacas de sucção em areia, um programa de ensaio foi realizado por Allersma et al. (1997) numa pequena centrífuga geotécnica na Universidade de Delft.

Esta técnica de ensaios foi desenvolvida para simular uma diferença de pressão em uma coluna d'água superior a 30m. Durante a instalação os deslocamentos e pressões foram medidos.

A influência de vários parâmetros foi verificada e o mecanismo ativo para a instalação pôde ser examinado em detalhe. Segundo os resultados, observou-se uma relação linear entre a pressão e as dimensões da estaca de sucção. Os autores comentam que poderiam ser penetradas estacas até uma relação de $L/D = 4$, sem qualquer problema.

A carga de penetração na sucção foi aproximadamente 8 vezes menor que na penetração mecânica.

Para 150 vezes a gravidade terrestre, uma estaca de sucção, com uma altura de 10m e diâmetro de 9m, foi simulada com uma altura de 67mm e diâmetro de 60mm. O

efeito de profundidade da água foi simulado executando o ensaio em um *container* pressurizado, em que o interior da estaca de sucção foi conectado com a pressão atmosférica. Durante o ensaio, a profundidade de penetração, a diferença de pressão e a velocidade do fluxo da água foram medidas.

Nestes ensaios o deslocamento da estaca durante a instalação foi medido por uma técnica de processamento de imagem digital. Um sistema de carregamento controlado por computador foi usado para medir a carga na instalação da estaca de sucção.

Simulou-se uma grande coluna de água nos ensaios em um *container* na centrifuga conforme Figura A8. O interior da estaca de sucção foi conectado com a atmosfera, aumentando-se a pressão no *container*, que segundo o autor, isto tem o mesmo efeito de forma que a diferença de pressão necessária para cravar a estaca pôde ser obtida aumentando-se a pressão no *container*, em que a pressão ambiente é constante e a pressão dentro da estaca pode ser diminuída através da sucção. O topo da estaca de sucção foi conectado com o espaço externo do *container* por uma mangueira de plástico flexível.

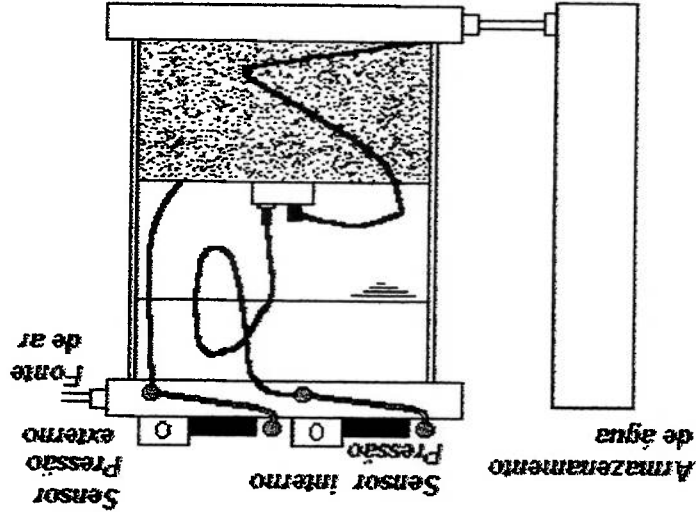


FIGURA A8 - DIAGRAMA DO *CONTAINER* PARA ENSAIO (ALLERSMA, 1997)

Uma segunda mangueira pequena foi conectada com um transdutor de pressão para medir a pressão dentro da estaca.

A pressão fora da estaca também foi medida de forma que a diferença de pressão foi conhecida durante a instalação. A taxa de fluxo de água nesta instalação foi medida elaborando-se imagens de vídeo que mostraram a coluna de água no recipiente cilíndrico transparente. O limite da capacidade da bomba foi simulado por um bocal.

Todos os ensaios foram realizados em camadas homogêneas de areia. Para reduzir o efeito do tamanho da partícula, areia com um tamanho de grão pequeno foi empregada (0,068mm até 0,140mm).

O ângulo de atrito entre o aço e a areia foi determinado por ensaio de cisalhamento, que encontrou um ângulo de 27°. As amostras de areia foram manualmente preparadas. As amostras foram compactadas vibrando-as no *container*.

A caixa era preenchida de camada em camada com areia molhada. Os melhores resultados foram obtidos perto da porosidade mínima da areia. A porosidade usada foi de 41%, com um desvio padrão de 1%.

Nos ensaios de penetração mecânica, a estaca foi penetrada na areia a uma velocidade de aproximadamente 2 mm/s. Durante o deslocamento, foi registrada a carga necessária.

Vários ensaios de sucção foram realizados para investigar o comportamento das estacas de sucção com geometrias diferentes. Um exemplo típico do procedimento de ensaio é apresentado na Figura A9, onde são mostradas as pressões e a profundidade de penetração em função do tempo.

No $t=0$ foi dado início à centrifugação, havendo um aumento na pressão hidrostática. No $t=320s$ foi aumentada a pressão de ar no *container*. Uma diferença de pressão

entre o interior e o exterior da estaca de sucção passou a existir e o deslocamento vertical da estaca também passou a ser observado.

Os aumentos da diferença de pressão durante a penetração e estabilização no momento da parada da penetração também foram observados.

No $t=350s$ a pressão de ar foi aumentada novamente para verificar se haveria mais penetração com uma pressão mais alta.

A pressão foi diminuída novamente até $t=500s$ e então parou-se a centrifuga. A taxa de fluxo da água durante a sucção também foi continuamente avaliada, usando uma relação da calibração entre perda na cabeça dos tubos e a taxa do fluxo.

Mostrando que a carga necessária para sucção seria muito menor que a carga necessária para a penetração da estaca pelo sistema de carregamento mecânico.

Em todos os ensaios o processo de penetração ocorreu suavemente. Até mesmo depois de parar o fluxo de água por algum tempo, a penetração continuou quase na mesma diferença de pressão quando o fluxo de água foi reiniciado.

O eixo da estaca de sucção tendia a uma posição vertical até mesmo quando a posição inicial não era verticalizada. Foi observado que se a profundidade de penetração inicial da estaca de sucção não seria suficiente e a liquefação do solo poderia acontecer assim que a sucção fosse acionada.

Análise posterior para verificação da bucha de areia dentro da estaca de sucção, mostrou que somente a areia perto da fronteira da estaca estava em um estado de liquefação.

Mais para o centro da estaca a areia parecia não ter sido perturbada. Este fenômeno também foi observado em uma estaca transparente que foi penetrada em areia seca usando uma bomba de vácuo a 1g.

Ensaios laboratoriais em estacas de sucção sob carregamento monotônico de curta duração foram realizados por Narasimha et al. (1997).

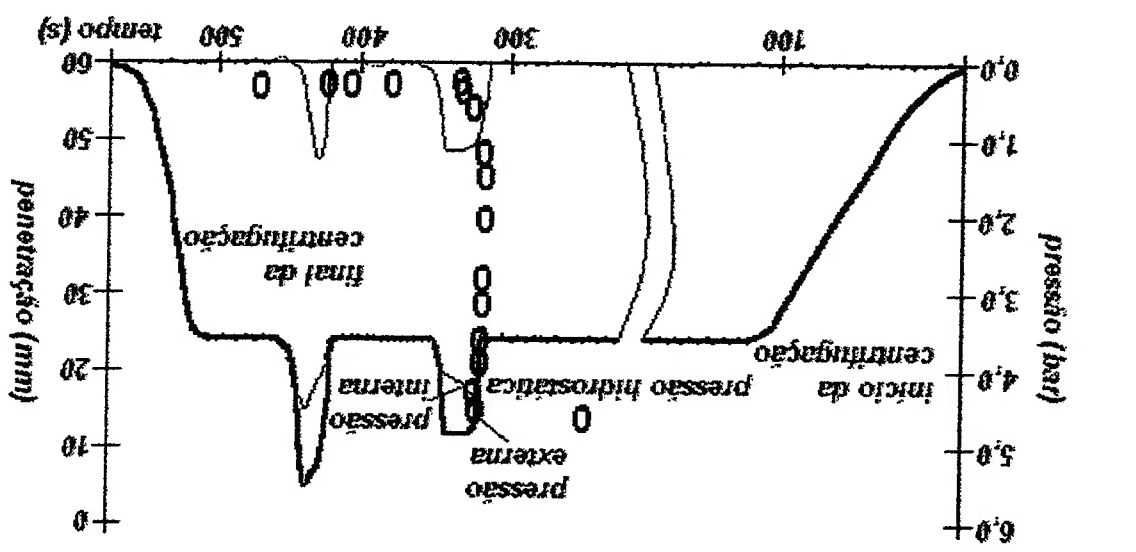
de ponta. Considerando que a diferença é muito maior que duas vezes, conclui-se que a redução de carga de penetração é principalmente causada pela redução da resistência

de ponta. Considerando que a diferença é muito maior que duas vezes, conclui-se que a penetração mecânica foi muito mais alta que a força necessária no caso da sucção.

Ensaios de sucção executados na mesma configuração de solo necessitaram de uma carga de penetração total de cerca de 10 MN. Como esperado, a resistência durante penetração mecânica necessitou de uma carga de 3,44kN para uma penetração de 50mm. Nas dimensões de protótipo uma força de 77MN seria necessária para uma penetração final de 7,5m.

O ensaio de penetração mecânica necessitou de uma carga de 3,44kN para uma penetração de 50mm. Nas dimensões de protótipo uma força de 77MN seria necessária para uma penetração final de 7,5m.

FIGURA A9 - APRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CURSO DE PRESSÃO E DESLOCAMENTO NO TEMPO (ALLERSMA, 1997)



Os modelos de estacas de razões de razões (L/D) de 1 e 2 foram instalados em um solo preparado com argila mole em um tanque de prova e a carga de arrancamento era aplicada através de um cabo e um arranjo de roldanas.

Para medir a sucção produzida no sistema, foram usados transdutores de pressão indutivos de 100kPa de capacidade. O arrancamento estático nos ensaios foi conduzido em níveis de carga (F/F_a) de 30%, 50% e 75%.

Os resultados da instrumentação nos ensaios foram avaliados sob condições de carregamento estático, a pressão de sucção foi estabelecida levando em consideração o deslocamento da estaca.

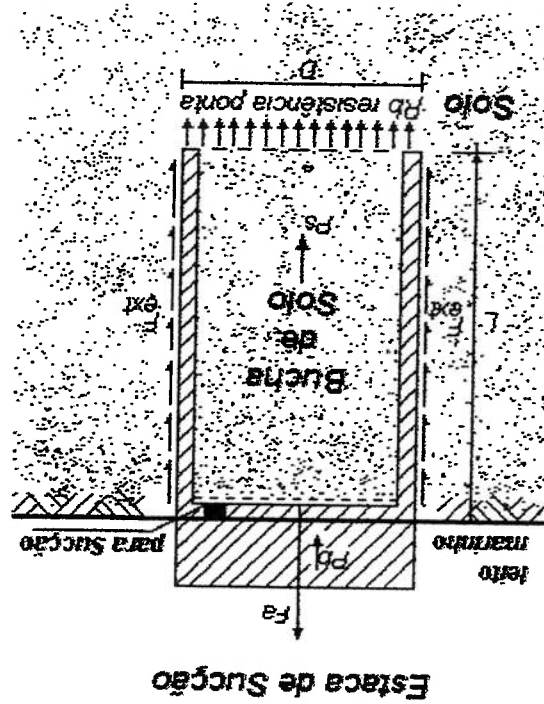


FIGURA A10 - CONCEPÇÃO DE ESTACA DE SUÇÃO EMPREGADA (NARASIMHA, 1997)

Neste sistema foi empregada uma argila saturada de alta impermeabilidade. O diferencial de pressão devido a poro pressão de água negativa e grandes pressões

ambientais gerou uma grande sucção chamada de sucção passiva. A sucção passiva desenvolvida no topo da bucha de solo fez com que se mantivesse dentro da estaca.

A sucção gerada no fundo da estaca causou uma significativa resistência de ruptura dita como sucção induzida por carregamento reverso. A Figura A10 mostra a estaca de sucção engastada, as condições na superfície da estaca com os vários componentes contribuindo para a sua capacidade.

Os ensaios laboratoriais foram conduzidos na escala 1:100 para modelo de estacas de sucção de 75mm de diâmetro e 3mm de espessura da parede. Para estudar a influência da razão do engastamento (L/D) no comportamento de arrancamento, três estacas de sucção de razões diferentes de comprimento e diâmetro ($L/D = 1,0; 1,5; 2,0$) foram fabricadas.

Um gancho de aço foi soldado no centro da cabeça do topo da estaca e foi usado para conectá-la ao sistema de carregamento.

No outro lado do gancho central, foram preparados furos com rosca para fixar dois tipos de parafusos para os transdutores de pressão, cuja finalidade foi medir o desenvolvimento de pressão de sucção no topo do solo.

O solo utilizado foi uma argila marinha típica obtida em um depósito costeiro da costa leste da Índia.

Para medir o desenvolvimento da pressão de sucção no topo da bucha de solo e no fundo da estaca de sucção, transdutores de pressão tipo diafragma indutivo (P11) da *HBM* com capacidade de 100kPa foram fixados no topo e na base.

A carga de arrancamento foi aplicada em incrementos pela colocação de pesos em um gancho de carga encaixado no topo da estaca de sucção através de um fio e arranjo de roldanas.

Nas saídas das células de carga, transdutores de deslocamento e transdutores de pressão foram alimentados por um amplificador de frequência multicanal e os sinais foram amplificados e gravados por meio de um sistema de aquisição de dados.

O modelo de estacas de sucção teve diferentes razões L/D (1,0; 1,5; 2,0). Sob carregamento monotônico de curta duração, os ensaios de arrancamento foram conduzidos para estimar a capacidade de arrancamento da estaca de sucção e, para tanto, conduziu-se a variação da pressão de sucção durante o movimento da estaca no topo da bucha de solo e o fundo.

Os modelos de estacas de sucção foram submetidos a diferentes cargas as quais foram menores que a capacidade de arrancamento de curta duração.

Estes ensaios foram conduzidos para um nível de carga estática de (F/Fa) de 25%, 50% e 75%. A variação do deslocamento da estaca, a pressão de sucção no topo da bucha de solo e na base em função do tempo para um dado nível de carga estática (F/Fa) foram obtidos nestes ensaios.

A curva típica de arrancamento, carga x deslocamento, obtida nos ensaios de arrancamento de curta duração no modelo de estaca de sucção de diferentes razões L/D é mostrada na Figura A11.

Destas curvas, três fases distintas podem ser observadas no comportamento do arrancamento. Na fase 1, as faixas de deslocamento até 2,0mm (1% para 3% do diâmetro) existe uma elevação da resistência ao arrancamento e isto é seguido pela fase 2 na qual há um gradual e lento aumento na resistência de arrancamento com a deformação. No entanto na fase 2 o deslocamento foi muito grande.

Na última porção (fase 3), existe uma curva reversa mostrando o incremento repentino na resistência de arrancamento seguido do arrancamento da estaca.

Além disso, foi notado em todos os ensaios, que o solo dentro da estaca estava intacto, confirmando a formação de bucha, consequentemente, aumentando a capacidade de arrancamento.

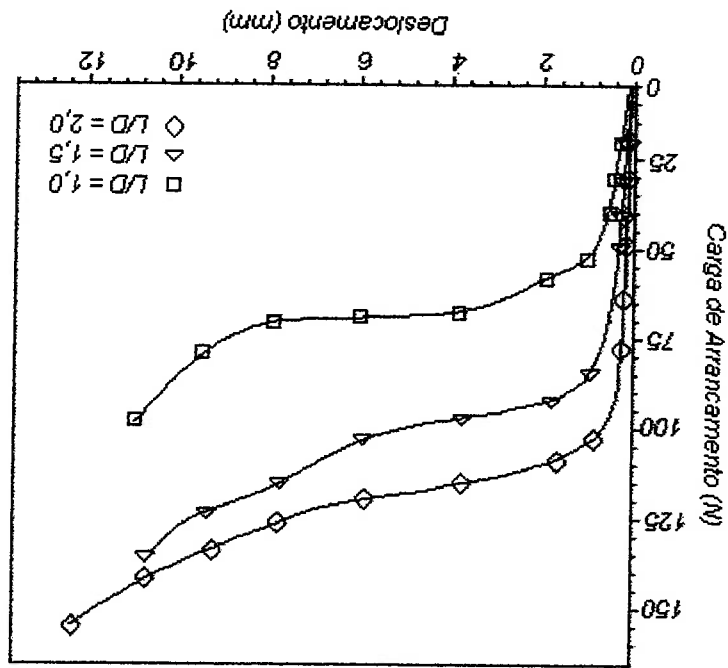


FIGURA A11 - CURVAS DE CARGA DE ARRANCAMENTO x DESLOCAMENTO DA ESTACA DE SUÇÃO (NARASIMHA, 1997)

Em todos os ensaios de carga, o primeiro componente mobilizado foi a superfície de atrito e esta precisou de um deslocamento muito pequeno. Na deformação inicial ficou evidente que existiu um crescimento acentuado na capacidade até um deslocamento menor 1,5mm (2% do diâmetro).

Isto indica que a superfície de atrito foi predominante nesta fase. Como a formação da bucha foi desenvolvida, a superfície de atrito mobilizada foi somente na superfície de atrito externo.

A fase 1 foi seguida por um grande processo de deslocamento e este estágio (fase 2) pode ser chamado de comportamento final da sucção induzida reversa. Esta fase dura

até um deslocamento de 12mm (16% do diâmetro da estaca). Depois deste estágio, a resistência do solo foi mobilizada no fundo da estaca.

Quando a força de arrancamento excedeu a capacidade de carga destes três componentes ocorreu a ruptura do solo na base da estaca. Dos resultados apresentados na Figura 31, ficou claro que com o aumento na L/D existe uma melhora na capacidade final da estaca.

A Figura A12(a) mostra o modo de falha onde surgiu uma cratera de superfície circular abaixo da estaca, de 1,5 vezes o diâmetro da estaca, estendendo-se verticalmente até a superfície do solo. No entanto, em grandes deslocamentos, a estaca foi completamente arrancada (Figura A12(b)) com a bucha dentro, como se arrancasse o fundo da estaca (força do solo estava totalmente mobilizada).

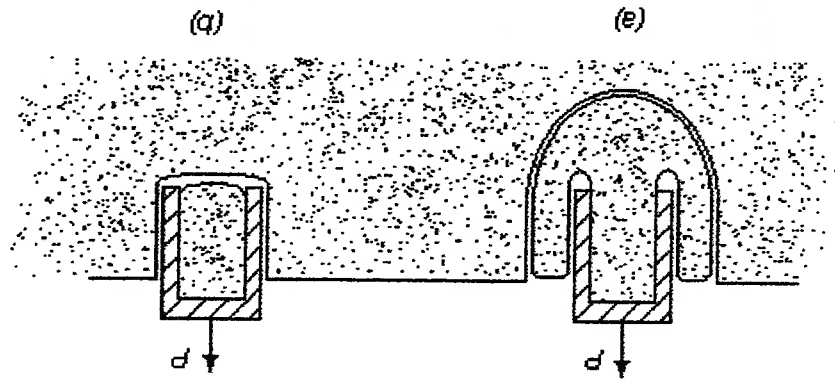


FIGURA A12 – FORMAS DE RUPTURAS (NARASIMHA, 1997)

A capacidade de carga de arrancamento de estacas de sucção para plataformas de pernas tensionadas TLP em águas profundas de 2000 a 3000m no Golfo do México foi estudada por El-Gharbawy et al. (1998).

As estacas empregadas nos experimentos eram de comprimento de 2, 4, 6 e 12 diâmetros, para correlacionar o efeito do aumento do comprimento da estaca na resistência à penetração e a capacidade de arrancamento, bem como verificar a viabilidade do uso de sucção como método de instalação. A simulação de

carregamentos em *TLP*'s foi de forma estática e cíclica. Para a determinação da capacidade total da fundação, foram medidos o deslocamento através de *LVDT* e a poro pressão de água através de sensores de pressão, dentro e nas proximidades do modelo de estaca. A capacidade de arrancamento do modelo de estaca foi definida também sob condições de carregamento drenado e não drenado.

Os resultados do programa experimental mostraram que a velocidade do arrancamento tem uma influência significativa na capacidade de arrancamento de longa duração, representando o limite superior no pico do carregamento cíclico. O comportamento das estacas de sucção foi influenciado significativamente pelo grau de drenagem devido à redução do excesso de poro pressão devido a aplicação de carga. O grau de drenagem depende da taxa de carregamento e da condutividade hidráulica do material da fundação.

Os ensaios da estaca de comprimento de 4 diâmetros indicaram que o arrancamento não drenado tem três vezes a capacidade de arrancamento drenado. O aumento na capacidade de arrancamento na condição não drenado é facilmente atribuído à geração de poro pressão de água, que foi muito alto e negativo em comparação com aqueles gerados nos ensaios drenados.

Os resultados da instrumentação mostraram também que para o comportamento drenado, no caso de carregamento de longo período, a velocidade de aplicação de carga pode ser bastante baixa, permitindo a dissipação do excesso de poro pressão de água. Quando a carga excede a capacidade de arrancamento da estaca, acontece no local uma ruptura de cisalhamento com o arrancamento da estaca sem a bucha de solo em seu interior. A estaca, neste caso, derivou sua capacidade de carga dos seguintes componentes:

- peso submerso da estaca de sucção, modelos de fundações e cargas de lastro e
- resistência de cisalhamento entre o solo no interior e fora da parede da estaca.

No comportamento não drenado, para o carregamento de curta duração, simulando as condições ambientais, a velocidade de carregamento foi muito alta não permitindo a dissipação do excesso de poro pressão de água, o comportamento de não drenagem é caracterizado pela ruptura de cisalhamento e uma bucha de solo foi retirada dentro da estaca durante a sua extração. A ruptura de cisalhamento em geral foi descrita como ruptura de comportamento reverso da capacidade de carga. A estaca, neste caso, deriva sua capacidade de carga elástica dos seguintes componentes:

- peso submerso da estaca de sucção, modelos de fundações e cargas de lastro;
- peso submerso da bucha de solo desenvolvido dentro da estaca;
- resistência de cisalhamento não drenado no solo ao longo das paredes externas da estaca, e
- capacidade de carga reversa na base.

O comportamento e a capacidade de arrancamento de estacas de sucção foram estudados em outro trabalho de El-Gharbawy et al. (1998). Utilizou-se um modelo de estacas testado sob carregamento de arrancamento estático e cíclico.

Antes dos ensaios, fez-se a preparação de amostras de solo, projeto e fabricação de modelo de estacas de sucção e o desenvolvimento de uma instrumentação, aquisição de dados, e sistemas de carregamento.

Segundo o autor, na grande maioria dos casos, a estaca de sucção é construída para ter relações de comprimento/diâmetro (L/D) menores que 2, fazendo com que a fundação seja curta e larga em comparação a uma estaca convencional com relação aos solos do Mar do Norte, que são em grande maioria de argila dura e areia compacta.

No Golfo do México, porém, os solos argilosos tendem a ser profundos, normalmente adensados, ou até mesmo sob adensados, argilas com camadas de areia ocasionais levaram a necessidade de utilização de grandes tensões laterais e com a

presença de argilas moles, houve grande interesse no comportamento de estacas de sucção com penetrações relativamente grandes.

O projeto dessa pesquisa explorou também o potencial do uso de estacas com relações de aspecto maior que 2 e avaliou o comportamento das estacas de sucção sob carregamento de arrancamento estático e cíclico para aplicação no Golfo do México. A primeira série de ensaios foi executada com um modelo de estaca de sucção com uma relação de aspecto igual a 4.

Foi necessário escolher um tipo de solo que representasse melhor as propriedades dos materiais da fundação no campo, mantendo o grau de compatibilidade no laboratório. O material da fundação no Golfo do México é altamente plástico, onde a argila é normalmente adensada.

A preparação da amostra envolveu mistura de solo seco com água a uma quantidade representativa, o adensamento do solo ocorreu sob o efeito de seu próprio peso e provocou uma pressão decrescente até que o fluxo de água através da amostra fosse cessado.

O solo escolhido para estas experiências foi uma argila de caolinita clara. Com um limite de liquidez de 57% e limite plasticidade de 27%. Ensaios de cisalhamento direto, drenado, com pressão normal inferior a 2,0kPa forneceram um ângulo de atrito de 27,8°.

Cada barril foi equipado com drenos no fundo para permitir a drenagem durante o adensamento da amostra. Dois furos de 10mm foram feitos, diametralmente opostos, na parede do barril, aproximadamente 37mm acima do fundo.

Os furos foram então providos com conectores necessários para a instalação dos tubos de drenagem. Um tubo de polietileno (PE) de 6mm de diâmetro foi conectado na lateral da parede do barril.

Dentro do barril, os tubos foram conectados e no outro extremo dos tubos foi introduzido um tecido geossintético para filtrar as partículas de solo nas linhas de drenagem. Do lado de fora do barril, os tubos foram conectados a uma linha de vácuo.

Os tubos (PE) dentro do barril estavam cobertos com aproximadamente 50mm de agregado grosso envolvido por um tecido geossintético industrial. Finalmente, o solo poroso foi misturado com água no topo do tecido geossintético. Uma vez o solo misturado dentro dos barris, medida de força de cisalhamento foi feita.

Depois, uma pressão de vácuo de aproximadamente 50 kPa foi aplicada no fundo, enquanto mantinha-se uma lamina de água sobre o topo da amostra, permitindo o início do processo de adensamento. A amostra foi submetida a um gradiente hidráulico descendente igual a 7. Um desenho esquemático das drenagens construídas para cada barril é mostrado na Figura A13.

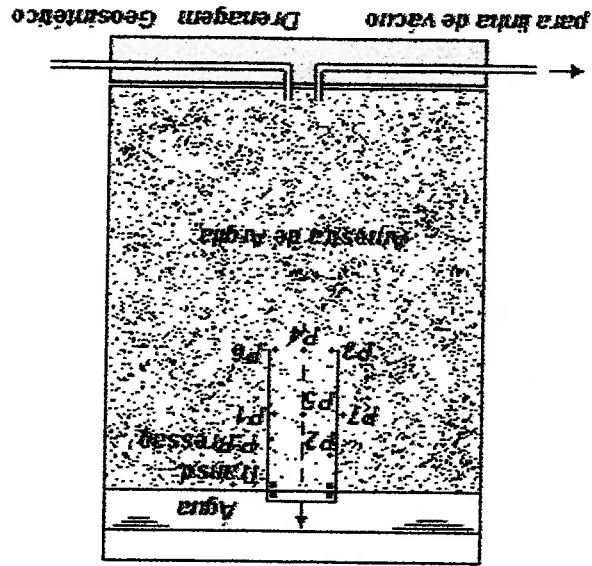


FIGURA A13 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA DRENAGEM DA AMOSTRA SOB ADENSAMENTO (EL – GHARBAWY, 1998)

O processo de adensamento foi monitorado por meio de dois tubos piezômetros fixados na parede do tanque em elevações diferentes. Os dois jogos de tubos foram posicionados diametralmente opostos. Foram medidas as elevações da água nos tubos num período de 30 dias.

O excesso de poro pressão de água negativa foi definido como a diferença entre a elevação, da água no tubo piezômetro e o nível da água parada no tanque, multiplicado pela unidade de peso da água. Os tubos só funcionaram para poro pressões positivas mas eles serviram para indicar a taxa em que o adensamento aconteceu. Os níveis de água nos tubos mais próximos ao fundo do tanque (com aberturas de 735mm do topo do tanque) diminuíram rapidamente na aplicação da pressão de sucção de drenagem abaixo da amostra de solo, depois de alguns dias.

Os níveis da água nos tubos piezômetros nas posições mais altas mostraram um comportamento semelhante, embora a uma taxa mais baixa. Depois de um período de aproximadamente 15 dias, o nível de água nos tubos mais altos, com aberturas até 220mm do topo do tanque, ficou equilibrado, indicando um possível estado estável de fluxo descendente de água através da amostra de solo.

A força de cisalhamento foi obtida usando um dispositivo de cisalhamento de palheta *Vane Test* de laboratório com 25mm de largura por 100mm de altura, soldada a uma haste de aço inoxidável.

As relações de aspecto do modelo de estacas foram de 2, 4, 6, e 12. Para acomodar todos os modelos dentro de 800mm de profundidade de amostra de solo e 125mm de diâmetro foi escolhida a estaca 2, tendo 100mm de diâmetro para as estacas 4 e 6, e 50mm de diâmetro para as estacas 12. Cada modelo de estaca consistiu de um tubo com paredes de razão de espessura/diâmetro $(t/D) = 0,03$, encaixados na tampa da estaca.

A estaca 2 era de parede dupla que fornecia poro pressão e medidores de deformação. As estacas 4 e 6 foram instrumentadas com tubos piezômetros de 3mm

de diâmetro para determinar a distribuição da poro pressão dentro e fora das estacas durante o ensaio.

Três tubos piezômetros de tetrafluoretileno flexível (TFE) estavam montados nas paredes internas com elevações diferentes, enquanto dois tubos de metal rígidos foram encaixados na tampa da estaca e utilizados para medir as poro pressões de água dentro da bucha de solo, enquanto, dois tubos de TFE estavam montados do lado de fora das paredes. Os tubos piezômetros foram conectados aos transdutores de poro pressão encaixados na cabeça da estaca.

Os tubos das estacas 4 e 6 foram feitos de plástico acrílico, principalmente pela disponibilidade de tamanhos necessários e pela transparência para permitir o exame visual do solo dentro da estaca depois do arrancamento.

O material também era claro, e tinha um baixo coeficiente de expansão térmica e uma baixa capacidade de absorção de água. Manteve-se a mesma relação de t/D para a estaca 12 como para os outros dois e um tubo de aço inoxidável foi escolhido. As tampas das estacas foram construídas em plástico.

O sistema de aquisição de dados consistia dos seguintes componentes principais:

1. Dispositivos de medidas analógicas (transdutores) foram usados para avaliar os fenômenos físicos (poro pressão de água, carga, e deslocamento), fornecendo sinais elétricos para o SAD. Os dispositivos analógicos eram transdutores de poro pressão de água de 100kPa, célula de carga de 890N e *LVDT* medidor de deslocamento com faixa de 760mm.

2. Os sinais elétricos gerados pelos transdutores foram passados por uma caixa de condicionadores de sinais para amplificação, isolamento e filtragem.

3. O cartão conversor A/D, de alta velocidade, placa A/D série E de 12 bits, capaz de amostrar 64 canais de terra comum ou 32 canais diferenciais de entrada com taxa de 500kHz. Ele tem duas saídas analógicas de 12 bits, duas de 24 bits, *countertimers* de 20MHz, e oito canais I/O digital. O cartão também acomoda separadores analógicos e digitais na entrada analógica.

4. O computador utilizado é um padrão compatível com PC, tendo um microprocessador de 100MHz, RAM de 32Mb, e um HD de 1Gb.

5. O *software* usado para controlar o processo de aquisição de dados foi o *LabVIEW* versão 4.0. Ele oferece em sua interface: *I/O*, análise de dados, conectividade para aplicação de endereços como armazenamento de dados e aquisição de dados. A ferramenta do *LabVIEW* também permite a análise e processamento dos dados on line. Os *VI's* fornecem um painel frontal interativo e interface de controle para o ensaio ou medida do processo.

Um manômetro de mercúrio foi usado para calibrar os transdutores de pressão na faixa de -50kPa a 70kPa. A célula de carga foi calibrada em tensão usando peso morto. O *LVDT* foi calibrado usando bloco padrão.

O sistema de carregamento consistiu de dois atuadores lineares perpendiculares, usando motores de passo e controlados por um computador. Este sistema permitiu a aplicação de carga pré - controlada, deslocamentos vertical e lateral, para simular a ação de um *TLP*. O controlador de movimento utilizou ponto flutuante, de 32 bits, processador de sinal digital de 33MHz *DSP*. O controlador também foi equipado com 256kb de memória não volátil, duas entradas analógicas (um por eixo) com 12 conversores A/D (configurável para controle de *joystick*), linha *I/O* para chaves e sensores de registro, e uma porta RS232 ou RS485 (chave selecionável) para comunicação com a interface e com o operador.

A interface era neste caso um PC rodando um software de programação, fornecendo os meios pelos quais as aplicações poderiam ser completamente desenvolvidas e compiladas para o *DSP*. O *software* do MX2000 usado para operar o controlador de movimento foi elaborado para atender as simulações de movimento do programa de ensaio, mas também poderia ter sido usado em modo terminal de emulação que habilita o controle direto da translação de drivers, digitando os comandos pelo *prompt*. O sistema de operação MX2000 possui operações multitarjetas para até 7 atribuições, permitindo programação modular. Os programas de computação foram

codificados em *SEBASIC*, compilados e carregados para o controlador de movimento.

Devido a medida de pressão negativa, foi necessária a remoção das bolhas de ar de todos os sistemas. Os transdutores foram saturados, colocando água deaerada e injetando a mesma água nas suas aberturas. A estaca foi colocada em um tanque contendo água deaerada e vibrada manualmente para remover qualquer bolha presa às paredes do interior da estaca. Os tubos de piezômetros estavam conectados à tampa da estaca e a uma fonte de vácuo. A água deaerada do tanque de saturação foi retirada para um vasilhame, através dos tubos piezômetros, para assegurar a saturação completa. As linhas dos transdutores foram enroladas com a fita de *teflon* (*TFE*) e encaixadas na tampa da estaca. O encaixe da linha de vácuo ajustou-se na tampa da estaca e foi conectado à fonte de vácuo. Esta linha também foi saturada, permitindo que a água deaerada fluísse pela estaca por saturação do tanque até o vasilhame. A base da estaca foi então duplamente lacrada com vedação de borracha, um *O-ring* e uma braçadeira de mangueira.

Para a instalação, uma haste vertical de aço inoxidável guiada por uma esfera, foi presa no topo para assegurar que a estaca penetraria verticalmente. O ensaio começou com o encosto da estaca na superfície da amostra de solo, acomodando-se sob seu peso próprio, criando um "selo" necessário para a aplicação da sucção. Uma bomba foi então encaixada no topo da estaca e usada para criar uma zona de pressão reduzida dentro da estaca em relação ao exterior. Este diferencial de pressão através do topo da estaca provocou a cravação da estaca na amostra de solo.

A aplicação de sucção, até aproximadamente 100kPa, consumiu um tempo de instalação de poucos minutos. Liquefação dentro da estaca não foi observada durante a instalação. Um movimento uniforme de 25 a 50mm/s (9m/h e 18m/h) foi aplicado para alcançar o arrancamento não drenado. Ensaios de arrancamento drenados foram conduzidos aplicando-se cargas de arrancamento em incrementos, permitindo a dissipação da pressão de sucção entre os incrementos de carga. Para o arrancamento

inclinado, os programas foram modificados para que o deslocamento líquido da pista fosse inclinado.

O comportamento drenado mostrou um local de ruptura de cisalhamento com o arrancamento da estaca, não criando uma bucha de solo. O comportamento não drenado foi característico para uma ruptura de cisalhamento geral e uma bucha de solo foi retida dentro da estaca durante a extração.

Estimou-se que a vibração horizontal para estruturas flutuantes, como os *TLP's*, em águas profundas, é da ordem de 100 segundos. As frequências as quais as cargas ambientais são aplicadas, na forma de vento e ondas do mar, às estruturas, podem variar entre 5 a 20 vezes as frequências naturais de vibração horizontal.

Para carregamentos cíclicos, o atuador foi programado para carga controlada, como no caso de arrancamento drenado. Cargas foram aplicadas em ciclos em ambas as direções, verticais e horizontais, com forças relativas sincronizadas para reproduzir o carregamento esperado no sistema flutuante offshore.

Os ensaios cíclicos de tensão controlada foram conduzidos aplicando-se uma carga de fuga estática e uma carga cíclica sobreposta. Picos de cargas cíclicas que excederam este valor resultaram no arrancamento da estaca.

O modelo de estacas fabricado com relações de aspecto maiores que 2, apresentou uma força de cisalhamento maior aumentando com a profundidade da estaca em solos constituídos tipicamente do Golfo do México, a instalação por sucção foi um sucesso.

Uma série de ensaios empregando estacas com relação $L/D = 4$ indicou através da instrumentação, identificando os fatores que contribuem com a capacidade de arrancamento, como a profundidade de cravação e a taxa de arrancamento. A capacidade de arrancamento aumentou significativamente com o aumento da velocidade de arrancamento.